



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

THIAGO DA SILVA MARTINS

MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TRENS
DE CARGA EM FERROVIAS *HEAVY HAUL* - ESTUDO
DE CASO DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS

VITÓRIA
2020

THIAGO DA SILVA MARTINS

**MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TRENS DE
CARGA EM FERROVIAS *HEAVY HAUL* - ESTUDO DE CASO
DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Carla César Martins Cunha

**VITÓRIA
2020**

Incluir Ficha Catalográfica (Solicitar no site da Biblioteca Central)

THIAGO DA SILVA MARTINS

**MELHORIA NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TRENS DE
CARGA EM FERROVIAS *HEAVY HAUL* - ESTUDO DE CASO
DA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Sustentabilidade, Ambiente e Sociedade e linha de pesquisa Gestão Sustentável e Energia.

Aprovada em 16 de março de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Carla César Martins Cunha
Orientadora – PPGES/CT/UFES

Prof. D.Sc. Ednilson Silva Felipe
Examinador Interno – PPGES/CT/UFES

Prof. D.Sc. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Examinador Externo – PPGES/CT/UFES

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em especial, aos amigos que suportaram minha ausência em diversos momentos que necessitei postergar ou delegar minhas demandas diárias em prol das entregas exigidas pelo mestrado e por me apoiarem incondicionalmente em busca desse sonho que tracei a três anos atrás.

Minha família, obrigado por me dar força e sempre acreditar que eu já havia conseguido este objetivo.

E, não menos importante, meu sincero obrigado à Professora Doutora Carla, que me orientou ao longo desses anos e nunca questionou meu potencial em entregar o que era necessário.

RESUMO

A busca por melhoria nos processos industriais é uma premissa básica para sustentabilidade dos negócios e a competitividade de mercado nos dias de hoje. Especificamente se tratando de eficiência energética, os ganhos são mais evidentes, pois afetam diretamente os custos operacionais do negócio, impacta na produtividade das equipes e dos ativos e ainda agrega potenciais melhorias nos impactos ambientais inerentes a qualquer processo industrial, mais significativamente, em empresas como a Vale S.A. que trabalham com extração de matéria prima. Este estudo tinha como objetivo a melhoria da eficiência energética dos trens que transportam minério de ferro na Estrada de Ferro Carajás, cujo foco de interesse era a revisão dos padrões operacionais de condução baseada em procedimentos mais eficientes. Além de comprovar a viabilidade técnica das melhorias operacionais identificadas, foram obtidos grandes potenciais de redução do consumo energético (eficiência) dos trens e, conseqüentemente, no consumo de combustível utilizado nas locomovas, atingindo a ordem de milhões de reais anualmente. Além do retorno direto são também apresentados os impactos ambientais evitados ao reduzir a quantidade de gases de efeito estufa lançados na atmosfera.

Palavras-chave: Eficiência energética. Operação ferroviária. *Heavy haul*. Estrada de Ferro Carajás.

ABSTRACT

The search for improvement in industrial processes is a basic premise for business sustainability and market competitiveness today. The aim of this study was based on energy efficiency, and it affects directly the operational business costs, impact on the productivity of teams and assets and also add potential improvements in the industrial environmental impacts, more significantly, in companies such as Vale S.A. that work with raw material extraction. The main objective of this work was to improve the energy efficiency of trains that transport iron ore on the Carajás Railway, whose focus was on the review of operational driving standards based on more efficient procedures. In addition to proving the technical feasibility of the operational improvements identified, great potentials were obtained to reduce the energy consumption (efficiency) of the trains and, consequently, the fuel consumption used in the locomotives, reaching the order of millions of dollars annually. In addition to direct return, the environmental impacts can be reduced by avoiding the amount of greenhouse gases released into the atmosphere if the proposal were implemented.

Keywords: Energy Efficiency. Railway Operation. Heavy Haul. Carajás Railway.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Matriz de transportes dos seis maiores países do mundo	25
Figura 2.2 – Categorização das medidas de economia de energia consumidas durante o processo de condução do trem	29
Figura 2.3 – Comparação entre o custo e o potencial de economia de energia para cada medida passível de implementação	30
Figura 2.4 – Formações mais utilizadas para trens longos	35
Figura 2.5 – Modelo simplificado de uma composição com três veículos de massa concentrada.....	38
Figura 2.6 – Esquemático do sistema de freio pneumático de composições ferroviárias.....	42
Figura 2.7 – Pressões do encanamento geral e do cilindro de freio de diferentes vagões em uma aplicação de emergência	43
Figura 2.8 – Curvas de esforço de tração de uma locomotiva GE – BB40-9W (Dash 9W) em função da velocidade	45
Figura 2.9 – Decomposição de forças devido a inclinação da via permanente	47
Figura 3.1 – Esquema do método WTW-LEA	58
Figura 4.1 – Traçado da Estrada de Ferro Carajás	59
Figura 4.2 – Perfil planimétrico da EFC traçado através de posicionamento GPS	60
Figura 4.3 – Formação padrão do trem da EFC.....	61
Figura 4.4 – Formação do trem da EFC com utilização de locomotivas <i>Helper</i>	63
Figura 4.5 – Vagão GDT	64
Figura 4.6 – Vagão GDU.....	64
Figura 4.7 – Locomotiva DASH-9	67
Figura 4.8 – Pontos de troca de equipagem da EFC.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Infraestrutura de transportes de carga pelo mundo.....	24
Tabela 4.1 – Tipos de formação utilizados na EFC para trens carregados.....	62
Tabela 4.2 – Frota de vagões em circulação para o transporte de minério de ferro na EFC.....	65
Tabela 4.3 – Distribuição de locomotivas utilizadas no transporte de minério de ferro da EFC.....	66
Tabela 5.1 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Carajás a Marabá.....	87
Tabela 5.2 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Marabá a Açailândia.....	96
Tabela 5.3 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Açailândia a Alto Alegre.....	106
Tabela 5.4 – Inventário dos fatores de emissão de poluentes para a utilização de B25.....	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Ranking do Índice de Desempenho Logístico do Banco Mundial.....	24
Quadro 4.1 – Características construtivas dos vagões.....	65
Quadro 4.2 – Características construtivas da locomotiva Dash-9.....	67
Quadro 4.3 – Equações referentes às curvas do Gráfico 4.3.....	70
Quadro 5.1 - Consumo e eficiência da locomotiva Dash 9 da EFC em relação a cada ponto de aceleração.....	93
Quadro A.1 – Procedimento de operação de trens na regional 3 da EFC referente a seção 5 (quilômetro 829 ao 819).....	129
Quadro A.2 – Procedimento de operação de trens na regional 3 da EFC referente a seção 5 (quilômetro 818 ao 813).....	130
Quadro A.3 – Procedimento de operação de trens na regional 3 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 782 ao 776).....	131
Quadro A.4 – Procedimento de operação de trens na regional 3 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 775,6 ao 761,8).....	132
Quadro A.5 – Procedimento de operação de trens na regional 3 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 760,4 ao 750,2).....	133
Quadro B.1 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 1 (quilômetro 736 ao 725).....	134
Quadro B.2 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 1 (quilômetro 723 ao 713,5).....	135
Quadro B.3 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 579 ao 565).....	136
Quadro B.4 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 565 ao 546).....	137
Quadro B.5 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 545 ao 535).....	138
Quadro B.6 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 1 (quilômetro 512 ao 506).....	139
Quadro B.7 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 1 (quilômetro 504 ao 487).....	140
Quadro B.8 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 4 (quilômetro 437 ao 426).....	141

Quadro B.9 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 4 (quilômetro 425 ao 412).....	142
Quadro B.10 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 6 (quilômetro 387 ao 385).....	143
Quadro B.11 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 6 (quilômetro 383 ao 365).....	144
Quadro B.12 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 6 (quilômetro 364 ao 362).....	145
Quadro C.1 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 6 (quilômetro 131 ao 115).....	146
Quadro C.2 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 6 (quilômetro 114 ao 105).....	147
Quadro C.3 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 8 (quilômetro 78 ao 73).....	148
Quadro C.4 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 8 (quilômetro 72 ao 52).....	149
Quadro C.5 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 9 (quilômetro 51 ao 31).....	150
Quadro C.6 – Procedimento de operação de trens na regional 1 da EFC referente a seção 9 (quilômetro 30 ao 26).....	151

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 – Curvas de esforço durante a frenagem dinâmica em locomotivas diesel-elétricas.....	46
Gráfico 4.1 – Perfil altimétrico da linha tronco da EFC.....	61
Gráfico 4.2 – Perfil altimétrico da EFC.....	63
Gráfico 4.3 – Comparação entre as fórmulas de resistência à propulsão.....	69
Gráfico 4.4 – Velocidade média dos trens que transportam minério de ferro na EFC.....	72
Gráfico 5.1 – Comparação entre a energia mínima calculada, energia consumida simulada e a energia consumida real.....	74
Gráfico 5.2 – Comparação entre a energia mínima calculada, energia consumida simulada, energia consumida real e a energia mínima calculada com dissipação....	76
Gráfico 5.3 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Carajás a Marabá.....	77
Gráfico 5.4 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Carajás até Marabá.....	77
Gráfico 5.5 - Comparativo do consumo energético ao longo do trecho de Carajás a Marabá.....	78
Gráfico 5.6 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9.....	80
Gráfico 5.7 – Comparação do consumo energético em cada simulação das (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9.....	82
Gráfico 5.8 - Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações de menor consumo energético nas (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9.....	84
Gráfico 5.9 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante a simulações de menor consumo energético nas (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9.....	85
Gráfico 5.10 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Marabá a Açailândia.....	88
Gráfico 5.11 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Marabá até Açailândia.....	88
Gráfico 5.12 - Comparativo de consumo energético ao longo do trecho de Marabá a Açailândia.....	89
Gráfico 5.13 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9.....	91

Gráfico 5.14 – Comparação do consumo energético de cada simulação para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9.....	92
Gráfico 5.15 – Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9.....	94
Gráfico 5.16 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9.....	95
Gráfico 5.17 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Açailândia a Alto Alegre.....	97
Gráfico 5.18 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Açailândia até Alto Alegre.....	97
Gráfico 5.19 – Comparativo de consumo energético ao longo do trecho de Açailândia a Alto Alegre.....	98
Gráfico 5.20 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 1, (b) seção 4 e seção 6 (c)	100
Gráfico 5.21 – Comparação do consumo energético de cada simulação para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6.....	101
Gráfico 5.22 – Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6.....	103
Gráfico 5.23 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6.....	104
A operação com trens carregados partindo do pátio de Alto Alegre até a chegada ao terminal portuário de Ponta da Madeira foi analisada de forma detalhada, segundo a metodologia proposta, e valores de consumo energético podem ser observados no Gráfico 5.24.	106
Como já mencionado anteriormente, é importante conhecer o perfil altimétrico (Gráfico 5) da via como uma referência comparativa para os gastos energéticos apresentados no Gráfico 5.25Gráfico 5.18.	106
Gráfico 5.26 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Alto Alegre ao Porto de Ponta da Madeira.....	107
Gráfico 5.27 – Perfil altimétrico e velocidade da composição durante a operação padrão de trens carregados na seção 7 (a), seção 9 (b) e seção 10 (c)	109

LISTA DE SIGLAS

AAR	<i>Association of American Railroads</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ATO	<i>Automatic Train Operation</i>
AVE	Alta Velocidade Espanhola
BRICS	Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul, como grupo de países em desenvolvimento
DAS	<i>Driver Advisory Systems</i>
EFC	Estrada de Ferro Carajás
ESSs	<i>Energy Storage Systems</i>
FNS	Ferrovias Norte Sul
GEE	Gases de efeito estufa
GPV	Gerenciamento da Produção Vale
HVAC	<i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
LPI	<i>Logistics Performance Index</i>
MFA	Manipulador de freio automático
PIB	Produto Interno Bruto
SCG	<i>Scheduling and Control Group</i>
SISPAV	Sistema de Padronização Vale
TKU	Tonelada Quilômetro Útil
VLI	Valor Logística Integrada Multimodal S.A.
VMA	Velocidade Máxima Autorizada
WTW-LEA	<i>Well-to-Wheel Locomotives Emissions Assessment</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Coeficiente de atrito estático
a_i	Aceleração de um veículo intermediário da composição
a_n	Aceleração do n ésimo veículo da composição
A_o	Coeficiente de atrito estático dos rolamentos
B	Coeficiente de atrito cinético
C	Coeficiente de arrasto aerodinâmico
c_i	Coeficiente de carregamento de um aparelho de choque e tração intermediário da composição
c_n	Coeficiente de carregamento do n ésimo aparelho de choque e tração da composição
E_{con}	Energia consumida em um determinado percurso
EE	Índice de eficiência energética ferroviária
E_{min}	Energia mínima necessária para uma composição percorrer um determinado traçado ferroviário
E_{util}	Energia útil variável independente da equação de regressão
F_b	Força de frenagem
F_{cr}	Força de resistência em curvas
F_{crj}	Força de resistência na curva j
F_{gi}	Força da gravidade aplicada ao veículo intermediário da composição
F_{gn}	Força da gravidade aplicada ao n ésimo veículo da composição
F_{pr}	Força de resistência à propulsão
F_{pri}	Força de resistência à propulsão do veículo i
F_{res}	Força de resistência total
F_{ri}	Força de resistência ao rolamento de um veículo intermediário da composição
F_{rn}	Força de resistência ao rolamento do n ésimo veículo da composição
$F_{v/dbi}$	Força de tração ou aplicação de freio dinâmico por uma locomotiva intermediária
$F_{v/dbn}$	Força de tração ou aplicação de freio dinâmico pela n ésima locomotiva
g	Aceleração da gravidade
h	Altura relativa percorrida durante o percurso

k_i	Coeficiente de elasticidade de um aparelho de choque e tração intermediário da composição
k_n	Coeficiente de elasticidade do enésimo aparelho de choque e tração da composição
L	Comprimento do percurso analisado
l_{cj}	Comprimento da curva j
m_a	Carga por eixo do veículo da composição
m_i	Massa de um veículo intermediário da composição coeficiente da equação de regressão
m_n	Massa do enésimo veículo da composição
m_t	Massa total da composição
n	Número de eixos do veículo da composição
η_{energ}	Índice de eficiência energética
P	Potência mecânica
q	Número de veículos do trem
r	Número de curvas do percurso
R	Raio de curva
S_f	Área da seção frontal do veículo da composição
t	Tempo
v_i	Velocidade de um veículo intermediário da composição
v_n	Velocidade do enésimo veículo da composição
x_i	Deslocamento do aparelho de choque e tração intermediário da composição
x_n	Deslocamento do enésimo aparelho de choque e tração da composição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	JUSTIFICATIVAS	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.3	ESTRUTURA CAPITULAR.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO	23
2.2	ESTADO DA ARTE NA EFICIÊNCIA DA CONDUÇÃO FERROVIÁRIA.....	27
2.3	FORMAÇÃO DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS	34
2.4	DINÂMICA FERROVIÁRIA	36
2.4.1	Força de resistência à propulsão (F_{prn})	39
2.4.2	Força de resistência ao rolamento em curvas (F_{crn}).....	41
2.4.3	Força de frenagem (F_{bn})	42
2.4.4	Força de propulsão e força de frenagem dinâmica	44
2.4.5	Componentes da força gravitacional (F_{gn})	46
2.5	CONSUMO ENERGÉTICO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO	47
2.5.1	Cálculo da energia mínima	48
2.5.2	Cálculo da energia consumida em um trem real	50
2.6	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE.....	51
3	METODOLOGIA.....	54
4	PREMISSAS E CONSIDERAÇÕES.....	59
4.1	TRAÇADO DA VIA PERMANENTE.....	59
4.2	CONFIGURAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS.....	61
4.3	TIPOS E PESO MÉDIO DOS VAGÕES	63
4.4	TIPOS DE LOCOMOTIVAS.....	66
4.5	PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE DAVIS	67
4.6	VELOCIDADE MÉDIA AO LONGO DA FERROVIA	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1	ANÁLISE DO TRECHO DE CARAJÁS A MARABÁ	76
5.2	ANÁLISE DO TRECHO DE MARABÁ A AÇAILÂNDIA	87

5.3	ANÁLISE DO TRECHO DE AÇAILÂNDIA A ALTO ALEGRE.....	96
5.4	ANÁLISE DO TRECHO DE ALTO ALEGRE A PONTA DA MADEIRA	106
5.5	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	110
6	CONCLUSÕES	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	115
	ANEXO A – PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO DE TRENS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA AS SEÇÕES ANALISADAS NA REGIONAL 3	129
	ANEXO B – PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO DE TRENS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA AS SEÇÕES ANALISADAS NA REGIONAL 2	134
	ANEXO C – PROCEDIMENTOS DE CONDUÇÃO DE TRENS NA ESTRADA DE FERRO CARAJÁS PARA AS SEÇÕES ANALISADAS NA REGIONAL 1	146

1 INTRODUÇÃO

Diversos fatores são decisivos para o desenvolvimento das sociedades, sendo um deles, e de grande importância, um sistema de transporte eficiente. A combinação dos processos de globalização econômica, liberação comercial e inovações tecnológicas gerou uma nova visão de mercado, onde vantagens competitivas e comparativas foram implementadas, aumentando as exigências em regiões com alto custo logístico (BRASIL, 2013).

Empresas mineradoras, em sua maioria, decidem por construir a sua própria infraestrutura de transporte com a finalidade de escoar sua produção e tem por sua principal escolha, o modo ferroviário, especialmente, por sua capacidade de transportar grandes volumes. Em consequência de sua robustez e capacidade, estas ferrovias demandam grandes investimentos e custos operacionais, impactando significativamente o valor final dos produtos transportados (FONTAN, 2018).

Em busca de estratégias de atendimento de mercados e competitividade no setor de mineração, as empresas procuram aumentar a eficiência do transporte ferroviário, bem como sua eficiência energética, visando à redução de custos, à maior produtividade e, conseqüentemente, à maximização de suas margens de lucro.

O conceito mais conhecido de eficiência energética (η_{energ}) se baseia na Lei da Conservação de Energia, também conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica, por meio da qual é possível relacionar o efeito energético útil com o consumo energético do sistema a ser avaliado, como mostrado em (1) (VIANA et al., 2012).

$$\eta_{energ} = \frac{E_{util}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}} \quad (1)$$

Entretanto quando se avalia a eficiência energética de uma ferrovia, a literatura aponta uma abordagem diferente que pode ser expressada quantitativamente por meio do índice de eficiência energética, composto pela energia consumida nas unidades tratoras do trem em relação à quantidade de carga tracionada por uma determinada distância percorrida. No caso de se utilizar locomotivas diesel-elétricas como as unidades tratoras dos trens de carga, Cabral (2017) traduz o conceito por meio de (2).

$$EE = \frac{\text{consumo de combustível}}{\text{carga bruta transportada} \cdot \text{distância}} \left[\frac{\text{litros}}{\text{ktkb}} \right] \quad (2)$$

Segundo o mesmo autor, uma locomotiva apresenta um bom resultado em eficiência energética caso economize no consumo de combustível e/ou aumente a carga bruta transportada no trem, considerando que uma ferrovia possui sempre distâncias fixas entre seus pontos de origem e destino. Assim, a preocupação com o consumo relativo de óleo diesel nas ferrovias tornou-se muito significativo, demonstrando a importância do presente projeto, que tem como foco principal o aumento da eficiência energética na condução de trens. Para isso, busca-se inicialmente identificar as variáveis que influenciam este processo.

Considerando a EFC uma ferrovia já consolidada, com mais de 30 anos de operação, liderando o *ranking* das ferrovias com maior volume de cargas transportadas no Brasil (VALE, 2018; BRASIL, 2019), é possível identificar perdas energéticas significativas durante a condução dos trens de carga e propor alterações no modo de condução que possam ser realizadas a fim de torná-la ainda mais eficiente?

Uma variável extremamente relevante é o fator humano, pois, na maioria dos casos, as composições férreas são conduzidas por maquinistas que necessitam tomar suas ações considerando um grande número de informações, como tempo de viagem, restrições de velocidade, formação e peso do trem, parâmetros de segurança, condições climáticas, vida útil, e nível de desgaste do material rodante e da via permanente, tornando uma viagem um complexo problema de coordenação que reflete diretamente no consumo de combustível realizado pelas locomotivas. Porém, é possível atuar diretamente na revisão dos padrões de condução executados pelos maquinistas, metodologia estudada e aplicada nesta pesquisa, buscando o aprimoramento deste processo de transporte (NAWEED; ROSE, 2018).

Esta pesquisa abordou oportunidades de melhoria na eficiência energética do transporte de minério de ferro da Estrada de Ferro Carajás (EFC) por meio de propostas de alterações no padrão de condução dos trens tipo desta ferrovia.

1.1 JUSTIFICATIVAS

O maior transportador de cargas sobre trilhos no Brasil é a empresa Vale S.A. que, em sua predominância, realiza o transporte de minério de ferro dos complexos de mineração no interior do país até os portos presentes nas regiões costeiras. Diante da composição de custos operacionais da companhia, é possível evidenciar que, em 2017, 68,4% do custo operacional ferroviário foi gerado pelo consumo de combustível das locomotivas movidas à diesel (BRASIL, 2018b; VALE, 2018b). Tal representatividade é fundamental para observar que qualquer esforço técnico, científico ou de planejamento, que traga maior eficiência energética durante as operações de transporte, pode resultar em enormes benefícios para a companhia e para o setor.

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), que é a responsável por regular e fiscalizar as atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transportes no Brasil, a Estrada de Ferro Carajás é a ferrovia com a maior a quantidade de carga transportada do país, superando 175 milhões de toneladas em 2017 e ultrapassando a marca de 200 milhões de toneladas em 2018 (BRASIL, 2018b; BRASIL, 2019). A capacidade de carga e, conseqüentemente, a produção crescem anualmente devido aos fortes investimentos que a empresa Vale S.A. vem realizando neste modal, em especial na EFC, que superou os R\$ 8 bilhões no último triênio avaliado (2014 a 2016), representando mais de 50% de todo o investimento das empresas concessionárias de transportes ferroviários do país neste período (BRASIL, 2016b). É diante desses números expressivos que se é percebida a importância desta ferrovia e ressaltada a relevância de se desenvolver estudos buscando a melhoria na eficiência energética das operações desse transporte, foco do presente trabalho.

A EFC é a ferrovia que escoar todo o minério de ferro do sistema norte da empresa Vale S.A., juntamente com todas as cargas destinadas à exportação da Ferrovia Norte Sul (FNS), operada pela empresa Valor da Logística Integrada Multimodal S.A. (VLI), além de ser responsável pelo transporte de mais de 200 mil passageiros por ano. Apesar de já transportar volumes muito representativos diante da matriz nacional, esta ferrovia tem o maior plano de aumento de capacidade de todo o país, em termos operacionais e também em volume de investimentos. Tal perspectiva de crescimento

prevê uma grande mudança de patamar de produção nos próximos 5 anos, o que impactará diretamente nos custos operacionais em consequência do aumento no consumo de combustível, que pode ser melhor estudado e analisado visando seu uso de forma mais eficiente, objetivo consonante com a estratégia de mercado da companhia. (POPPINGA, 2017; BRASIL, 2018b; BRASIL, 2016a).

Deve-se finalmente ressaltar que um dos principais motivadores do presente estudo foi a possibilidade de replicação das propostas de melhoria identificadas em mais de 90% dos trens que trafegam na malha da EFC, por se tratarem de trens tipo (com o mesmo padrão de formação) transportando minério de ferro, e pela possibilidade de reprodução da metodologia apresentada em outros estudos aplicados às ferrovias de carga, gerando novas potencialidades de aproveitamento energético para este modo de transporte no Brasil e no exterior (BRASIL, 2018b).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do projeto foi identificar uma proposta para elevar a eficiência energética, por meio da economia no consumo de combustível, dos trens tipo da Estrada de Ferro Carajás no transporte de minério de ferro, sem comprometer a segurança operacional.

Foi necessário conhecer o modelo de condução dos trens tipo da Estrada de Ferro Carajás no transporte de minério de ferro, determinando seu consumo energético segmentado por trecho da ferrovia, bem como identificar os locais da ferrovia onde o padrão atual de condução apresenta maior desperdício energético.

Diante dos trechos identificados, fez-se necessária a avaliação dos modelos operacionais e o levantamento dos principais motivos do desperdício energético, por meio dos quais foram propostas estratégias de alteração do modelo original, as quais trouxeram, conseqüentemente, ganhos no consumo de combustível e na redução de gases de efeito estufa lançados na atmosfera.

Por fim, objetivou-se a verificação dos parâmetros de segurança e estabilidade dos trens tipo após as alterações propostas, de forma a obter a comprovação da viabilidade técnica da implementação obtida.

1.3 ESTRUTURA CAPITULAR

Este trabalho está organizado de forma a apresentar inicialmente as justificativas e os objetivos que motivaram o desenvolvimento da pesquisa. Em busca de embasamento teórico e a exploração do estado da arte, no que tange a eficiência energética ferroviária, foi realizada uma pesquisa bibliográfica detalhada nos conceitos, formulações, principais publicações na temática e também na evolução do conhecimento dos principais grupos de pesquisa identificados, sendo retratada no Capítulo 2.

Já no Capítulo 3 é descrita a metodologia aplicada nessa dissertação, como forma de proporcionar ao leitor a replicação de todos os passos empregados na busca dos objetivos aqui definidos. Porém, nenhuma pesquisa é executada sem a delimitação das condições de contorno e a definição de premissas essenciais à execução dos cálculos e comparações de dados, as quais foram descritas no Capítulo 4.

Os resultados obtidos e as discussões realizadas no emprego da metodologia, bem como as análises de dados, foram bem exploradas no Capítulo 5. Por fim, como forma de condensar todo o conhecimento construído e elucidar os pontos chave desta pesquisa, foram salientadas as conclusões do trabalho ao longo do Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta inicialmente uma abordagem do setor de transportes brasileiro, de forma a situar o modo ferroviário no contexto nacional, destaca os principais estudos relativos à condução eficiente de trens e ilustra os parâmetros que influenciam a dinâmica de uma composição ferroviária, em busca de entender como estes impactam no consumo energético de uma ferrovia. Traz ainda uma descrição dos princípios de sustentabilidade que esta pesquisa permeia, apontando os principais impactos ambientais de sua aplicação.

2.1 SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO

Considerando-se os últimos 15 anos, pode-se afirmar que o Brasil não soube aproveitar as oportunidades existentes durante os bons momentos econômicos neste período para reduzir o percentual dos custos logísticos em relação ao seu Produto Interno Bruto (PIB). O crescimento da economia brasileira, em média de 2,5% ao ano, entre 2004 e 2017, e o aumento da demanda por transporte a uma taxa superior (4% ao ano), a carência por infraestrutura de transportes foi agravada e tornou os problemas estruturais do país mais evidenciados, pressionando ainda mais os custos logísticos, visto que não se evidenciou nenhum avanço significativo no cenário nacional (LIMA, 2014; BRASIL, 2018a).

Quando comparado a outros países do BRICS (Rússia, Índia, China e África do Sul), o Brasil é o mais carente em termos estruturais (Tabela 2.1). O principal motivo para essa discrepância se deve ao fato de ainda continuar com uma infraestrutura para transporte de carga similar à que tinha na década de 80. Essa carência impacta significativamente em rankings como o de desempenho logístico, conhecido como LPI - *Logistics Performance Index*, divulgado pelo Banco Mundial. Na construção deste indicador, o Banco Mundial analisa seis itens (Confiabilidade, Rastreamento de Carga, Competência dos Serviços, Disponibilidade de Transporte, Procedimento de Alfândega e Infraestrutura), o qual apresenta o Brasil na 56ª posição em 2018, permanecendo à frente apenas da Rússia, se comparado aos países citados, como mostra o Quadro 2.1 (LIMA, 2014; BANCO MUNDIAL, 2018).

Tabela 2.1 – Infraestrutura de transportes de carga pelo mundo

	Brasil	China	Índia	Rússia	África do Sul
Área (milhões km²)	8,5	9,6	3,0	17,0	1,2
Rodovias (mil km)	219	1576	1569	776	754
Ferrovias (mil km)	29	86	64	87	22
Dutovias (mil km)	19	87	35	260	26
Hidrovias (mil km)	14	110	15	102	8

Fonte: Lima (2014) e Banco Mundial (2018).

Quadro 2.1 – Ranking do Índice de Desempenho Logístico do Banco Mundial

	Desempenho Logístico			Infraestrutura		
	2014	2016	2018	2014	2016	2018
Alemanha	1º	1º	1º	1º	1º	1º
Suécia	6º	3º	2º	9º	3º	3º
Bélgica	3º	6º	3º	8º	14º	14º
Áustria	22º	7º	4º	25º	12º	5º
Japão	10º	12º	5º	7º	11º	2º
EUA	9º	10º	14º	5º	8º	7º
Canadá	12º	14º	20º	10º	9º	21º
China	28º	27º	26º	23º	23º	20º
África do Sul	34º	20º	33º	38º	21º	36º
Índia	54º	35º	44º	58º	36º	52º
Brasil	65º	55º	56º	54º	47º	50º
Rússia	90º	99º	75º	77º	94º	61º

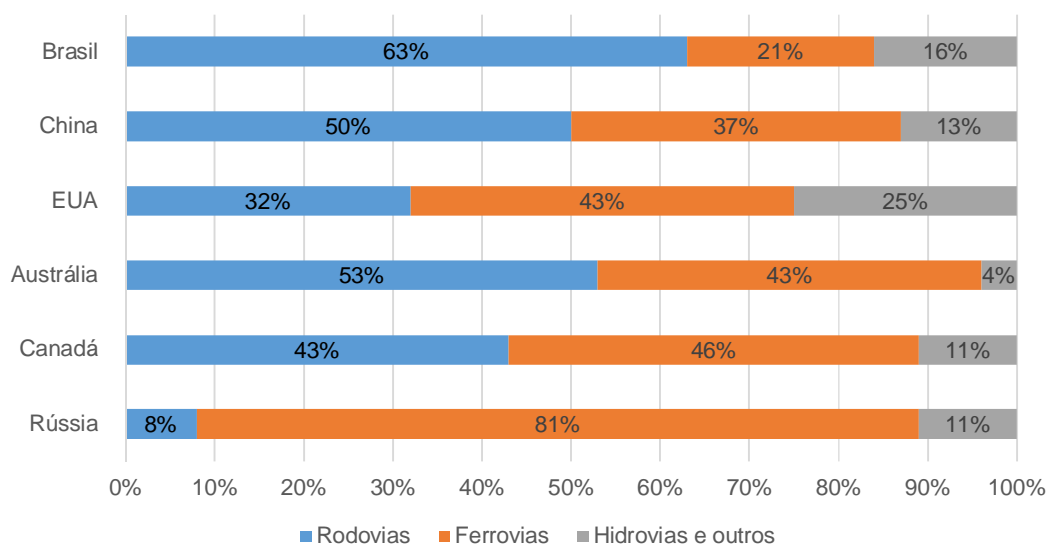
Fonte: Banco Mundial (2018).

Como forma de entendimento, o LPI pode ser descrito com um indicador que mede a eficiência de cadeias de fornecimento de comércio, ou desempenho logístico de cada localidade, aplicado a mais de 160 países. Um bom desempenho logístico de um país impacta diretamente no seu crescimento econômico, na diversificação e na redução da pobreza. Porém, esse desempenho depende muito do ambiente político: medidas de países individuais ou grupos econômicos regionais na provisão de infraestrutura, regulamentação e desenvolvimento de serviços, o que elucida o posicionamento do Brasil em relação às outras nações (MARTÍ; PUERTAS; GARCÍA, 2014).

Além de promover a mensuração da performance logística de um país, o LPI tornou-se um instrumento fundamental que explica a relação entre comércio e facilitação de transporte, ajudado a estabelecer prioridades para investimentos, fortalecendo o diálogo público-privado e promovendo o comércio e o transporte em diferentes países (OJALA; ÇELEBI, 2016).

De forma a entender como os investimentos em infraestrutura de transportes foram empregados no território nacional e nas maiores nações do mundo, a matriz de transportes é apresentada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Matriz de transportes dos seis maiores países do mundo



Fonte: Brasil (2016c) e Lobo (2017).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

As principais economias do mundo têm a ferrovia como a base fundamental de seus meios de transporte, sendo a malha ferroviária norte-americana a maior do mundo, com quase 295 mil quilômetros de extensão, liderando também no volume de cargas transportadas. Segundo dados da *Association of American Railroads* (AAR), as ferrovias dos Estados Unidos transportaram 2.551.518 milhões de TKU (Tonelada Quilômetro Útil, em tradução livre) em 2016. Contudo, a Rússia é o país onde as ferrovias contam com maior representatividade na matriz de transportes, correspondendo a, aproximadamente, 80%, e movimentando, em 2016, 2.344.087 milhões de TKU (BRASIL, 2016b).

O Brasil possui, claramente, uma matriz de transportes desbalanceada (Figura 2.1), onde o transporte rodoviário tem uma predominância de 63%, seguido do ferroviário, com apenas 21%, transportando principalmente grãos ao longo do território nacional, ou seja, muito trabalho e investimento ainda precisam ser realizados no Brasil para melhorar a competitividade dos nossos produtos no mercado internacional. Apesar da malha ferroviária brasileira ser pequena frente às malhas dos demais países citados, as concessionárias de ferrovias de carga atingiram um elevado ganho de produtividade devido aos investimentos crescentes, onde apenas o minério de ferro possui uma representatividade de mais de 74% de toda a carga transportada sobre os trilhos, fazendo com que as buscas por soluções mais eficientes sejam cada vez mais incentivadas pela indústria de mineração e também por seus operadores logísticos (BRASIL, 2012; BRASIL, 2016b; BRASIL, 2018b).

Desde suas origens, o modo de transporte ferroviário, quando comparado ao modo rodoviário, caracteriza-se como transportador de grandes volumes com elevadas taxas de eficiência, principalmente em casos de deslocamentos em longas distâncias. Apresenta, ainda, maior segurança, no que se refere aos índices de acidentes e à incidência de furtos e roubos, é naturalmente direcionado ao transporte de cargas com baixo valor agregado e é extremamente eficiente em fluxos concentrados, ou seja, quando os produtos transportados possuem origem e destino fixos e pouco dispersos (POMBAL et al., 2010).

Analisando a cadeia produtiva do minério de ferro no Brasil, mais especificamente a produção da empresa Vale S.A., consegue-se destacar três características fundamentais deste processo, no que tange à logística de produção, a saber, o baixo valor agregado do produto, os enormes volumes a serem transportados (cerca de 366 milhões de toneladas por ano) e as longas distâncias a serem percorridas (em torno de 900 km) em fluxos concentrados do carregamento nas minas (regiões pouco dispersas) aos portos. Diante de tal proximidade entre as vantagens operacionais de uma ferrovia e a necessidade de escoamento da produção de minério de ferro da empresa, é fácil perceber o motivo da utilização deste modo de transporte em toda a produção brasileira (VALE, 2017).

2.2 ESTADO DA ARTE NA EFICIÊNCIA DA CONDUÇÃO FERROVIÁRIA

Nas últimas décadas, os sistemas de transporte ferroviário mudaram drasticamente em nível de tecnologia, tamanho dos trens, velocidade de deslocamento, qualidade de serviço etc. O atual sistema de transporte ferroviário está desempenhando um papel fundamental para o crescimento econômico sustentável, proporcionando acesso aos passageiros dentro e entre os principais centros econômicos e cumprindo uma posição vital na cadeia de suprimentos (YIN et al., 2017).

O modo de funcionamento dos trens, para obter uma operação segura e eficiente em um sistema ferroviário, é uma questão duradoura que remonta ao nascimento do transporte ferroviário. Para os sistemas ferroviários tradicionais, segundo Cacchiani e outros (2014), isso é geralmente realizado por meio de um cronograma e um plano de utilização do material rodante, que são formulados por um processo de planejamento extensivo, executado muito tempo antes das operações em tempo real. Por outro lado, Clark (2010) relata que estes podem ser feitos de forma mais integrada e dinâmica, onde a operação dos trens é realizada pelos maquinistas em campo com a ajuda de dispositivos de sinalização, que têm por finalidade autorizar a locomoção dos mesmos por meio de licenças, rotas, de forma embarcada (equipamentos de bordo) ou por meio de equipamentos presentes na via.

Tratando-se especialmente dos sistemas ferroviários urbanos ou de ferrovias de carga com alta densidade de tráfego, a eficiência e a segurança são questões especialmente severas, pois a demanda de passageiros é extremamente alta, o intervalo na partida de trens é muito curto ou a capacidade da ferrovia se aproxima do limite econômico. Com o desenvolvimento das tecnologias de comunicação, controle e computação nas últimas décadas, a operação automática de trens (ATO, do inglês *Automatic Train Operation*) é considerada uma tecnologia emergente para substituir a direção manual tradicional em muitos sistemas ferroviários (MIYATAKE; KO, 2010).

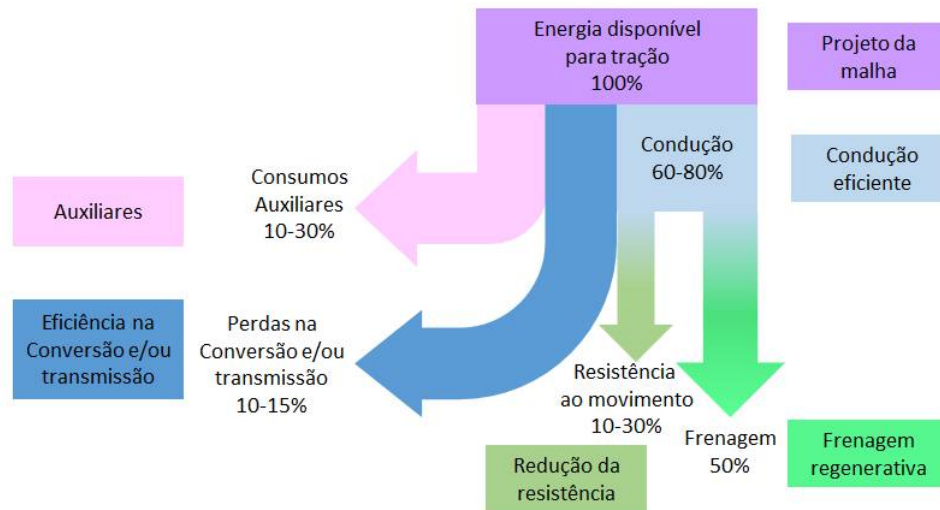
Uma ampla variedade de medidas pode ser aplicada para economizar energia e melhorar a eficiência da malha ferroviária. Implementações específicas podem envolver desde alterações na infraestrutura a mudanças nos padrões de operação, e até mesmo substituição do material rodante em uma determinada malha ou linha. Por meio do desenvolvimento de modelos e simuladores precisos, os pesquisadores são

mais capazes de prever a economia de energia resultante da implementação dessas medidas. No entanto, diversos métodos pesquisados são muito limitados, aplicáveis apenas a pequenas seções de linha ou a certos tipos de ferrovias sob condições específicas. Os operadores ferroviários, portanto, enfrentam decisões difíceis ao escolher métodos ou a combinação deles para aplicação de seus investimentos (DOUGLAS et al., 2015).

A energia consumida por cada trem em cada viagem é da ordem de centenas ou milhares de quilowatt-hora (kWh). Assim, mesmo que as economias por jornada sejam pequenas, isso pode levar a uma economia substancial se a técnica for aplicada a todas as viagens ao longo de toda a malha ferroviária. As principais medidas de economia de energia são categorizadas em seis grupos, de acordo com o uso de energia, sendo descritas como redução no consumo energético dos equipamentos ou dos sistemas auxiliares embarcados, melhoria da eficiência elétrica de transmissão de energia, redução da resistência ao movimento do trem, diminuição da demanda de energia por meio de técnicas de direção mais eficientes, melhoria do projeto da ferrovia e redução das perdas de energia durante a frenagem com a implementação da frenagem regenerativa (DOUGLAS et al., 2015), como ilustra a Figura 2.2.

A implementação bem-sucedida de uma medida de economia de energia depende de uma série de parâmetros inerentes ao modelo operacional que se deseja aprimorar. Por isso, identificar as características básicas do negócio ferroviário é um passo fundamental para verificar a aplicabilidade de cada iniciativa, ou mesmo seus ganhos potenciais, assim como nunca se deve negligenciar o custo de cada implementação para que o retorno almejado se torne viável, ou mesmo factível, dentro dos limites da companhia.

Figura 2.2 – Categorização das medidas de economia de energia consumidas durante o processo de condução do trem

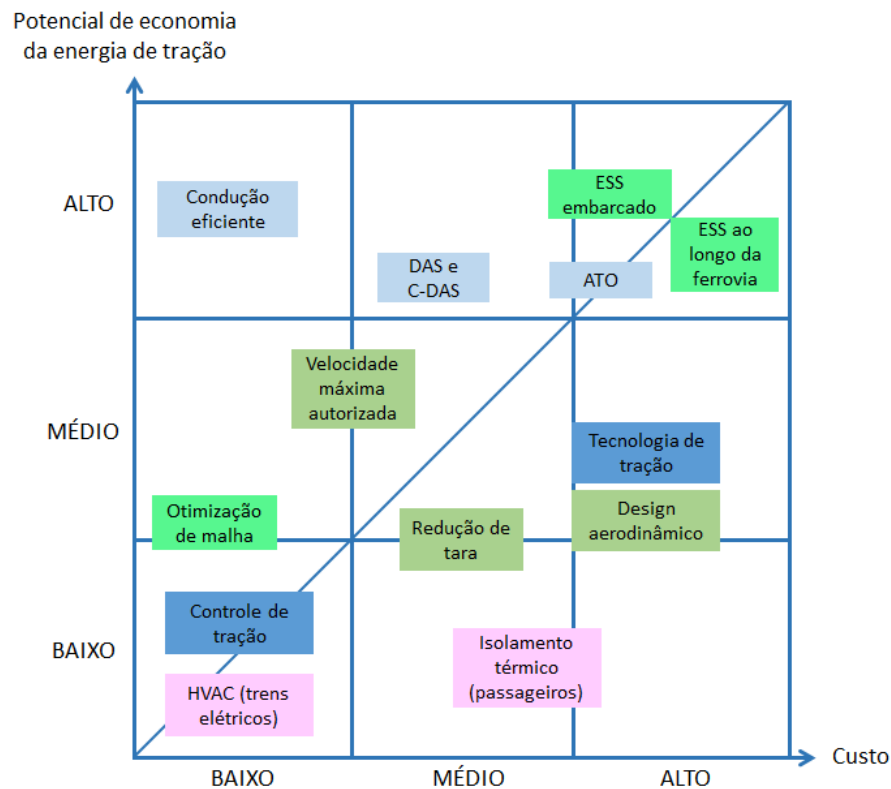


Fonte: Douglas e outros (2015).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Douglas e outros (2015) fornecem uma referência rápida quanto ao custo de implementação e ao potencial geral de economia de energia das principais medidas estudadas na atualidade, como ilustrado na Figura 2.3. As soluções mais adequadas para os sistemas existentes são aquelas à esquerda da linha diagonal, ou seja, a condução eficiente, os sistemas de condução assistida (DAS, do inglês *Driver Advisory Systems*), os sistemas de operação automática (ATO), a alteração dos limites de velocidade do trem, a otimização de horários, a otimização do controle do suprimento de energia dos sistemas auxiliares (aquecimento, ventilação e ar-condicionado - HVAC), o controle de tração dos motores e os sistemas de armazenamento de energia embarcados (ESSs, do inglês *Energy Storage Systems*). O design aerodinâmico dos veículos, a escolha dos motores (sistema de propulsão), o isolamento térmico (no caso de carros de passageiro), a redução de peso do material rodante e os grandes armazenadores de energia podem ser considerados durante as fases de projeto de uma nova ferrovia, o qual exigiria análise de viabilidade, análise de custos e avaliação do potencial de economia para todo o ciclo de vida do sistema.

Figura 2.3 – Comparação entre o custo e o potencial de economia de energia para cada medida passível de implementação



Fonte: Douglas e outros (2015).
Nota: Dados adaptados pelo autor.

Visto que o presente projeto tem como foco principal a eficiência na condução de trens, pode-se destacar três destas medidas que devem ser melhor exploradas, a saber, a condução eficiente, os sistemas de condução assistida e os sistemas de operação automática.

Normalmente, o ATO tem como objetivo melhorar a eficiência das operações de tráfego ferroviário, tomando decisões automaticamente dos comandos de aceleração, desaceleração e frenagem de trem. Com os problemas ambientais e energéticos cada vez mais sérios, o ATO também é amplamente reconhecido como uma abordagem promissora para reduzir o consumo de energia e as emissões de carbono e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade dos serviços. Atualmente, essa importante tecnologia tem sido amplamente aplicada a muitas novas linhas de transporte ferroviário urbano, como os metrô de Paris, Londres, Pequim e Tóquio, e tem mostrado grandes

vantagens na capacidade de transporte e na qualidade do serviço para os passageiros (maior pontualidade e parada mais precisa da estação de trem, etc.) (YIN et al., 2017).

O nível de controle e eficiência dos sistemas atuais é resultante de décadas de pesquisas ao redor do mundo, onde se pode destacar a *University of South Australia* como um dos polos de geração desse conhecimento, e o empenho do seu grupo de pesquisadores, denominado *Scheduling and Control Group (SCG)*, que vem atuando nesta área desde 1992. Neste caso, o problema clássico de controle de trem único é minimizar a energia necessária para dirigir um trem de uma estação para a próxima dentro de um determinado período é tratado como uma solução de controle contínuo (ALBRECHT et al., 2016a).

Howlett e Pudney (1995) mostraram que o movimento de um trem com massa distribuída pode ser reduzido ao movimento de um trem de massa pontual. Assumindo tal simplificação, diversos artigos foram publicados. Entre os principais contribuidores estão Howlett, Milroy e Pudney (1994), Howlett (1996), Howlett e Cheng (1997), Howlett e Leizarowitz (2001), Howlett, Pudney e Vu (2009) e Albrecht e outros (2013), que utilizaram a variável de posição como parâmetro independente. Já os trabalhos de Howlett (2000), Khmel'nitsky (2000) e Liu e Golovitcher (2003) empregaram também o tempo como variável independente e o uso de técnicas de controle discreto integradas às soluções de controle contínuo já conhecidas que, em termos gerais, buscavam solucionar o problema de conduzir um trem de um ponto inicial até um ponto final, considerando um traçado não nivelado, dentro de um certo tempo prescrito, de tal forma que o consumo de energia fosse minimizado.

Os trens com tração elétrica e diesel-elétricas podem usar os motores elétricos para tração ou frenagem, mas a energia gerada pela frenagem nem sempre é recuperada. Em trens diesel-elétricos, essa energia é geralmente dissipada na forma de calor em grandes bancos de resistores, sendo, neste caso, a eficiência de regeneração nula. Em trens de tração puramente elétrica, a energia de frenagem pode ser injetada de volta para a fonte de alimentação, caso existam outras cargas que possam aproveitá-la (como em sistemas de catenária), ou pode ser armazenada para posterior utilização, em bancos de baterias, por exemplo. Neste caso, o nível de eficiência na tração não faz uma diferença tão significativa para a estratégia de condução quanto o benefício da recuperação energética, comprovados nos trabalhos de Gong e outros

(2014) e Li e Lo (2014) que, por meio da programação integrada, mostraram economias de energia significativas (ALBRECHT et al., 2016b; SCHEEPMAKER; GOVERDE; KROON, 2017).

O principal problema encontrado, ao se restringir os modelos de otimização utilizando trens de massa pontual, é que o efeito da dissipação de energia causada pelas forças do trem, principalmente em trens longos, não é considerado e impacta diretamente na eficácia de determinadas estratégias de condução (ALBRECHT et al., 2016a).

O modelo de trem de massa pontual pode alcançar bons resultados no desenvolvimento de métodos de ATO em sistemas ferroviários urbanos, onde as resistências ao movimento são muito menores do que as forças de tração e de frenagem das locomotivas ou carros de passageiros (SU et al., 2013). No entanto, este modelo simplificado é geralmente inviável para trens pesados (*Heavy Haul*), os quais apresentam comprimentos muito longos, em virtude do grande número de vagões e locomotivas em sua formação, não sendo factível usar um único ponto para representar as posições e as velocidades dos veículos envolvidos (YIN et al., 2017).

Como solução à incompatibilidade apresentada pelos modelos anteriores aos trens longos e de alta carga por eixo, foram desenvolvidos os modelos de trem multiponto, propostos em Zhuan e Xia (2008) e Faieghi, Jalali e Mashhadi (2014), que consideram estes esforços e a diferente posição e velocidade de cada veículo, ao utilizarem os conceitos de dinâmica veicular longitudinal. Porém, ainda existem algumas dificuldades técnicas na implementação destes sistemas automáticos para trens longos e de alta carga por eixo, no que diz respeito à segurança da operação e na eficiência de seus algoritmos quando testados em trens reais devido a perturbações e ruído nas medições, na não linearidade da dinâmica do movimento do trem, nas imprecisões durante a pesagem dos vagões e na regulagem das locomotivas (WANG; HOU; LI, 2008), o que pode elevar consideravelmente os custos de implementação, confirmando a representação gráfica da Figura 2.3 anteriormente apresentada.

Por outro lado, os sistemas de condução assistida (DAS) são ferramentas embarcadas (na cabine das locomotivas) que podem fornecer ao maquinista as informações necessárias para a realização de conduções otimizadas, pois são sistemas que calculam a melhor operação baseada em um banco de dados de tempos

de viagem, procedimentos operacionais estabelecidos e características do perfil da estrada e do trem, os quais são atualizadas de acordo com a velocidade e a posição do trem na via. Embora sejam eficazes em cenários operacionais normais, os sistemas estáticos não podem ser atualizados com informações sobre atrasos não programados, restrições temporárias de velocidade e outros comportamentos inesperados do trem, ocasionando, em muitos casos, baixo desempenho do sistema em termos de condução eficiente ou até a inviabilidade do cumprimento das ações propostas ao maquinista (DOUGLAS et al., 2015).

Diversos trabalhos foram também desenvolvidos a respeito da eficiência na condução manual de trens. Basicamente, existem três atividades diferentes pelas quais um trem pode ser conduzido: 1) aplicação da tração motora, 2) desaceleração ou aproveitamento da inércia do trem (sem esforço de tração) e 3) frenagem. Porém, a complexidade do perfil da via e o comprimento do trem podem tornar a condução um grande desafio, o qual necessita de técnicas específicas para obter uma condução eficiente (SICRE et al., 2010).

Uma abordagem diferente para encontrar a melhor condução é realizando treinamento com os maquinistas, como ocorrido no projeto “A toda vela”, onde um grupo de condutores da empresa Renfe AVE (Alta Velocidade Espanhola) participou de um concurso que consistia em consumir a menor quantidade de energia ao longo do trecho Madrid-Sevilha sem afetar o compromisso com a pontualidade. Os resultados mostraram economias alcançáveis de até 9,5% (SICRE et al., 2010).

Outras tentativas foram concentradas na redução da frenagem desnecessária, que consiste em evitar o uso do freio durante as seções da via com rampa decrescente, cuja inclinação levaria o trem a velocidades acima do permitido. Para atingir esse objetivo, o trem deve iniciar sua desaceleração (redução do esforço trator) antes mesmo de iniciar o trecho com grande declividade. Assim, é possível recuperar toda a velocidade perdida inicialmente apenas com a utilização da declividade e do menor uso do sistema de freios, gerando economia de energia durante a etapa de aceleração (tração motora) e ainda minimizando o desgaste dos componentes de freio (SICRE et al., 2010; ANDRADE; SANTANA, 2017).

Embora, na prática, minimizar o trabalho mecânico realizado pelas composições ferroviárias resulte em reduções significativas no uso real de combustível ou energia, esta não é uma relação direta ou linearmente proporcional, porque a eficiência das locomotivas varia de acordo com a velocidade e o esforço de tração. Em alguns trens, com a utilização de tração distribuída, é possível operar com diferentes níveis de potência em cada bloco trator presente no trem. Por exemplo, testes com trens longos na Austrália mostraram ser mais eficiente, durante períodos prolongados de tração (aplicação de força motora), desligar uma das três locomotivas remotas e operar com as outras duas na potência máxima, ao invés de tracionar as três locomotivas simultaneamente a dois terços da máxima potência (ALBRECHT et al., 2016a).

2.3 FORMAÇÃO DE COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS

Uma composição ferroviária é definida como um conjunto de veículos ferroviários acoplados entre si de forma a ocupar um determinado trecho de linha férrea. Devido à infinidade de possibilidades de se formar uma composição, e da grande interferência que esta decisão causa em todo o projeto ou operação de uma ferrovia, cada operadora ou concessionária realiza diversas simulações e estudos de viabilidade técnica em busca das formações mais rentáveis e vantajosas para suas operações (MURGEL; GUALDA, 1999).

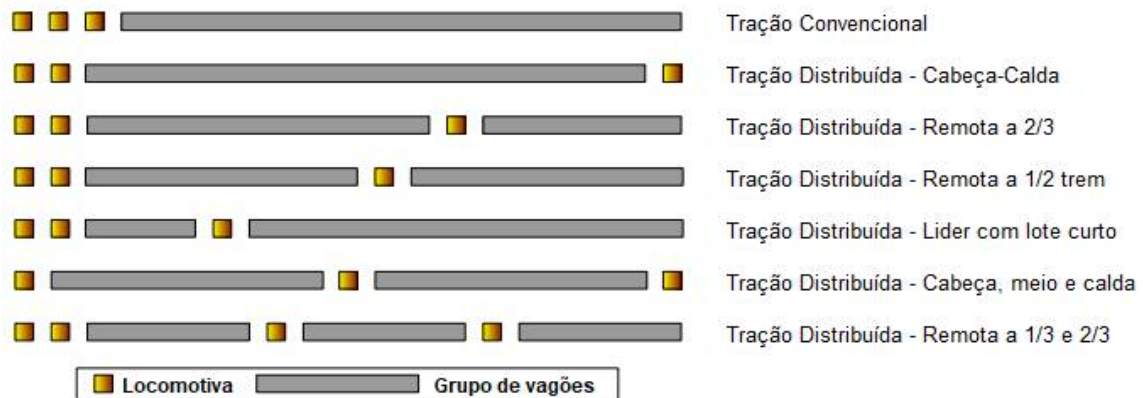
A formação ou configuração de uma composição pode ser influenciada por diversos fatores, como o perfil da linha, a capacidade de tração das locomotivas utilizadas, o tipo de vagão selecionado, a necessidade de transporte do operador, o tempo máximo de ciclo planejado para os ativos existentes, a forma de carregamento e descarga do produto, o tipo de sinalização e o tamanho dos pátios de cruzamento e de manobras existentes, entre outros fatores relevantes que devem ser levados em consideração em cada caso analisado (CAMPOS; CRUZ; POMPERMAYER, 2010; COLE et al., 2013).

Para o transporte de cargas a granel, mais especificamente no transporte de minério de ferro da Vale S.A., a composição é formada apenas por locomotivas diesel-elétricas e por vagões do tipo gôndola, onde as locomotivas são as únicas unidades tratoras (que exercem força de tração para deslocamento da composição), e todos os vagões

são utilizados para o transporte do produto. Em se tratando de grandes volumes de produção, como já mencionado anteriormente, a Vale S.A. estabeleceu, apenas a utilização de trens longos, que, de acordo com Leite e outros. (2011), são composições com mais de 100 vagões em sua formação (PALHANO et al., 2014).

Levando em consideração a utilização destes trens, existem algumas formações mais recorrentes e muito empregadas em todo o mundo por sua flexibilidade e desempenho operacional (Figura 2.4). Porém, o número de locomotivas e de vagões em cada posição pode variar de acordo com a potência disponível para tração e o peso total da carga a ser transportada (SPIRYAGIN et al., 2014).

Figura 2.4 – Formações mais utilizadas para trens longos



Fonte: Spiriyagin e outros (2014, p. 161).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Locomotivas muito potentes e composições com milhares de toneladas podem apresentar esforços enormes, os quais precisam ser adequadamente controlados. Foi por meio dessa necessidade que a tecnologia de tração distribuída foi amplamente empregada na operação de trens longos, de forma viabilizá-la. É uma solução interessante para aplicação em malhas de tráfego saturadas, pois permite a drástica redução do número de trens em circulação. Essa tecnologia é composta de uma locomotiva líder (comandante) que controla todas as outras locomotivas (remotas), alocadas ao longo da composição, através de uma comunicação bidirecional utilizando *link* de rádio e o próprio encanamento geral do trem, sem a necessidade da presença de maquinistas nas locomotivas remotas ou nas locomotivas escravas (comandadas) (PEREIRA, 2009; PALHANO et al., 2014).

Segundo Spiryagin (2014), a distribuição de locomotivas minimiza a intensidade dos esforços gerados ao longo das composições, principalmente em terrenos com curvas acentuadas ou grandes variações de relevo. Outro ponto relevante apresentado por Pereira (2009) e Barbosa (2009), é a possibilidade de redução de 6% no consumo de combustível de composições que implementaram a distribuição de potência em comparação com sua operação em tração convencional.

2.4 DINÂMICA FERROVIÁRIA

O deslocamento de uma composição ferroviária de sua origem ao seu destino final requer diversas operações, realizadas pelas unidades tratoras por meio de comandos executados na locomotiva líder (primeiro veículo), que incluem aceleração, aplicação de freios, alívio dos freios, controle de folgas, cumprimento do licenciamento da ferrovia e procedimentos de parada sob diferentes condições climáticas e perfis geométricos de via-permanente. Essas operações resultam em interações dinâmicas e forças entre os veículos da composição, que têm papel fundamental na segurança operacional, na eficiência do transporte e na estabilidade do trem (GARG; DUKKIPATI, 1984). Assim, os resultados de uma boa operação dependem do funcionamento ótimo desse complexo sistema de transporte, tornando a modelagem da dinâmica de composições ferroviárias essencial para avaliar os requisitos de segurança, o consumo de combustível, o ciclo de trabalho e a durabilidade dos componentes utilizados (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

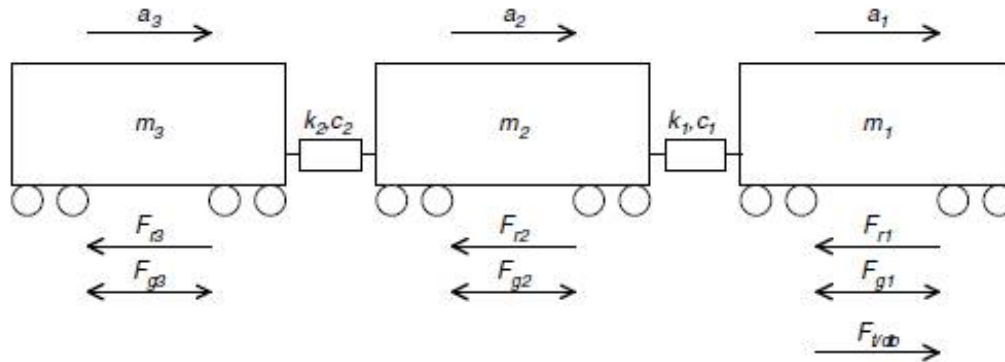
O estudo do comportamento dinâmico em composições ferroviárias pode ser dividido em três grandes áreas: dinâmica longitudinal, dinâmica lateral e dinâmica vertical. Embora a combinação desses três modelos seja possível, a complexidade envolvida na elaboração e análise dos resultados é muito alta, e, portanto, cada segmento da dinâmica é modelado separadamente de forma simplificada, permitindo que o modelo matemático forneça respostas adequadas sobre o fenômeno a ser investigado (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

Os modelos matemáticos desenvolvidos para o estudo da dinâmica lateral têm como objetivo prever a estabilidade da composição durante sua operação na linha. Para isso, são modeladas as relações de contato entre rodeiro e via permanente (contato

roda-trilho), forças centrípetas nos vagões ao longo da composição e as forças resultantes de superelevação da via-permanente em conjunto com a componente lateral das forças de acoplamento nos aparelhos de choque e tração. Por sua vez, os modelos para o estudo da dinâmica vertical têm a função de prever a estabilidade no plano vertical, onde os principais focos de investigação são nas circunstâncias em que ocorrem os desacoplamentos involuntários entre vagões, a separação entre a caixa e os truques ou mesmo os alívios verticais nas forças de contato roda-trilho que ocasionariam descarrilamentos de veículos da composição (GARG; DUKKIPATI, 1984). Por fim, a dinâmica longitudinal pode ser definida como o estudo dos movimentos e esforços dos veículos ferroviários na mesma direção da via-permanente. Os modelos consideram todos os movimentos do trem nesta direção, juntamente com qualquer movimento relativo entre os veículos da composição, sejam estes causados por folgas ou deslocamento de suas conexões. Todas estas interações estão ligadas diretamente à energia consumida pelos trens durante as acelerações e às dissipações de energia nos períodos de frenagem, o que torna esta área de estudo a mais significativa quando se trata da gestão energética de composições ferroviárias (COLE, 2006).

Segundo o mesmo autor, o comportamento dinâmico longitudinal de uma composição pode ser descrito por um sistema de equações diferenciais. Para efeito de construção dessas equações diferenciais e para simplificação da modelagem e simulação dos fenômenos físicos, assume-se que não há movimentação vertical ou lateral dos vagões. Essa simplificação do sistema é empregada em todos os pacotes comerciais de *softwares* conhecidos (COLE, 2006). Para a representação deste sistema, pode-se partir de um sistema de três massas concentradas, como ilustra a Figura 2.5, onde o primeiro veículo seria a unidade tratora, que, para o presente estudo, será uma locomotiva. A composição de forças deste sistema é formada pela Força de Resistência ao Movimento, ou Força de Retardamento (F_r), presente em todos os veículos, pela Força Gravitacional, que pode agir tanto a favor ou contra o movimento, dependendo da posição em que o veículo se encontra na via (F_g). Adicionalmente a este sistema, tem-se a Força de Tração ou Força de Frenagem Dinâmica existente na locomotiva ($F_{v/db}$).

Figura 2.5 – Modelo simplificado de uma composição com três veículos de massa concentrada



Fonte: Cole (2006, p. 242).

No sistema apresentado na Figura 2.5, pode-se ainda notar a presença dos vetores a_1 , a_2 e a_3 , que representam as acelerações, medidas em m/s^2 , a massa m_1 , m_2 e m_3 de cada veículo, em kg, os coeficientes de elasticidade k_1 , k_2 e k_3 dos aparelhos de choque e tração, medidos em N/m e os coeficientes de carregamento c_1 , c_2 e c_3 dos aparelhos de choque e tração, em N·s/m, considerando todas as forças em Newton (N) representadas pelas forças de retardamento F_{r1} , F_{r2} e F_{r3} , pela força gravitacional incidida sobre cada veículo F_{g1} , F_{g2} e F_{g3} e pela força de tração $F_{v/db}$.

Segundo Cole (2006), as três massas representadas permitem o desenvolvimento de três equações diferenciais, incluindo as variáveis v (velocidade), medida em m/s, e x (deslocamento), medida em metros, a saber, equações (3) a (5).

$$m_1 \cdot a_1 + c_1 \cdot (v_1 - v_2) + k_1 \cdot (x_1 - x_2) = F_{t/db} - F_{r1} - F_{g1} \quad (3)$$

$$m_2 \cdot a_2 + c_1 \cdot (v_2 - v_1) + c_2 \cdot (v_2 - v_3) + k_1 \cdot (x_2 - x_1) + k_2 \cdot (x_2 - x_3) = F_{t/db} - F_{r2} - F_{g2} \quad (4)$$

$$m_3 \cdot a_3 + c_2 \cdot (v_3 - v_2) + k_2 \cdot (x_3 - x_2) = F_{t/db} - F_{r3} - F_{g3} \quad (5)$$

Todos os índices descritos, de 1 a 3, referem-se ao número do veículo da composição ilustrada na Figura 2.5.

Para que locomotivas sejam colocadas em qualquer posição do trem, e para estender a notação de equação para a utilização em um trem com qualquer número de veículos, um conjunto mais geral de equações pode ser escrito, como em (6) e (7).

Para um veículo trator em uma posição intermediária (representado pelo índice i), tem-se:

$$m_i \cdot a_i + c_{i-1} \cdot (v_i - v_{i-1}) + c_i \cdot (v_i - v_{i+1}) + k_{i-1} \cdot (x_i - x_{i-1}) + k_i \cdot (x_i - x_{i+1}) = F_{t/dbi} - F_{ri} - F_{gi} . \quad (6)$$

Já no caso do *n*ésimo veículo, ou veículo da calda (*n*), a equação (7) representa o comportamento deste tipo de vagão.

$$m_n \cdot a_n + c_{n-1} \cdot (v_n - v_{n-1}) + k_{n-1} \cdot (x_n - x_{n-1}) = F_{t/dbn} - F_{rn} - F_{gn} \quad (7)$$

Ao incluir o $F_{t/db}$ em cada equação, ou seja, na modelagem de todos os veículos, as equações podem ser aplicadas a qualquer colocação de locomotivas ou sistema de potência distribuída. Por outro lado, para veículos não motorizados, $F_{t/db}$ é definido igual a zero.

As forças de resistência ao movimento (F_m) são compostas pela soma de todas as forças atuantes nos veículos que agem de forma contrária ao sentido de movimentação do trem, podendo ser descrita segundo (8).

$$F_m = F_{prn} + F_{crn} + F_{bn} \quad (8)$$

onde *n* é o índice que se refere ao *n*ésimo veículo de uma composição, F_{prn} é a força de resistência à propulsão, também conhecida por resistência ao rolamento, F_{crn} é a força de resistência de curva e F_{bn} é a força de frenagem proveniente do sistema de freios pneumáticos (COLE, 2006).

Para melhor entendimento da composição de forças atuantes no modelo simplificado de dinâmica longitudinal, torna-se necessária a descrição de cada uma das componentes da equação (8) e as formulações correspondentes.

2.4.1 Força de resistência à propulsão (F_{prn})

A força de resistência à propulsão, como o próprio nome descreve, é a força que atua sempre oposta à movimentação dos veículos, sendo composta pelo arrasto aerodinâmico e também pelo atrito de rolamento presente em cada um dos rodimentos do trem. É geralmente calculada por equações empíricas, como a mundialmente conhecida Equação de Davis, descrita em (9) (OZHIGIN et al., 2016; VU, 2006).

$$F_{prn}=A+B \cdot v_n+C \cdot v_n^2 \quad (9)$$

onde, v_n é a velocidade de deslocamento do n ésimo veículo, em m/s, A é o coeficiente correspondente ao atrito estático, B é o coeficiente de atrito cinético e C é o coeficiente de arrasto aerodinâmico.

Segundo Hay (1982), essa expressão de resistência à propulsão foi desenvolvida em 1910 pelo pesquisador norte-americano Schmidt. No entanto, a expressão original necessitava de diferentes parâmetros para veículos com pesos distintos. Mais tarde, em 1926, o pesquisador William John Davis publicou uma nova expressão que, posteriormente, ganhou o nome de Equação de Davis (9).

A Equação de Davis também foi aprimorada ao longo do tempo até o surgimento da Equação de Davis Modificada, em 1960, que depois evoluiu para a Equação de Davis Ajustada (10), em 1964, como foi documentado por Hay (1982).

$$F_{prn}=1,3+\frac{29}{m_{an}}+B \cdot v_n+\frac{C \cdot S_{fn} \cdot v_n^2}{m_{an} \cdot n_a} \quad (10)$$

Pode-se observar que, neste novo detalhamento, foram adicionadas as variáveis m_{an} , n_a e S_{fn} , que correspondem à carga por eixo, medida em toneladas, ao número de eixos e à área da seção frontal do veículo n , medida em pés², respectivamente.

Obviamente, as Equações de Davis não se aplicam universalmente a todos os veículos. Muitas pesquisas foram conduzidas a esse respeito e novas fórmulas de propulsão, desenvolvidas. Mesmo com um certo número de fatores contemplados nessas fórmulas, os efeitos existentes na prática são diversos e, muitas vezes, inviáveis de serem modelados ou representados por meio de equações. Como podem ser consideradas as diferentes áreas frontais e laterais de cada veículo ferroviário? Como o vento de proa, o vento cruzado e o vento de cauda podem influenciar o resultado? Como as forças de arrasto são avaliadas quando há um desalinhamento dos truques? Por outro lado, para o cálculo de resistência do ar, o design da carroceria do veículo ferroviário é mais variável do que o sugerido pelos poucos fatores de ajuste apresentados (WU; SPIRYAGIN; COLE, 2016).

Os pesquisadores devem, portanto, ter consciência de que é provável uma diferença entre os cálculos e as medições de campo devido às inúmeras simplificações necessárias. Da mesma forma, no que diz respeito à direção e ao arrasto do truque, as equações não incluem o atrito do cubo central ou as informações do perfil do trilho e da roda (WU; SPIRYAGIN; COLE, 2016).

Para cada estudo, os valores escolhidos são derivados das características de formação do trem estudado. Entretanto, a precisão do modelo depende do objetivo a ser alcançado, pois podem ser levadas em conta todas as características aerodinâmicas de deslocamento da composição, que incluem as influências da velocidade do vento e dos túneis, além das condições meteorológicas, como precipitação (OZHIGIN et al., 2016).

2.4.2 Força de resistência ao rolamento em curvas (F_{crn})

Os cálculos de resistência de curva são semelhantes aos cálculos de resistência de propulsão, no que se refere à utilização de fórmulas empíricas, e são influenciados por uma série de fatores, que incluem os dados de projeto e as condições de conservação dos rodéis, do perfil dos boletos, da lubrificação dos trilhos ou ausência da mesma, além do próprio raio de curvatura. Sabendo que existe uma diversidade muito grande no material rodante em operação e seus níveis de desgaste e conservação, a fórmula de cálculo da resistência ao rolamento em curvas é comumente apresentada em função apenas do valor do raio de curvatura, como mostrado em (11), simplificando significativamente a complexidade matemática na sua utilização.

$$F_{crn} = \frac{6116}{R} \cdot m_n \quad (11)$$

onde a força de resistência ao rolamento em curvas F_{crn} é medida em Newton, R é o raio da curva, em metros, e m_n é a massa do veículo n , em toneladas.

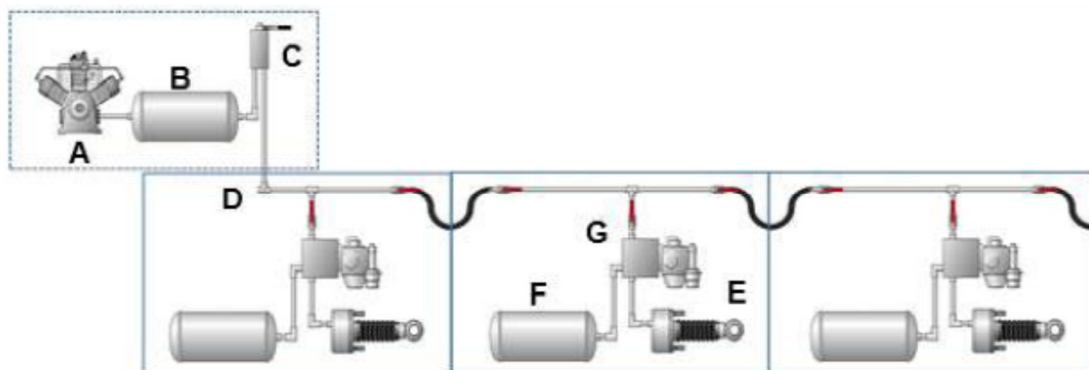
Acredita-se que a lubrificação de trilhos por flange seja capaz de reduzir a resistência à curvatura em 50%. No entanto, quando se considera a resistência de curvatura da via sobre um vagão estacionário, o valor pode chegar a 200% do valor dado por (11),

o que reforça a existência do efeito corda sobre composições que iniciam sua movimentação em regiões de curva (COLE, 2006).

2.4.3 Força de frenagem (F_{bn})

Numa abordagem simplista, o sistema de freios pode ser explicado como uma linha de transmissão pneumática através de um arranjo de tubulações e câmaras, ou seja, um conjunto de componentes pneumáticos, que garantem a força de parada ou de desaceleração necessária para todos os vagões ferroviários de um comboio. A Figura 2.6 mostra os principais componentes do sistema, a saber, (A) o compressor, (B) os reservatórios, (C) o manipulador de freio, (D) o encanamento geral, (E) os cilindros do freio, (F) os reservatórios combinados dos vagões e (G) as válvulas de controle. Funciona de forma que o compressor alimenta o reservatório principal com ar comprimido, que fornece o ar necessário para o resto de todo o sistema. O manipulador de freio é responsável por controlar a pressão interna no encanamento geral, que distribui o ar pressurizado para todos os componentes do sistema e é conectado aos componentes pneumáticos de todos os vagões (RIBEIRO, 2017).

Figura 2.6 – Esquemático do sistema de freio pneumático de composições ferroviárias



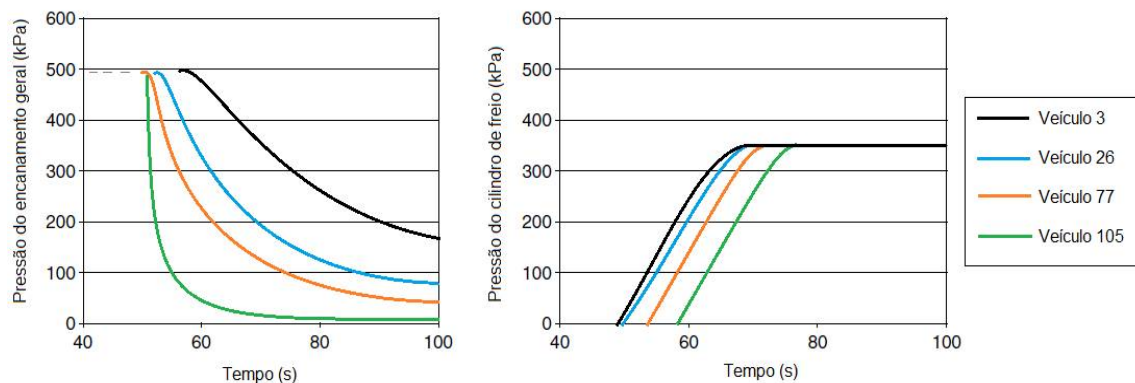
Fonte: Ribeiro (2017).

Para que ocorra uma aplicação de freios, o maquinista faz a movimentação do manipulador de freio automático (MFA), responsável por ligar o encanamento geral à atmosfera, ocasionando a redução de sua pressão. Essa queda da pressão é propagada ao longo do encanamento e sensibiliza as válvulas de controle localizadas em cada vagão, o que permite que o reservatório auxiliar forneça uma quantidade de ar controlada ao cilindro de freio, que, por sua vez, desloca seu pistão para fora da

câmara por intermédio da força aplicada pelo ar comprimido. Ao se mover, o pistão do cilindro de freio aciona um mecanismo de alavancas, chamado timoneria de freio, que realiza a compressão das sapatas contra a bandagem da roda, freando o vagão e, conseqüentemente, toda a composição (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

Fatores bastante relevantes durante as aplicações pneumáticas de freio são o comprimento total do trem e as distâncias dos vagões até a(s) locomotiva(s), onde a liberação de ar do encanamento geral se inicia. Devido à geração de uma onda de pressão que se propaga pelo encanamento, tendo como origem a posição de cada locomotiva, a sensibilização das válvulas e a movimentação dos cilindros de freio de cada vagão ocorre em instantes diferentes, onde os vagões mais próximos das locomotivas tendem a frear mais rapidamente se comparados aos vagões mais distantes, como ilustra a Figura 2.7 (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

Figura 2.7 – Pressões do encanamento geral e do cilindro de freio de diferentes vagões em uma aplicação de emergência



Fonte: Cole (2006).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

A força de frenagem exercida em cada roda depende das características do sistema de freio, da redução de pressão no encanamento geral e da duração da aplicação dos freios. Numa frenagem de emergência, por exemplo, ocorre grande redução da pressão no encanamento geral, produzindo altas pressões no cilindro de freio, o que resulta em forças de frenagem bastante elevadas. A modelagem do sistema de freio requer uma simulação de um sistema dinâmico de fluidos que deve funcionar em paralelo com a simulação do trem. A saída da simulação matemática do encanamento geral tem como resultado a força aplicada por cada cilindro de freio da composição, que é convertida por meio do coeficiente de fricção da sapata e da eficiência das

timonarias de freio em uma força de retardamento, conhecida como força de frenagem (F_{bn}) (COLE, 2006; OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

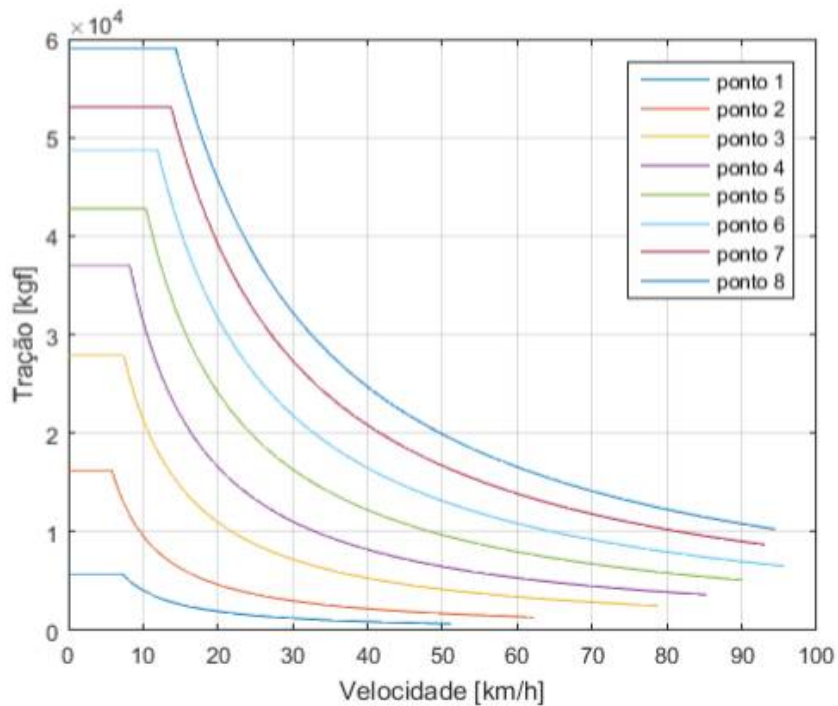
2.4.4 Força de propulsão e força de frenagem dinâmica

Durante o desenvolvimento dos modelos dinâmicos ferroviários, é comum tratar o esforço de tração e a frenagem dinâmica no mesmo modelo matemático, pois ambos introduzem forças ao trem através das conexões locomotiva - vagão.

A complexidade do modelo requerido dependerá dos aspectos específicos da performance de cada locomotiva e estes são importantes fatores a ser analisados diante da complexidade dos sistemas de controle instalados dentro das locomotivas.

O controle de tração manual, conhecido como manipulador de aceleração, que normalmente em locomotivas diesel-elétricas têm oito entalhes ou níveis de ajuste de aceleração (Figura 2.8), são bem diferentes do existente em locomotivas de sistemas eletrificados. Na Austrália, por exemplo, há locomotivas elétricas em serviço com 31 entalhes ou 32 níveis de ajuste, destacando a importância de se conhecer o equipamento a ser estudado no momento da aplicação dos modelos que os representam.

Figura 2.8 – Curvas de esforço de tração de uma locomotiva GE – BB40-9W (Dash 9W) em função da velocidade



Fonte: Oliveira Junior (2017).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

O sistema de tração embarcado possui algumas características dependentes do regime de operação, cujo funcionamento é limitado por valores de corrente (de alimentação dos motores) durante deslocamentos em baixas velocidades. Neste caso, o esforço de tração é aplicado proporcionalmente aos níveis de entalhe do acelerador, ou ainda ser limitado pelos valores de potência disponível quando operado em velocidades mais altas. Assim, o esforço de tração aplicado diminui em consequência ao aumento da velocidade, como descrito em (12) (COLE, 2006).

$$P_n = F_{t/dbn} \cdot v_n \quad (12)$$

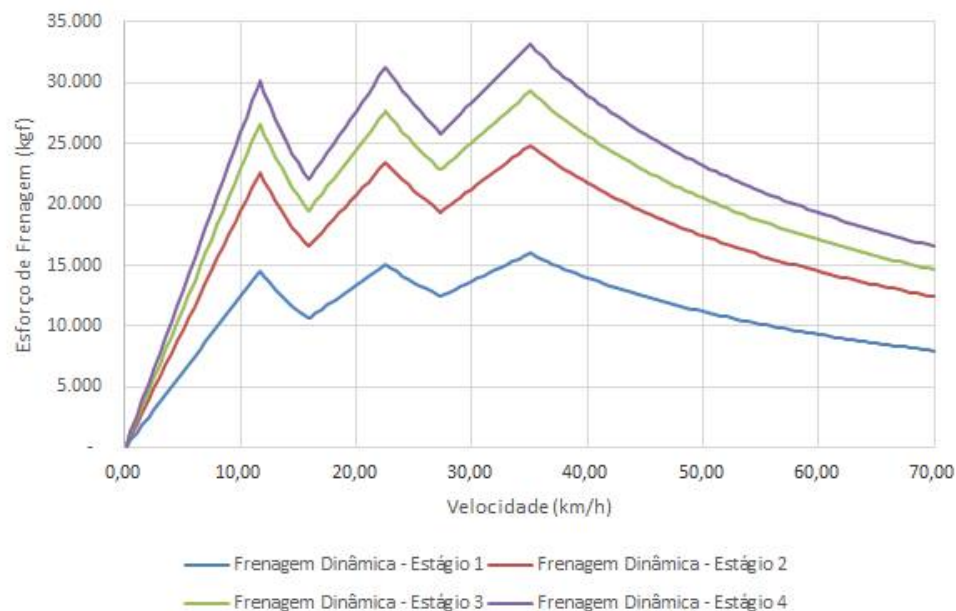
Sabendo que P_n é a potência aplicada no enésimo veículo trator, em Watts, $F_{t/dbn}$ é a força de tração, em quilograma-força (kgf), e v_n é a velocidade, em m/s.

Embora a função principal da locomotiva seja fornecer esforços de propulsão à composição, os motores de tração também podem ser utilizados para reduzir a velocidade do trem por meio da frenagem dinâmica, onde a corrente elétrica retificada é dissipada na forma de calor em um banco de resistores de potência, originando a

força contra eletromotriz, ou força de frenagem, nos eixos de cada um dos motores (GARG; DUKKIPATI, 1984).

O desempenho do freio dinâmico é restringido pela corrente e tensão do comutador quando utilizado em altas velocidades. Entretanto, sua eficiência pode ser consideravelmente reduzida em baixas velocidades, tendo sua atuação anulada quando atingido o limite mínimo de corrente do campo do motor. Projetos mais recentes conseguiram a aplicação da máxima força de frenagem dinâmica em operações próximas à 10 km/h. A frenagem dinâmica é geralmente controlada em nível contínuo, ao contrário da modulação discreta provocada pela existência dos entalhes do acelerador, mas a maneira em que o nível de controle afeta o esforço de frenagem difere para cada modelo de locomotiva. Assim, o Gráfico 2.1 ilustra algumas curvas de esforço de frenagem típicas de locomotivas diesel-elétricas (COLE, 2006).

Gráfico 2.1 – Curvas de esforço durante a frenagem dinâmica em locomotivas diesel-elétricas



Fonte: Parreira (2014).

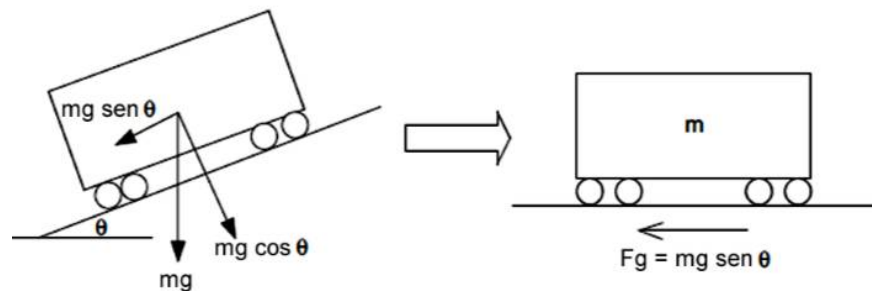
Nota: Dados adaptados pelo autor.

2.4.5 Componentes da força gravitacional (F_{gn})

Componentes de força devido à ação gravitacional são implementadas nos modelos de dinâmica longitudinal por meio da decomposição do vetor de força peso nas

direções vertical e longitudinal à base do vagão. A componente longitudinal ao veículo torna-se a força (F_{gn}), que será adicionada ou subtraída, dependendo do grau de inclinação da rampa, ao conjunto de forças longitudinais aplicadas na composição ferroviária, como ilustra a Figura 2.9 (GKORTZAS, 2013).

Figura 2.9 – Decomposição de forças devido a inclinação da via permanente



Fonte: Cole (2006, p. 260).

A presença de inclinação na via reduz a intensidade do vetor da reação normal do veículo na via-permanente, tendo implicações diretas na resistência à propulsão, que é variável dependente da massa de cada unidade da composição. Porém, a influência desse fenômeno é pequena, podendo ser desprezada no cálculo desse parâmetro. Deste modo, por meio de levantamentos topográficos ou com a utilização de sensoriamento móvel (carro controle ferroviário), é possível obter as inclinações da via permanente e, por conseguinte, as forças relacionadas à inclinação da mesma devem ser calculadas para cada veículo da composição e atualizadas a cada instante de tempo da simulação para conseguir prever o deslocamento do trem ao longo dos trilhos (OLIVEIRA JUNIOR, 2017).

2.5 CONSUMO ENERGÉTICO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

O modo como o consumo de energia é calculado nos estudos de movimentação de trens varia muito com a abordagem e a precisão das equações utilizadas, como discutido anteriormente. Depois de avaliar a aplicabilidade das modelagens de cada referência, o cálculo mais adequado para este caso foi por meio do consumo de energia com base nas resistências de condução. Esta abordagem é apresentada em estudos conduzidos por Lindgreen e Sorenson (2005) e Cole (2006), sendo, posteriormente, também utilizada por Gkortzas (2013). Os modelos propostos para o

cálculo do consumo de energia foram estudados em detalhes e formaram a base de elaboração do modelo utilizado neste projeto de pesquisa. Baseiam-se no fato de que a energia mínima necessária para a realização de uma viagem de trem é a energia consumida para superar todas as resistências durante a sua movimentação. Após o detalhamento de todas as forças atuantes em uma composição ferroviária, apresentado anteriormente, é possível entender por completo o conjunto de variáveis que influencia diretamente o cálculo energético. Cabe ressaltar que o equacionamento a seguir foi baseado nos estudos dos três autores previamente citados e fundamentarão a presente pesquisa.

O objetivo principal do cálculo energético para transposição de um determinado trajeto ferroviário é levantar uma linha de base energética para tornar possível a comparação entre diferentes conduções ou modos de operação de um mesmo trem tipo, viabilizando inclusive a detecção de locais de desperdício energético, ranqueamento da eficiência dos diferentes modos ou oportunidades de melhoria operacional.

2.5.1 Cálculo da energia mínima

O custo de energia baseado na distância percorrida poder ser calculado por meio da equação (13), onde E_{min} é medida em Joules, F_{res} é a força resultante de todas as resistências ao deslocamento da composição mencionadas anteriormente, em Newtons, e L é o comprimento da via trafegada, em metros.

$$E_{min} = \int_0^{x=L} F_{res} dx \quad (13)$$

A energia mínima necessária para uma viagem pode ser estimada assumindo uma velocidade média do trem durante o percurso analisado e realizando o cálculo da soma das resistências ao movimento, não esquecendo os potenciais efeitos energéticos das mudanças de altitude, podendo ser estimada pela equação (14), que foi obtida a partir de (13). Qualquer energia adicional consumida será devido a condições de sinalização, frenagem, paradas e arrancadas ou mudanças na geometria da via.

$$E_{min} = \frac{1}{2} m_t v^2 + m_t g h + \sum_{i=1}^q \left(m_i \sum_{j=1}^r \left[\int_0^{x=l_{cj}} F_{crj} dx \right] \right) + \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_0^{x=L} F_{pri} dx \right) \quad (14)$$

onde:

E_{min} é a energia mínima para transpor um determinado percurso, em J;

m_t é a massa total do trem, em kg;

v é a velocidade média performada pelo trem durante o percurso, em m/s;

g é a aceleração da gravidade, em m/s²;

h é a diferença relativa de altitude do percurso, em m;

m_i é a massa total do veículo i , em kg;

F_{crj} é a força de resistência da curva j , em N;

F_{pri} é a força de resistência à propulsão do veículo i , em N;

q é o número de veículos do trem;

r é o número de curvas do percurso;

l_{cj} é o comprimento da curva j , em m;

L é o comprimento total do percurso analisado, em m.

A equação (14), apresentada por Cole (2006), propõe uma simplificação no cálculo da energia gravitacional, ao considerar apenas a massa total do trem e a altura relativa, pois a diferença de altitude entre a posição da locomotiva líder e do último vagão é desprezada. Entretanto, ao se analisar o gasto energético de trens longos em terrenos acidentados, é necessário um cálculo mais detalhado para que se possa determinar os pontos exatos em que ocorrem desperdícios de energia. Assim, a equação (14) pode ser reescrita, como mostrado em (15).

$$E_{min} = \frac{1}{2} m_t v^2 + \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_{h_0}^{x=h_f} g dx \right) + \sum_{i=1}^q \left(m_i \sum_{j=1}^r \left[\int_0^{x=l_{cj}} F_{crj} dx \right] \right) + \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_0^{x=L} F_{pri} dx \right) \quad (15)$$

onde:

h_f é a altitude final atingida pelo vagão i no trecho analisado, em metros;

h_0 é a altitude inicial do vagão i no trecho analisado, em metros.

2.5.2 Cálculo da energia consumida em um trem real

O consumo de energia pode ser obtido de diversas formas. Considerando o embasamento teórico anteriormente descrito, é possível calcular este consumo por meio da integração da força de propulsão total utilizada no percurso ao longo de toda a distância percorrida, como descrito na equação (16), onde E_{con} é a energia total consumida no percurso, em J; F_{total} é a força total utilizada para tração do trem, em N; x_1 é a posição inicial do trem, em m; e x_2 é a posição final do trem, em m.

$$E_{con} = \int_{x_1}^{x_2} F_{total} dx \quad (16)$$

Devido à dificuldade no levantamento de dados ferroviários atrelados à posição real dos trens ao longo da via férrea, é possível utilizar outro equacionamento dependente apenas da variável temporal, em substituição à variável de deslocamento. Assim, sabendo-se que a potência (P_e) é função da força total utilizada para a tração do trem e da sua velocidade, como definido em (17),

$$P_e = v \cdot F_{total}, \quad (17)$$

e que,

$$E_{con} = \int_0^t P_e dt, \quad (18)$$

pode-se obter, como resultado da substituição de (17) em (18), a energia total consumida no percurso por meio de (19).

$$E_{con} = \int_0^t v \cdot F_{total} dt \quad (19)$$

Portanto, com as informações da força mecânica aplicada pela locomotiva durante uma viagem e sua velocidade ao longo do percurso, é possível calcular a energia consumida por um trem real durante um período determinado da viagem a ser estudada.

2.6 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E SUSTENTABILIDADE

Com vistas para a sociedade moderna, pode-se descrever o modelo de produção atual como um processo que visa altos níveis de acumulação através da dominação da natureza e exploração de seus recursos naturais e serviços dispostos em abundância ao ser humano. Para que estes objetivos sejam atingidos, são utilizadas diversas tecnologias e métodos, desde os mais agressivos, como a extração mineral, até as mais delicadas, como a manipulação genética (BOFF, 2015).

Apesar do termo sustentabilidade ser um conceito aberto e em construção, entende-se como prioridade garantir o desenvolvimento da população atual, a saúde e os recursos necessários para a prosperidade das gerações futuras (NUNES, 2007). Além das preocupações com manejo responsável dos recursos naturais e preservação do meio ambiente, o desenvolvimento sustentável está muito ligado também ao conceito de eficiência, visto que deve perseguir a melhoria dos processos produtivos (CÉSAR et al., 2016).

A Cúpula Mundial para o Desenvolvimento Sustentável, enfatizou, ainda, a “tendência de vincular cada vez mais o desenvolvimento sustentável, para além das questões ambientais, ao desenvolvimento social e econômico” (GALLO et al., 2012). Nesse sentido, o desenvolvimento sustentável clama por uma convergência entre os três pilares: desenvolvimento econômico, equidade social e proteção do meio ambiente (OPAS, 2009). Todavia, ainda que haja consenso sobre esse novo paradigma, muitos são os desafios para alcançar esse novo modelo integrador, como políticas públicas efetivas e pesquisas, entre outras ações concretas (SETTI; GALLO, 2009; BRASIL, 2010).

Na perspectiva da eficiência especificamente material, a sustentabilidade pode ser atingida por meio da maximização dos benefícios do desenvolvimento econômico, sujeito à manutenção dos serviços existentes e da qualidade dos recursos naturais ao longo do tempo, satisfazendo o critério de conservação de estoques. Para que a manutenção dos recursos naturais seja uma realidade futura, algumas regras devem ser obedecidas, como a utilização dos recursos renováveis em taxas menores ou iguais à taxa natural em que podem se regenerar, a otimização da eficiência com que os recursos não renováveis são utilizados, tendo ênfase no progresso tecnológico, e

o monitoramento constante dos fluxos de resíduos no meio ambiente em prol de minimizar seu volume ao nível igual ou abaixo de sua capacidade de assimilar (PEARCE; TURNER, 1991; ACSELRAD, 1999; MARTINS; CÂNDIDO, 2015)

Nesse sentido a atividade mineradora e, por consequência, o transporte ferroviário que a sustenta como negócio, pode ser vista como uma atividade passível da adoção desse modelo sustentável. Apesar da importância da atividade logística para a economia, em especial para a extração de minério de ferro, deve existir a preocupação com questões ambientais e sociais, visto os impactos gerados pela própria característica do negócio (CÉSAR et al., 2016; BRASIL, 2016c).

A proposta deste projeto está ligada diretamente aos conceitos apresentados anteriormente em busca da sustentabilidade de forma a garantir o desenvolvimento econômico da sociedade. A fim de minimizar o consumo de recursos naturais não renováveis, mais especificadamente o consumo de óleo diesel utilizado no abastecimento de locomotivas, e reduzir o volume de resíduos dispostos no ambiente na forma de gases poluentes, como CO₂, CO e NO_x, serão propostas técnicas de condução eficiente nos trens que transportam minério de ferro na Estrada de Ferro Carajás, de forma que o consumo energético destes trens seja reduzido, garantindo a segurança e a manutenção do volume transportado por esta ferrovia.

Segundo Carvalhaes e outros (2017), cada litro de combustível que é poupado durante o transporte ferroviário significa que deixaram de ser lançados na atmosfera mais de 2 kg de CO₂ e mais de 4 g de CO, entre outras substâncias e gases de efeito estufa que são prejudiciais à saúde e ao meio ambiente do planeta, sem considerar a economia financeira para o negócio. Tais emissões atmosféricas podem provocar impactos em níveis regionais, atingindo a população e os seres vivos nas proximidades das áreas operacionais, causando a chuva ácida, por exemplo, mas também levam os impactos a níveis globais, considerando-se os gases de efeito estufa (GEE) que podem contribuir com as mudanças climáticas, diretamente ligadas ao processo de aquecimento global (D'AGOSTO, 2015).

Uma política promissora, já adotada no Brasil, é a adição obrigatória de biodiesel ao diesel tradicional, estabelecida pela Lei nº 13.033 e válida a partir de sua publicação em 2014 (BRASIL, 2014), que ajuda na redução substancial de emissões de material

particulado, hidrocarbonetos e monóxido de carbono, descrita nas análises realizadas por Xue, Grift e Hansen (2011) em motores diesel convencionais. Porém, essa medida não é suficiente quando se trata de emissões de substâncias nocivas à saúde humana, pois, a partir dos estudos de Johnson e outros (2013), foi possível verificar a elevação na quantidade de poluentes presentes no ar nas proximidades de uma ferrovia de carga, cuja origem das substâncias era proveniente da queima de combustível fóssil (diesel) nos motores das locomotivas. As análises detectaram concentrações de SO_2 , NO_x e CO_2 , além da presença de material particulado em suspensão nas correntes de ar da região estudada, ressaltando a importância de estudos de eficiência energética no transporte ferroviário, tendo em vista as consequências ambientais prejudiciais ao planeta.

3 METODOLOGIA

O planejamento de um estudo depende da sua natureza, do problema a ser explorado, do período considerado e do local de sua aplicação, bem como o nível de conhecimento do pesquisador (KÖCHE, 2011).

Cada tipo de pesquisa possui peculiaridades próprias, e não existe nenhum que é puramente autossuficiente, ou seja, todo projeto permite que o pesquisador explore diversas aplicações ou junções metodológicas, em busca de seus objetivos. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Abordando as formas clássicas de classificação, este projeto é dito uma pesquisa aplicada, quanto à sua natureza, por gerar conhecimentos de aplicação prática dirigidos à solução de problemas da operação ferroviária, que podem ser implementados localmente na Estrada de Ferro Carajás. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa exploratória, pois se baseia na formulação de hipóteses e visa novo enfoque para tratamento do problema estabelecido (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Inicialmente, foram realizadas uma pesquisa bibliográfica e uma documental, a fim de fundamentar este trabalho em bases científicas e conseguir identificar uma lacuna de conhecimento aplicada à uma atividade produtiva real (GIL, 2002). A pesquisa bibliográfica, além de prover conhecimentos necessários para a estruturação do trabalho, foi, ao longo do seu desenvolvimento, ampliada para a melhor exploração dos métodos de tratamento e análise dos dados e, principalmente, nas técnicas para proposição do novo modelo operacional. A pesquisa documental realizada teve como objetivo principal o levantamento de dados da empresa e suas particularidades operacionais, para que fosse possível evidenciar a lacuna de conhecimento e também tornar possível a delimitação do estudo apresentado, além de obter o detalhamento de toda a extensão da ferrovia e todas suas restrições operacionais que porventura tragam alguma interferência nos métodos aqui propostos.

Este trabalho foi embasado metodologicamente em um estudo de caso, onde a fundamentação teórica desenvolvida será adaptada e aplicada às condições operacionais da Estrada de Ferro Carajás, foco dos objetivos traçados, de forma a

delimitar as condições de contorno das simulações e fundamentar as premissas escolhidas.

A necessidade pelos estudos de caso surge do desejo de se compreender fenômenos complexos. O estudo de caso permite uma investigação para se preservar as características holísticas e significativas dos eventos da vida real - tais como ciclos de vida individuais, processos organizacionais e administrativos, mudanças ocorridas em regiões urbanas, relações internacionais e a maturação de alguns setores (YIN, 2001).

Para Gil (2002), nos estudos de caso se realizam análises com profundidade, com vistas à obtenção de detalhes sobre o objeto da pesquisa. Para isto, é necessário buscar, armazenar e ter acesso ao máximo de informações e conhecimentos possíveis sobre o tema escolhido, através de um nível considerável de esforço e dispêndio de recursos e tempo para este propósito. Estes se distinguem em quatro fases: a) delimitação da unidade caso; b) coleta de dados; c) análise e interpretação dos dados coletados; e d) redação do relatório.

Para a identificação dos trechos de maior desperdício energético durante a condução de trens carregados ao longo da EFC, foi realizada uma comparação direta entre a energia mínima necessária para transpor o perfil da ferrovia, utilizando o trem tipo para o transporte de minério de ferro, com a quantidade energia consumida por estes trens.

Para a obtenção da energia mínima, primeiramente foi realizada a discretização da ferrovia em trechos, utilizando o critério de relevância para a operação da EFC, e aplicado o equacionamento apresentado no item 2.5.1, em especial a (14), a qual foi alimentada com os dados contidos no sistema informatizado da empresa Vale S.A., conhecido como GPV Ferrovias, levando-se em consideração todas as premissas apresentadas no Capítulo 4, de forma a levantar o valor energético mínimo para transposição de cada trecho, apresentada nos gráficos de resultados como Energia Mínima Calculada.

De forma a comparar a energia consumida pelos trens e a energia mínima, foram realizadas simulações de condução, seguindo exatamente o padrão de operação elaborado pela engenharia da Vale S.A. de forma a obter os dados relativos a composição em cada instante de tempo ao longo de toda a ferrovia. As simulações foram obtidas através do uso do simulador TDS 5000 (*Train Dynamic Systems*) fabricado pela empresa norte americana, *New York Air Brake*. Estes valores foram apresentados nos gráficos do Capítulo 5 como Energia Consumida Simulada.

Adicionalmente a análise dos resultados foram apresentados os dados reais de condução de trens da EFC, por meio da leitura dos arquivos contidos no registrador de eventos das locomotivas reais. Para que o valor do consumo energético real de cada trecho fosse obtido, foram coletados os arquivos de 3 viagens realizadas em cada trecho, para que uma média aritmética pudesse ser aplicada nos valores de energia, levando em consideração apenas viagens que não foram impactadas por problemas na circulação da malha. Os valores obtidos foram apresentados no Capítulo 5 deste trabalho como Energia Consumida Real.

O número reduzido de viagens selecionadas se dá pelo fato de ser necessário encontrar dados de condução que sejam impactadas minimamente pela circulação da malha e que não apresentem restrições de velocidade no percurso analisado, tornando o universo de escolha muito reduzido. Essa restrição é necessária para se ter uma mesma base de comparação com os resultados calculados e simulados.

Dessa forma, pôde-se identificar os trechos com o maior desperdício energético, considerando o trajeto da mina até o porto.

Para a avaliação dos motivos do desperdício energético, foi realizada a comparação do procedimento operacional vigente na Estrada de Ferro Carajás, contido no Sistema de Padronização Vale (SISPAV), com as técnicas de condução eficiente apresentadas por Andrade e Santana (2017) e Andrade, Júnior e Machado (2015), as quais foram utilizadas para proposição de alterações do modelo operacional vigente. Sabe-se que as principais técnicas de condução eficiente, para operações manuais de trens, são o aproveitamento da inércia e o balanceamento de massa em perfis de crista e depressões, as quais podem trazer grandes economias de energia e, conseqüentemente, de combustível quando aplicadas a trens de carga, principalmente trens longos de alta carga por eixo.

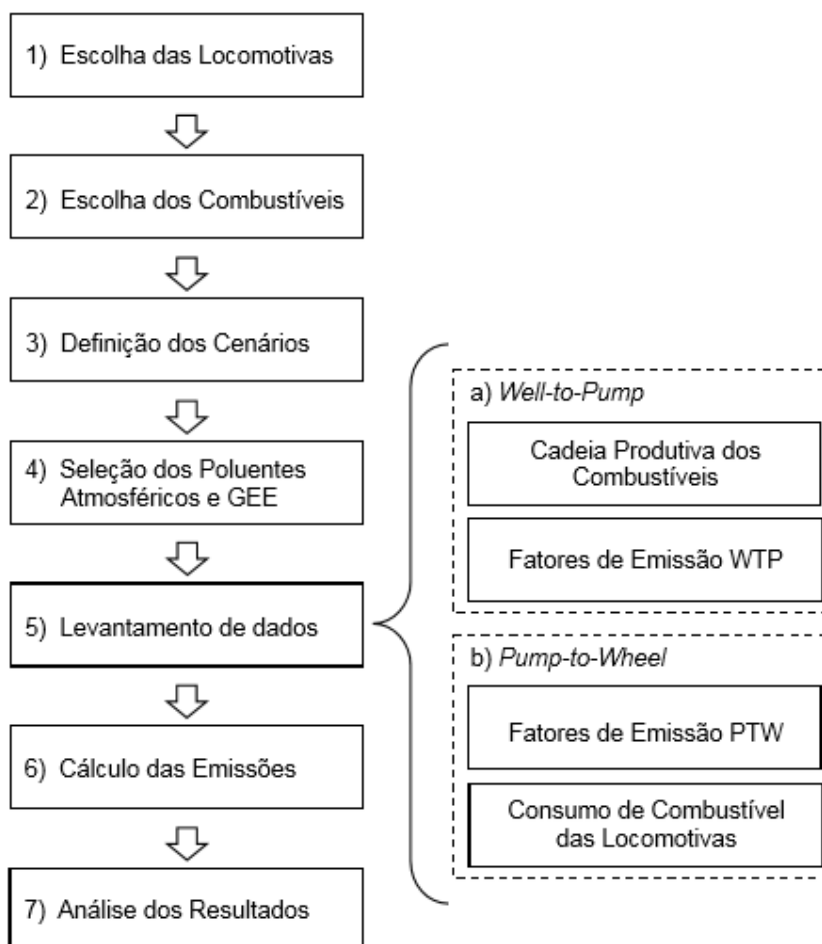
Para o levantamento da equivalência da economia de combustível na redução de gases de efeito estufa foi utilizado o método WTW-LEA (do inglês *Well-to-Wheel Locomotives Emissions Assessment*), proposto por Caliman (2018), que tem por finalidade levantar a quantidade de emissões desde a obtenção das matérias-primas para a produção do combustível até a sua utilização final nos motores das locomotivas. Este método, composto de sete passos (

Figura 3.1), foi aplicado ao resultado do potencial da economia de combustível levantada ao se utilizar a nova proposta de condução identificada na presente pesquisa, tornando possível estimar a quantidade de emissões que deixarão de ser lançadas na atmosfera.

Por último, e não menos importante, foram verificados os parâmetros de segurança e estabilidade dos trens através do uso de um simulador de operações ferroviárias, cujo principal objetivo foi comprovar, por meio de simulações, a viabilidade técnica da proposta de alteração na condução dos trens da EFC.

Foram ainda realizadas simulações empregando os mesmos parâmetros de via e de formação do trem tipo, de forma que a nova proposta de condução pudesse ser analisada no que se refere aos esforços intra-trens, aos choques de compressão e de tração provenientes da condução, além da relação entre as forças laterais e verticais do comboio, que é um ótimo indicador de segurança e estabilidade do trem durante sua viagem. Todos estes parâmetros podem ser calculados e avaliados por meio do simulador de operações ferroviárias. Tal ferramenta é utilizada pela engenharia da Vale S.A. como método de avaliação de todos os modelos operacionais vigentes nas ferrovias da empresa, o qual possui confiabilidade e é normatizado pela AAR.

Figura 3.1 – Esquema do método WTW-LEA



Fonte: Caliman (2018, p. 50).

4 PREMISSAS E CONSIDERAÇÕES

4.1 TRAÇADO DA VIA PERMANENTE

De forma a atingir os objetivos deste trabalho, foram definidas as condições de contorno e as premissas em prol de padronizar e viabilizar as análises de dados e os cálculos apresentados no próximo capítulo deste trabalho. O primeiro parâmetro especificado foi o traçado da via, visto que existem longas e complexas estruturas de via ferroviária pertencentes à Estrada de Ferro Carajás (Figura 4.1).

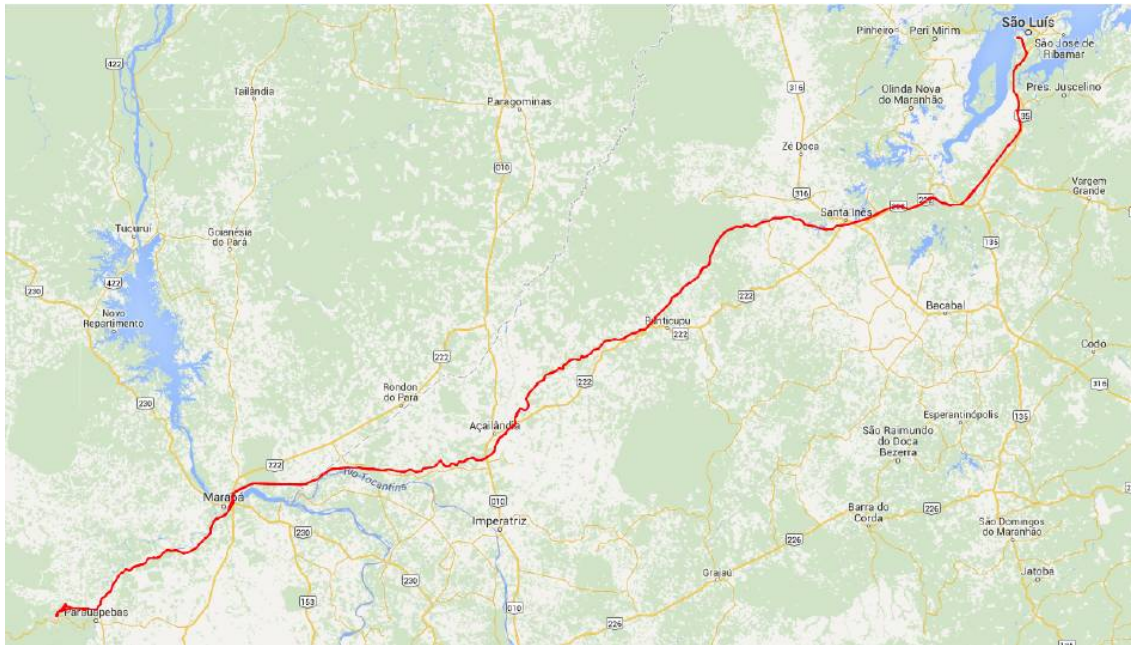
Figura 4.1 – Traçado da Estrada de Ferro Carajás



Fonte: Campaneri Junior (2013, p. 2).

Para o estudo de eficiência energética da ferrovia, foram consideradas apenas as viagens dos trens com origem na mina de Carajás - PA e destinados ao Porto de Ponta da Madeira, localizado no município de São Luís - MA, através da linha tronco, ou seja, foi utilizado apenas o traçado da linha principal, desconsiderando todos os pátios ou ramais existentes ao longo de todo o trajeto. Assim, todas as interferências causadas por manobras ferroviárias, desvios, formação de trens ou desmembramentos serão eliminadas de forma a manter o foco principal do projeto. Com o objetivo de ilustrar o perfil planimétrico da EFC (linha tronco) considerado no presente estudo, foi utilizado o levantamento georreferenciado realizado por Brito (2014), totalizando 889.520 km (Figura 4.2).

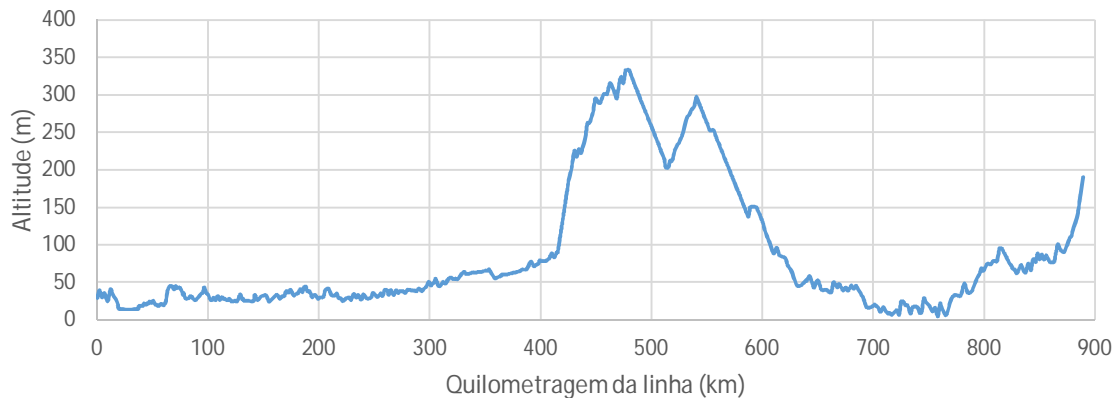
Figura 4.2 – Perfil planimétrico da EFC traçado através de posicionamento GPS



Fonte: Brito (2014, p. 32).

Além do perfil de curvas, ou perfil planimétrico, fez-se necessário o levantamento altimétrico de toda a extensão da via a ser estudada (Gráfico 4.1), para que as mudanças de altitudes, traduzidas em rampas ascendentes e descendentes fossem consideradas nos cálculos de levantamento energético e de consumo de combustível, dados estes disponíveis no Plano de Vias EFC 2017 (PALHANO, 2017), documento oficial da Vale, de responsabilidade da Engenharia Ferroviária da companhia. Deve-se ressaltar que uma convenção é utilizada nas ferrovias nacionais para mensurar sua extensão, que padroniza a origem das medidas sempre no ponto de descarga, mais especificamente no porto. Assim, entende-se que o “quilômetro zero” da Estrada de Ferro Carajás é no Porto de Ponta da Madeira e sua extensão é finalizada na entrada do pátio do complexo de mineração de Carajás (VALEC, 2015; ALL, 2015; MRS, 2016; VALE, 2017).

Gráfico 4.1 – Perfil altimétrico da linha tronco da EFC



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

4.2 CONFIGURAÇÃO DAS COMPOSIÇÕES FERROVIÁRIAS

De acordo com o Planejamento Estratégico da Vale S.A. para a Estrada de Ferro Carajás, a configuração padrão utilizada para o transporte de minério de ferro dos complexos mineradores até o Porto de Ponta da Madeira é composto de 04 locomotivas e 330 vagões (Figura 4.3), sendo este o modelo de trem utilizado para o dimensionamento dos pátios de manobras, dos silos e pátios de carregamento, além das oficinas de inspeção e manutenção de ativos de toda a ferrovia (DELTREGIA, 2013).

Figura 4.3 – Formação padrão do trem da EFC



Fonte: Deltregia (2013, p. 6).

Com a evolução da frota de ativos ferroviários da EFC, foram adquiridas novas locomotivas com potências superiores aos 4400 hp disponíveis nas Dash-9 da fabricante *General Electric*, tornando a formação dos trens carregados mais flexível, podendo operar com apenas 3 locomotivas e permitindo a formação de lotes de 106 a 112 vagões (GPV FERROVIAS, 2019; SILVA et al., 2018).

Utilizando o sistema informatizado da companhia (GPV Ferrovias) foi possível levantar a quantidade de trens em operação na malha e quais as suas formações, de forma a

definir a configuração mais recorrente utilizada pela operação da ferrovia mostrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Tipos de formação utilizados na EFC para trens carregados

Tipo de trem	2017		2018	
	Quantidade	%	Quantidade	%
3 Locomotivas e 220 vagões	759	13%	533	9%
4 locomotivas e 220 vagões	175	3%	118	2%
3 locomotivas e 330 vagões	1518	26%	2072	35%
4 locomotivas e 330 vagões	3329	57%	2131	36%
4 locomotivas e 440 vagões	58	1%	1066	18%

Fonte: GPV Ferrovias (2019).

Por meio das informações do GPV Ferrovias, foi verificado que a formação mais recorrente para os trens carregados de minério de ferro é a composta de 4 locomotivas e 3 lotes de 110 vagões, sendo esta configuração assumida como trem tipo para este estudo.

Devido à característica do relevo da Estrada de Ferro Carajás, existe um trecho que apresenta rampas acentuadas em função da elevação rápida da altimetria da via, que não é possível ser transposto utilizando as formações dos trens tipo anteriormente apresentadas. Assim, faz-se necessária a adição de mais locomotivas na formação original para que a força tratora seja aumentada de forma a vencer o terreno acidentado, aplicada apenas aos trens carregados.

O trecho com essa característica se localiza entre os municípios de Bom Jesus das Selvas e São Pedro da Água Branca, ambos no Maranhão, mais especificamente entre os quilômetros 480 e o 614 da ferrovia, cujo perfil altimétrico é ilustrado no Gráfico 4.2.

Gráfico 4.2 – Perfil altimétrico da EFC



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Nesta porção da via a formação do trem tipo é alterada, onde são acopladas, apenas nos trens carregados, duas locomotivas adicionais na cauda da composição, cuja finalidade é aumentar a força tratora de forma a garantir a transposição do percurso, como mostra a Figura 4.4. Estas locomotivas são chamadas de locomotivas *Helper*, e auxiliam na subida de rampas e topografias muito acidentadas. Esta prática traz grande economia de recursos, pois evita que uma composição viaje com locomotivas subutilizadas, alocando os ativos apenas no percurso necessário (BARBOUR et al., 2018; PAINTER, 2006).

Figura 4.4 – Formação do trem da EFC com utilização de locomotivas *Helper*

Fonte: Deltregia (2013, p. 6).

Nota: Adaptado pelo autor.

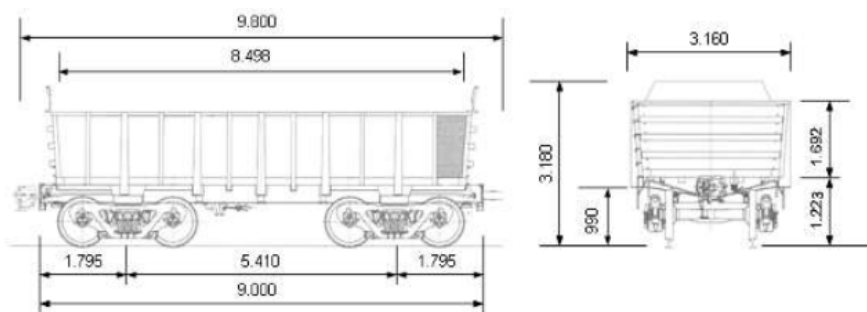
4.3 TIPOS E PESO MÉDIO DOS VAGÕES

De acordo com Brunoro e Ribeiro (2010), existem onze tipos diferentes de vagões para o transporte de cargas em circulação na EFC. Destes, apenas dois são utilizados no transporte de minério de ferro, a saber, os vagões GDU e GDT, classificados como vagões gôndola, designação identificada pela letra G de suas siglas. São, geralmente, veículos abertos ou descobertos, projetados para suportar altas intensidades de esforços e tensões em suas estruturas devido às severas condições a que são

expostos durante as viagens e o processo de descarga. Podem ser rapidamente esvaziados ou descarregados por meio de viradores de vagões, mais conhecidos como *car dumpers*, característica identificada pela letra D em suas siglas (UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE, 1988).

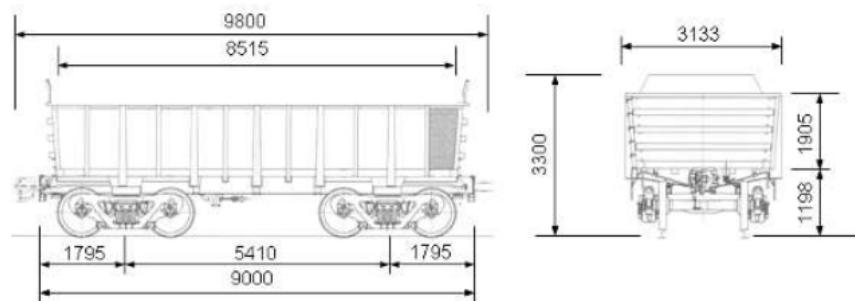
Diante da Figura 4.4 e da Figura 4.5 é facilmente percebida a grande semelhança no projeto de ambos os vagões. Porém, a principal diferença está na capacidade de carga que cada um pode suportar em sua estrutura e, conseqüentemente, em seus engates, onde o vagão GDT apresenta um limite máximo para seu peso bruto total em 130 toneladas e o vagão GDU, um limite em 150 toneladas (CAMPANERI JUNIOR, 2013; ALTOÉ, 2016).

Figura 4.5 – Vagão GDT



Fonte: Brunoro e Ribeiro (2010, p. 8).

Figura 4.6 – Vagão GDU



Fonte: Brunoro e Ribeiro (2010, p. 10).

Para a definição dos vagões que foram utilizados nas análises deste trabalho, fez-se necessário o levantamento da frota em circulação para o transporte de minério de ferro na EFC. Por meio do GPV Ferrovias (2019), sistema oficial da empresa voltado para a gestão da produção e dos ativos utilizados em suas operações, foi possível extrair os dados da Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Frota de vagões em circulação para o transporte de minério de ferro na EFC

Tipo de vagão	Quantidade em circulação	% da frota
GDT	10.594	55,7
GDU	8.422	44,3

Fonte: GPV Ferrovias (2019).

As duas frotas possuem importante representatividade no transporte de minério, fazendo-se necessária a realização das análises dos trens tipo empregando ambos os vagões, considerando as suas respectivas características construtivas detalhadas no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Características construtivas dos vagões

Tipo de vagão	Distância entre engates (m)	Tara (t)	Peso máximo total (t)	Bitola (m)
GDT	9,80	20	130	1,60
GDU	9,80	22	150	1,60

Fonte: Greenbrier Mxion (2019a), Greenbrier Mxion (2019b), Altoé (2016) e Campaneri Junior (2013).

Um dos parâmetros mais relevantes para a operação ferroviária e, conseqüentemente, para a eficiência energética das composições envolvidas no processo de transporte é o peso líquido transportado em cada um dos vagões da composição. Este peso é monitorado fielmente, por meio de balanças, em cada um dos pontos de carregamento da ferrovia, buscando a máxima padronização e o menor desvio entre o limite de carga suportado pela via férrea e o que foi efetivamente carregado na caixa de cada vagão (MIRANDA et al., 2017).

Apesar dos vagões GDU possuírem uma capacidade elevada de carregamento, podendo atingir uma carga bruta de 150 t, existe uma restrição operacional que limita em 32,5 t/eixo a carga máxima suportada pela via permanente, restrição esta imposta pela equipe técnica da engenharia no intuito de resguardar a integridade da via, principalmente de suas pontes, cuja estrutura atual não suportaria os impactos gerados pela carga máxima dos vagões GDU. Com esta limitação, foi estabelecido que a carga bruta máxima permitida para um vagão em circulação é de 130 t, ou seja, os vagões GDU e GDT operam com o mesmo peso total quando utilizados no transporte de minério de ferro na EFC (MIRANDA et al., 2017).

A partir do limite operacional, cada ponto de carregamento busca o máximo volume embarcado nos vagões. Porém, o peso total dos vagões carregados não apresenta um valor exato. Tratando-se de minério de ferro, não se pode concluir que o produto final entregue pelas minas é o mesmo, pois a diversidade das estruturas geológicas e dos processos de beneficiamento podem gerar diversos produtos como o minério granulado, o *pellet feed*, o *sínter feed*, etc., todos classificados como minério de ferro, apresentando, entretanto, diferentes pesos específicos e granulometria. Adicionalmente às diferenças de produtos, o processo de carregamento pode ser através de silos ou pás carregadeiras, que tornam as taxas de carregamento ainda menos exatas (DELTREGIA, 2013; MIRANDA et al., 2017).

Em busca de definir um valor único de carga para os dois tipos de vagões utilizados neste trabalho, foram levantados os pesos totais de cada vagão carregado ao longo do ano de 2018, considerando-se as três unidades de beneficiamento da Vale S.A. no estado do Pará e, por meio da média dos dados adquiridos, foi possível calcular o peso médio total dos vagões em circulação na EFC, padronizando assim a variável de peso médio da carga (peso líquido) do vagão GDT em 105,12 t e do vagão GDU em 104,2 t (GPV FERROVIAS, 2019).

4.4 TIPOS DE LOCOMOTIVAS

A Estrada de Ferro Carajás possui uma frota diversificada de locomotivas, com um total de 283 de tração diesel-elétricas, destinadas à movimentação de cargas. Dentre estes fluxos de transporte, o predominante é o minério de ferro que, para atender à demanda de produção das minas, utiliza 245 destas locomotivas, conforme detalhado na Tabela 4.3.(CARVALHO, 2017).

Tabela 4.3 – Distribuição de locomotivas utilizadas no transporte de minério de ferro da EFC

Modelo	Fabricante	Frota	Potência Bruta (hp)	Percentual da frota (%)
DASH-9	GE	111	4400	45,3
EVO	GE	72	6000	29,4
SD70	EMD	55	4300	22,4
SD80AC	EMD	7	5500	2,9

Fonte: GPV Ferrovias (2019).

Diante da representatividade da frota de locomotivas DASH-9, ilustrada na Figura 4.7, e da escolha do trem tipo realizada anteriormente (item 4.2) que também utiliza este modelo como unidade tratora, este tipo de locomotiva foi definido como a unidade padrão de tração dos trens a serem analisados neste trabalho, cujas características construtivas são apresentadas no Quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Características construtivas da locomotiva Dash-9

Locomotiva	Distância entre engates (m)	Tara (t)	Peso médio (t)	Bitola (m)
DASH-9	23,07	179,985	180,993	1,60

Fonte: Parreira (2014).

Figura 4.7 – Locomotiva DASH-9



Fonte: Carvalho (2010, p. 05).

4.5 PARÂMETROS DA EQUAÇÃO DE DAVIS

De forma a calcular as forças de resistência à propulsão de cada um dos veículos ferroviários ao longo de toda a composição, foi utilizada a Equação da Davis Modificada, descrita no item 2.4.1 e aqui reproduzida em (20).

$$F_{pr} = A + \frac{A_0}{m_a} + Bv + \frac{CS_f v^2}{m_a n} \quad (20)$$

Esta equação apresenta coeficientes que devem ser escolhidos de acordo com as características da ferrovia e dos veículos utilizados na formação dos trens. Alguns autores apresentam estudos ou estimativas para a escolha destes parâmetros, que devem ser avaliados com muita atenção, pois estes têm interferência direta nos resultados de consumo energético dos trens. Não existem métodos exatos para estimar a resistência dos veículos ou do trem e a precisão dos valores deve ser

considerada por meio de fórmulas empíricas baseadas em valores estimados ou medidos (WU; SPIRYAGIN; COLE, 2016).

Originalmente, segundo Shmidt (1927), a Equação de Davis determinou os seguintes parâmetros para utilização em veículos de carga, como descrito em (21).

$$F_{pr} = 1,3 + \frac{29}{m_a n} + 0,045v + \frac{0,0005S_f v^2}{m_a n} \quad (21)$$

Porém, nessa época, foram utilizados vagões com mancais de bronzina para os experimentos e medições, pois era a tecnologia utilizada na década de 20 para deslizamento dos eixos dos rodéis. Este fato, entretanto, fica intrínseco na formulação apresentada em (21). Com a evolução dos equipamentos utilizados para redução de atrito e a implantação do uso de rolamentos, a empresa *Canadian National Railroads* teve a necessidade de atualizar as constantes de Davis, cujos resultados foram publicados pela AAR, no Manual de Padrões e Recomendações Práticas em 1960, como mostrado em (21), e foram mantidos até os dias de hoje, mesmo após a última revisão ocorrida em 2008 (ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, 2008a; US DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, 1981).

$$F_{pr} = 1,3 + \frac{72,5}{m_a n} + 0,015v + \frac{0,0005S_f v^2}{m_a n} \quad (22)$$

De forma a conservar a padronização de unidades e utilizar o Sistema Internacional de Unidades (SI), a equação (22) foi convertida na equação (23).

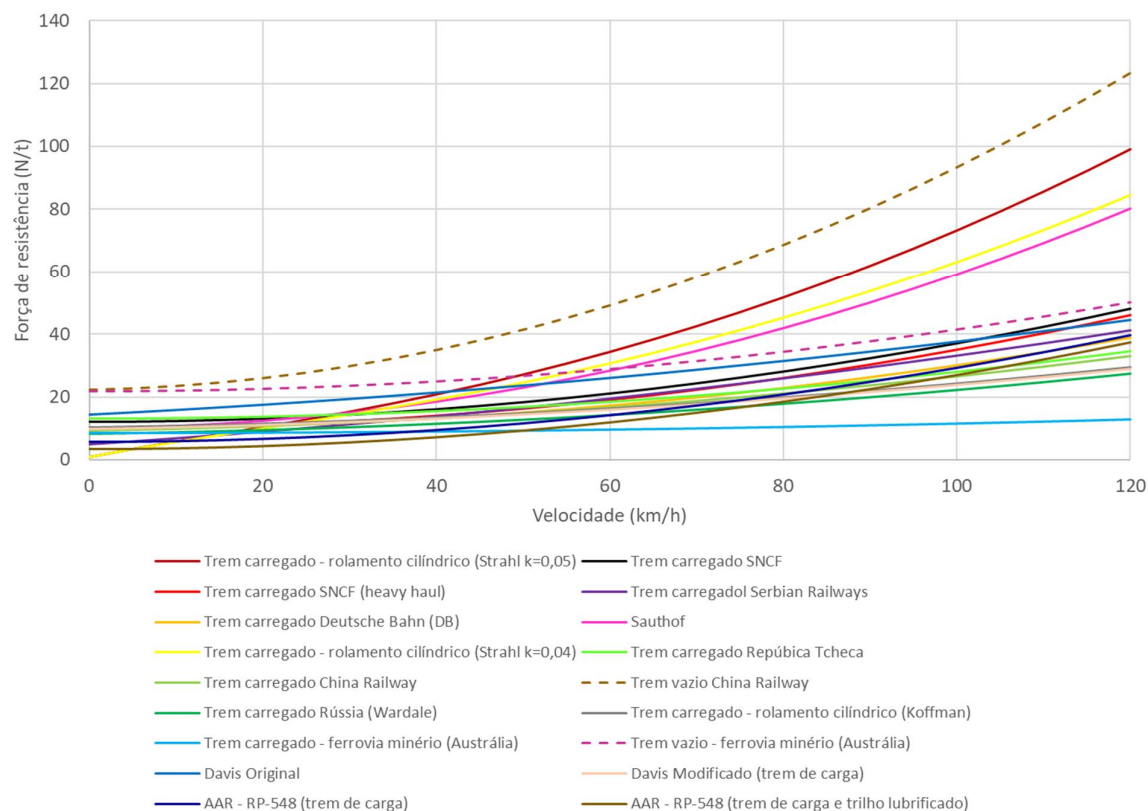
$$F_{pr} = 6,5 + \frac{320}{m_a n} + 0,046v + \frac{0,0094S_f v^2}{m_a n} \quad (23)$$

Estas constantes foram calculadas empiricamente, considerando-se trens de carga geral circulantes com velocidades de 10 km/h à 65 km/h e, no máximo, 30 vagões. Porém, tais equações não são confiáveis para trens mais longos ou com velocidades superiores. Desde então, diversos autores vêm propondo modificações nestes parâmetros em busca da representação dos cenários encontrados nas ferrovias ao longo do mundo (LUKASZEWICZ, 2001). Melhorias no arrasto aerodinâmico dos trens de Shinkansen, no Japão, foi relatado em 1967 (TRANSIT DEVELOPMENT

CORPORATION, 1976). A redução aerodinâmica de arrasto devido a mudanças de projeto foi publicada em 1982, por Peters (1982). Estudos sobre resistência de rolagem realizados pela SNCF (do francês *Société Nationale des Chemins de fer Français*) foram divulgados por Chambadal (1983) e bons resultados puderam ser atingidos pela *German Railways* no uso da formulação de Strahl para trens de carga e trens mistos de passageiros, desenvolvidos por Rochard e Schmid (2000).

De forma a comparar os mais relevantes trabalhos de pesquisa, com o foco na obtenção dos parâmetros da fórmula de resistência ao rolamento para trens de carga, foi traçado o Gráfico 4.3 onde estão plotadas as curvas de resistência à propulsão para os mais diversos casos estudados. A definição dos parâmetros da citada equação pôde ser feita por meio da identificação do estudo com maior similaridade com as condições operacionais que se deseja aqui analisar.

Gráfico 4.3 – Comparação entre as fórmulas de resistência à propulsão



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Por meio do Gráfico 4.3, pode-se perceber que os diferentes estudos para determinação dos parâmetros de resistência à propulsão, definidos pelas equações (24) a (41) do Quadro 4.3, resultam em curvas muito similares, especialmente quando avaliadas nas faixas de velocidade inferiores a 40 km/h. Devido ao fato de que as maiores diferenças estão na determinação dos parâmetros de resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico, as curvas apresentam maiores divergências em altas velocidades.

Quadro 4.3 – Equações referentes às curvas do Gráfico 4.3

Caso de estudo	Equação publicada
Trem carregado – rolamento cilíndrico (Strahl $k = 0,05$)	$F_{pr} = 2,2 - 80/(v + 38) + 0,00057v^2$ (24)
Trem carregado SNCF (<i>heavy haul</i>)	$F_{pr} = 1,2 + v^2/400$ (25)
Trem carregado SNCF (carga geral)	$F_{pr} = 1 + v^2/400$ (26)
Trem carregado <i>Serbian Railways</i>	$F_{pr} = 0,483 + 0,0183v + 0,0001v^2$ (27)
Trem carregado Deutsche Bahn (DB)	$F_{pr} = 1 + 0,0002 v^2$ (28)
Sauthof	$F_{pr} = 1 + 0,0025v + 0,48(n_{sr} + 0,27)m_v \cdot 0,0145v^2$ (29)
Trem carregado – rolamento cilíndrico (Strahl $k = 0,04$)	$F_{pr} = 2,2 - 80/(v + 38) + 0,00047v^2$ (30)
Trem carregado República Tcheca	$F_{pr} = 13 + 0,0015v^2$ (31)
Trem carregado <i>China Railway</i>	$F_{pr} = 0,92 + 0,0048v + 0,000125v^2$ (32)
Trem vazio <i>China Railway</i>	$F_{pr} = 2,23 + 0,0053v + 0,000675v^2$ (33)
Trem carregado Rússia (Wardale)	$F_{pr} = 8,2 + 0,04v + 0,001v^2$ (34)
Trem carregado – rolamento cilíndrico (Koffman)	$F_{pr} = 1,1 + 0,021v + 0,000175v^2$ (35)
Trem carregado Ferrovia minério (Austrália)	$F_{pr} = 5,5 + 0,0001875v^2$ (36)
Trem vazio Ferrovia minério (Austrália)	$F_{pr} = 8,85 + 0,00195v^2$ (37)
Davis original (trem de carga)	$F_{pr} = 14,5 + 0,138v + 0,0096v^2$ (38)
Davis modificado (trem de carga)	$F_{pr} = 9,7 + 0,046v + 0,0096v^2$ (39)
AAR - RP-548 (trem de carga)	$F_{pr} = 5,69 + 0,002352v^2$ (40)
AAR - RP-548 (trem de carga e trilho lubrificado)	$F_{pr} = 3,44 + 0,002352v^2$ (41)

Fonte: Radosavljevic (2006, p. 288), Rochard e Schmid (2000) e Association of American Railroads (2008b).

Nota: Adaptado pelo autor.

Diante dos diversos estudos e levantamentos empíricos, o trabalho de Szanto (2016) foi o mais recente que determinou os parâmetros da Equação de Davis modificada para trens de minério com as características mais similares dos existentes na Estrada de Ferro Carajás, e serão empregados como premissa nos cálculos energéticos deste estudo de caso, como descrita em (36). Para que esta equação possa ser utilizada, ela precisa ser detalhada de forma a apresentar a variável de peso bruto, anteriormente embutida no equacionamento presente em Szanto (2016), podendo ser reescrita conforme (42).

$$F_{pr} = 5 + \frac{80}{m_a} + \frac{0,003}{m_a n} S_f v^2 \quad (42)$$

Os pontos principais que levaram à escolha dos resultados de Szanto (2016) neste trabalho foram: (i) o modelamento das resistências utilizando trens de mais de 200 vagões, mais precisamente 244, configuração que não é representada nos outros estudos pois operações com trens mais curtos são mais comumente utilizadas em outras ferrovias ao redor do mundo; (ii) o peso bruto dos vagões estudados é de 160 toneladas, que também se aproxima dos 126,2 toneladas dos vagões utilizados na EFC, sendo estes valores pouco utilizados em outras ferrovias e raramente apresentados em publicações; e (iii) a utilização do parâmetro B da Equação de Davis igual a zero, que também foi desprezado em outros estudos, como os da República Tcheca, França (SNC), Alemanha (DB) e nas equações de trens de carga da AAR - RP-548, equações (40) e (41), como detalhado no Quadro 4.3 e mencionado no manual da AREMA (2019, p. 16-2-8) como um parâmetro que pode ser desprezado, dependendo das características operacionais e construtivas da ferrovia em estudo.

O parâmetro C, apresentado na equação (36), é menor do que o encontrado em outros casos citados na literatura. Porém, Szanto (2016) reforça que o arrasto aerodinâmico é mais representativo no primeiro terço das composições e reduz ao longo do trem, de modo que a resistência média diminui para trens longos, justificando o valor empiricamente encontrado.

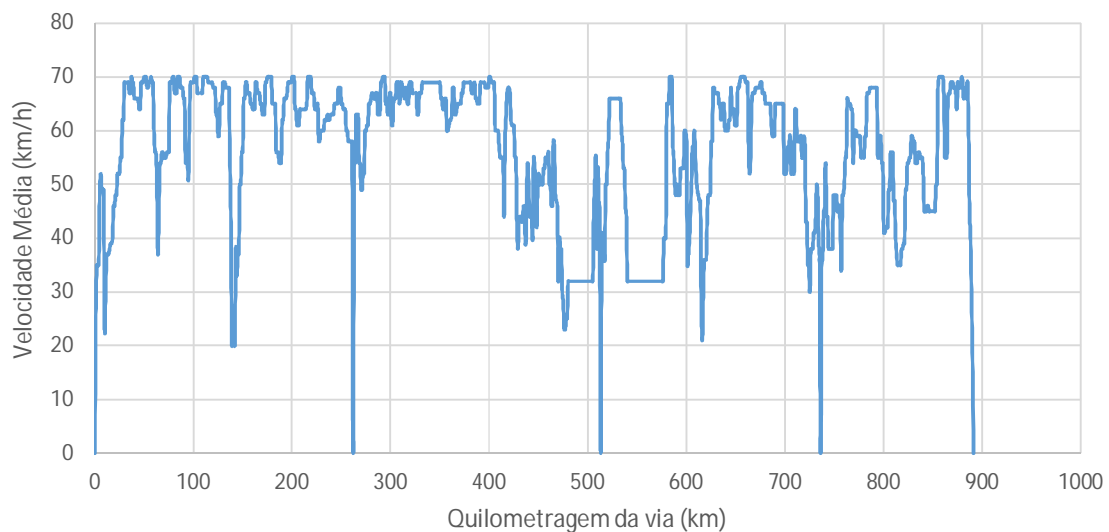
4.6 VELOCIDADE MÉDIA AO LONGO DA FERROVIA

A velocidade de deslocamento dos trens é um parâmetro muito relevante para o cálculo do consumo energético e tem influência direta no consumo de combustível dos trens. Assim, houve a necessidade do levantamento da velocidade performada pelos trens que transportam minério de ferro na EFC. Como a condução das composições é feita de forma manual, a velocidade não é uma variável padronizada durante as operações, sendo necessária a utilização da velocidade média performada pelos trens na linha troco, representada no Gráfico 4.4.

Para a obtenção da velocidade média, foram extraídas 12 viagens de trens carregados de minério, do sistema AVF (Analisador de Viagens Ferroviárias), considerando viagens com paradas apenas para troca de maquinistas nos pátios principais de Marabá, Açailândia e Alto Alegre. Estas viagens ocorreram no ano de 2019, entre os meses de janeiro e outubro e foram as mesmas utilizadas para o cálculo da energia consumida apresentada no Capítulo 5.

O sistema AVF armazena todos os registros de operação dos trens que trafegam nas ferrovias da Vale S.A., com o objetivo de viabilizar análises das viagens realizadas pelos maquinistas.

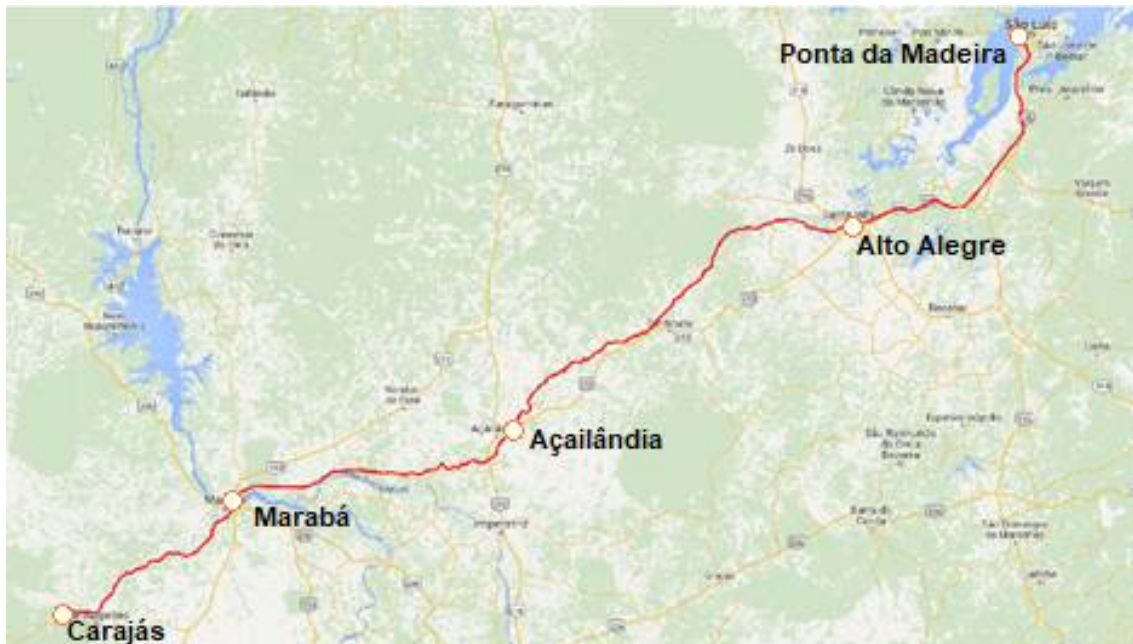
Gráfico 4.4 – Velocidade média dos trens que transportam minério de ferro na EFC



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Devido à grande extensão da ferrovia, e à legislação trabalhista brasileira que regula a carga horária de trabalho dos maquinistas, existe a obrigatoriedade da troca dos maquinistas que operam os trens na EFC. Segundo Oliveira (2018), os pontos de parada estipulados para a troca dos operadores, em condições normais de operação da ferrovia, localizam-se nas estações de Alto Alegre, Açailândia e Marabá, além dos terminais de Carajás e Ponta da Madeira, que se caracterizam pelo início e fim das viagens de transporte, respectivamente.

Figura 4.8 – Pontos de troca de equipagem da EFC



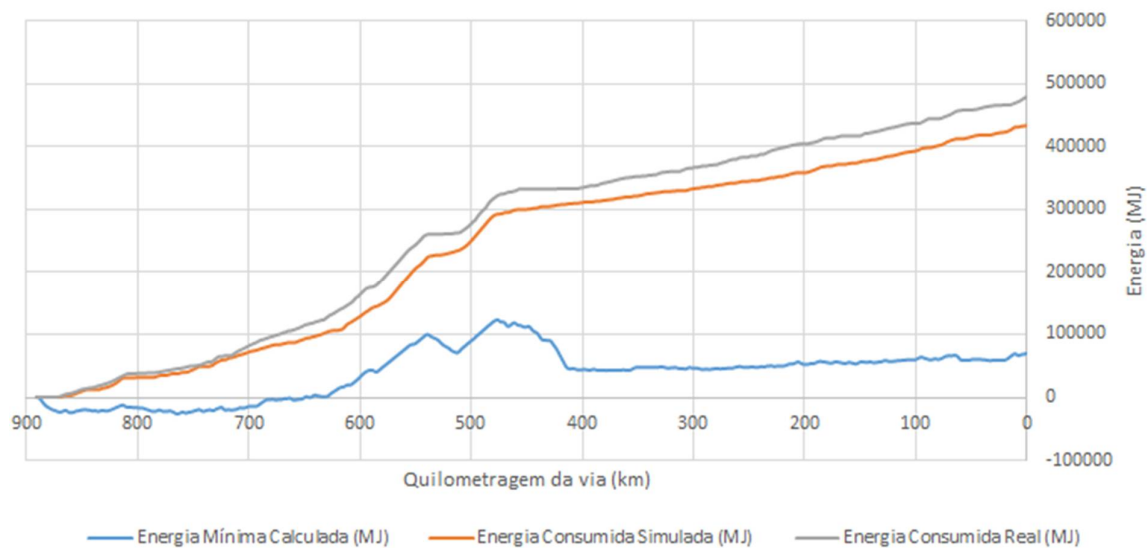
Fonte: Brito (2014, p. 32).
Nota: Adaptada pelo autor.

A principal influência dos pontos de troca de equipagem no consumo energético é a inclusão de uma faixa de desaceleração em cada ponto de troca até a parada total da composição, e uma posterior arrancada até o atingimento da velocidade de cruzeiro, estabelecida por Palhano (2018) no procedimento de condução dos trens.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 3, foi possível traçar o Gráfico 5.1, o qual mostra a quantidade de energia consumida e calculada de forma acumulativa para o traslado da mina até o Porto de Ponta da Madeira.

Gráfico 5.1 – Comparação entre a energia mínima calculada, energia consumida simulada e a energia consumida real



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

As viagens avaliadas desconsideram paradas nos pátios intermediários, congestionamentos da malha, falhas de sinalização, restrição de velocidade por intervenção de manutenções e quaisquer outras ocorrências que não estejam contempladas na operação padrão da ferrovia definida por Palhano (2018).

Analisando o Gráfico 5.1, onde se pode comparar a energia gasta durante a condução (real e simulada) da composição carregada com a energia mínima necessária para transpor este terreno, verifica-se um gasto energético superior ao mínimo calculado, o que reforça a necessidade de aprimoramento na condução em busca da redução do consumo energético total durante o transporte.

Uma característica importante que pode ser percebida na curva de energia mínima, são os intervalos em que ocorrem redução da energia acumulada, este fator se deve a influência direta do relevo do terreno, onde a energia gravitacional calculada se torna cada vez menor a medida em que o trem avança longitudinalmente na via.

De forma mais detalhada, é possível descrever matematicamente a situação anteriormente citada, considerando a o ponto inicial de um declive e b o seu ponto final. Assim, as equações (43) à (47) explicam o descarte da energia gravitacional excedente à resistência da composição, apontada na equação (48).

$$E_{\text{gravitaional (até ponto a)}} = \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_{h_0}^{x=h_a} g dx \right) \quad (43)$$

$$E_{\text{gravitaional (até ponto b)}} = \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_{h_0}^{x=h_b} g dx \right) \quad (44)$$

$$E_{\text{gravitaional (até ponto a)}} > E_{\text{gravitaional (até ponto b)}}, \text{ sendo } b > a \quad (45)$$

$$E_{\text{gravitaional (de a até b)}} = \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_{h_a}^{x=h_b} g dx \right) < 0 \quad (46)$$

Quando

$$\left| \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_{h_a}^{x=h_b} g dx \right) \right| > \left| \sum_{i=1}^q \left(m_i \sum_{j=1}^r \left[\int_a^{x=l_{cj}} F_{c_{ij}} dx \right] \right) + \sum_{i=1}^q \left(m_i \int_a^{x=b} F_{p_{ri}} dx \right) \right|, \quad (47)$$

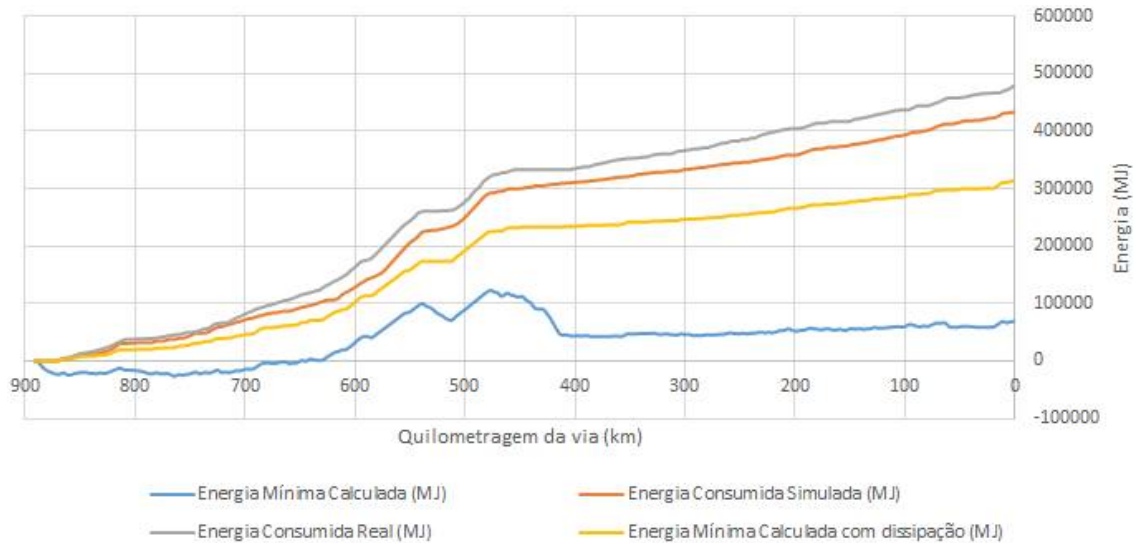
pode-se considerar a equação (48).

$$E_{\text{min (até ponto a)}} = E_{\text{min (até ponto b)}} \quad (48)$$

Devido ao fato de a análise energética tratar-se de uma composição ferroviária que não possui nenhum dispositivo de armazenamento de energia, isso faz com que, na prática, essa energia gravitacional, a favor do movimento, tenha que ser dissipada. Ou seja, quando a energia gravitacional, ao longo dos trechos de declive, se torna maior em módulo do que a energia necessária para vencer as forças de resistência à propulsão, somadas às resistências de curva, o trem tende a ganhar velocidade, obrigando o maquinista a dissipar a energia excedente, quando necessário, a fim de não ultrapassar a velocidade máxima permitida pela via. A dissipação da energia excedente é realizada por meio da atuação do freio dinâmico existente nas locomotivas e da aplicação do freio pneumático presente em toda a composição.

Em virtude da dissipação da energia excedente, a curva de energia mínima foi recalculada, desprezando-se a energia gravitacional excedente nos trechos de declive, e é apresentada no Gráfico 5.2.

Gráfico 5.2 – Comparação entre a energia mínima calculada, energia consumida simulada, energia consumida real e a energia mínima calculada com dissipação



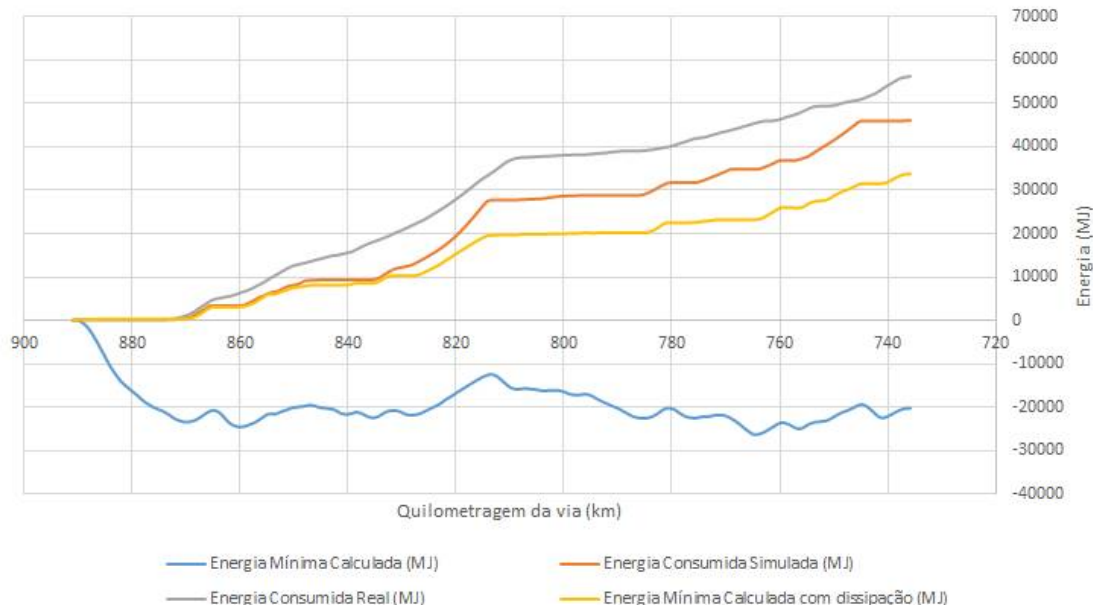
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Diante da característica operacional da ferrovia, destacada no item 4.6, as análises de dados também serão segmentadas em quatro partes distintas, cada uma relativa a um trecho de operação realizada com os trens carregados, de forma a facilitar o detalhamento e a avaliação dos resultados.

5.1 ANÁLISE DO TRECHO DE CARAJÁS A MARABÁ

Esta análise compreende a operação ferroviária com trens carregados de minério de ferro partindo do pátio de carregamento de Carajás até a chegada ao pátio de Marabá, cujos valores de consumo energético podem ser vistos no Gráfico 5.3.

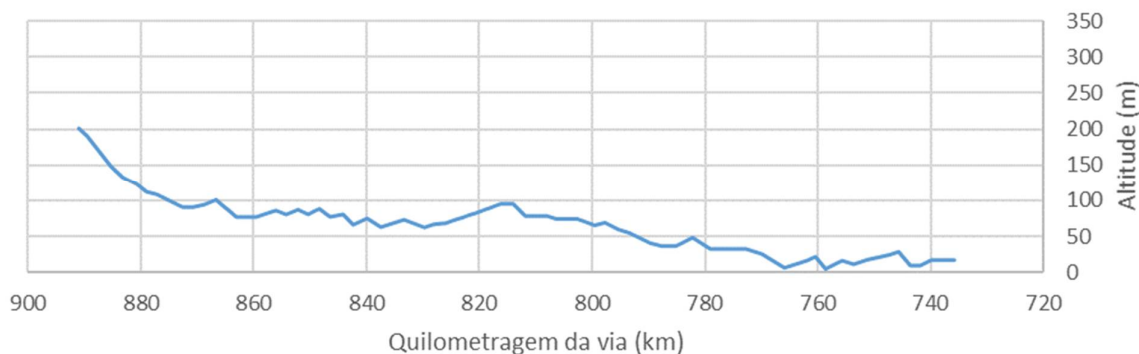
Gráfico 5.3 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Carajás a Marabá



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

De forma a ter um parâmetro comparativo com o gasto energético apresentado, o perfil altimétrico nesta parte da ferrovia pode ser visto no Gráfico 5.4.

Gráfico 5.4 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Carajás até Marabá



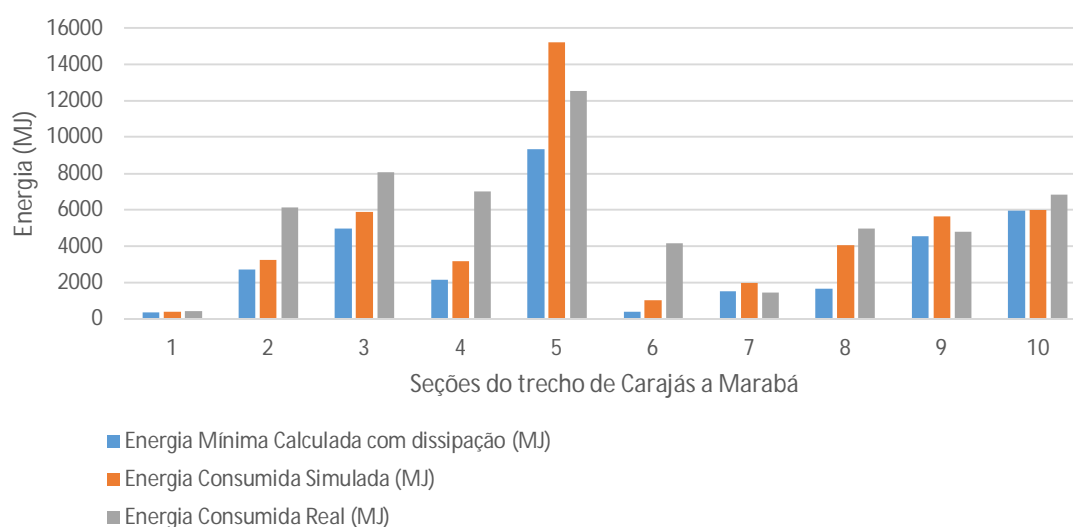
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Como descrito na metodologia deste trabalho, os valores do consumo energético real foram obtidos por meio dos arquivos de 3 viagens realizadas de Carajás, localizada no quilômetro 891, até Marabá, no quilômetro 735,8, cujos arquivos de dados presentes em cada uma das locomotivas foram extraídos para posterior análise.

As viagens selecionadas aconteceram nos dias 05 de julho de 2019, pela composição de prefixo M160, e no dia 23 de agosto de 2019, pelas composições de prefixo M144 e M150, todas elas contendo as premissas estabelecidas no Capítulo 4.

Comparando as curvas apresentadas no Gráfico 5.3, observa-se que alguns trechos apresentam uma diferença de consumo maior em relação à energia mínima do que outros. Segmentando o percurso em dez partes iguais é possível identificar exatamente onde o gasto energético é mais representativo, como mostra o Gráfico 5.5. Diante dos resultados, as seções 5, 8 e 9 destacam-se como as regiões onde esta diferença é mais relevante, concentrando 76% da energia consumida (simulada), além da energia mínima calculada. Assim, foi possível direcionar a análise da condução onde o ganho potencial é mais evidente.

Gráfico 5.5 - Comparativo do consumo energético ao longo do trecho de Carajás a Marabá



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O estudo realizado para fins de eficiência energética foi aplicado no padrão de condução dos trechos mais representativos, estes procedimentos estão evidenciados nos Quadros A.1, A.2, A.3, A.4 e A.5 localizados no ANEXO A, onde se pode identificar as seções marcadas em destaque, cujo intervalo do quilômetro 829 ao 813 diz respeito à seção 5, o intervalo do quilômetro 782 ao 766 representa a seção 8 e, do quilômetro 766 ao 750, a seção 9.

A seção 5 compreende um longo trecho de subida e um forte declive ao final do quilômetro 814, cujo procedimento operacional (Quadros A.1 e A.2 do ANEXO A) sustenta o máximo de aceleração em todas as locomotivas durante a subida, o que evidencia um alto gasto energético, visto no Gráfico 5.5. Segundo Andrade e Santana (2018), para se obter uma redução no consumo energético é necessária a realização

da operação aproveitando ao máximo a inércia do trem. Assim, foram realizadas simulações de forma a avaliar a força mínima necessária para transposição deste percurso, a fim de manter uma velocidade média, utilizando em menor intensidade o uso do freio dinâmico, como forma de obtenção de ganho de velocidade no perfil descendente (Gráfico 5.6(a)).

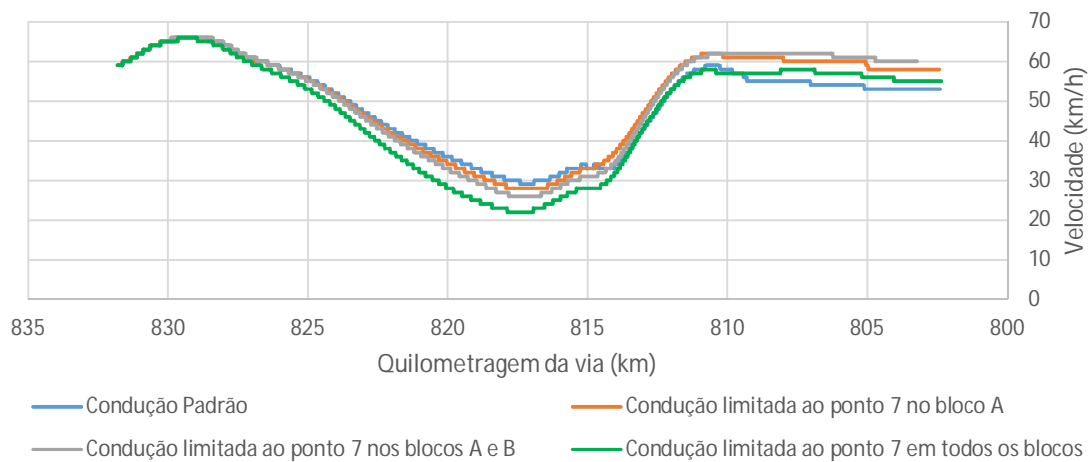
A seção 8 evidenciada nos Quadros A.3 e A.4 do ANEXO A compreende um perfil descendente, um logo trecho plano e uma rampa suave ao final do percurso, onde fica evidenciado no padrão de condução o uso de elevados pontos de aceleração no trecho plano e a ausência do balanceamento do trem em ambas as inversões de perfil presentes nos quilômetros 782 e 770 da via.

De acordo com Andrade e Santana (2018), o balanceamento do trem deve ser feito em toda inversão de perfil, para que a operação seja a mais econômica possível, utilizando ao máximo a energia potencial presente na composição.

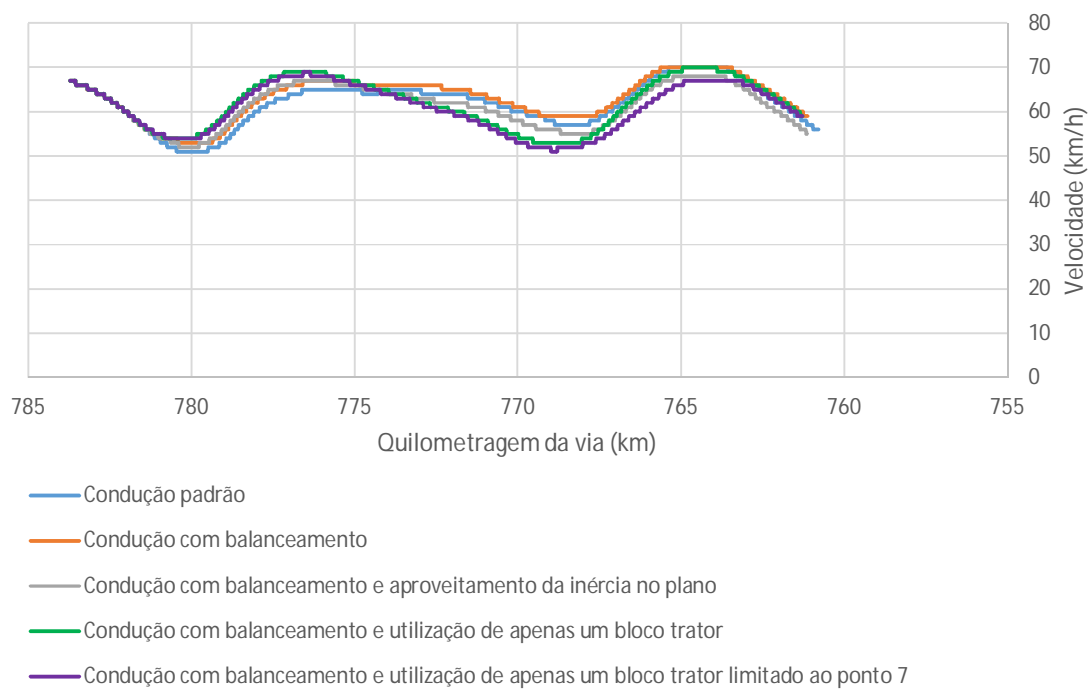
Deste modo, foram realizadas 4 simulações em busca de aplicar os conceitos de balanceamento e aproveitamento de inércia durante a condução na seção 8, e cada uma das propostas tem como premissa a manutenção da velocidade média de transposição para que esta alteração não gere impacto na circulação original de trens mostradas no Gráfico 5.6(b).

A última seção analisada apresenta um perfil ondulado (seção 9), com um vale e duas cristas, na qual também foi aplicado o balanceamento da composição de forma a aprimorar o procedimento padrão de condução. As simulações realizadas contemplam o balanceamento nas inversões de perfil e a redução de aceleração utilizando a inércia da composição de forma mais eficiente (Gráfico 5.6(c)).

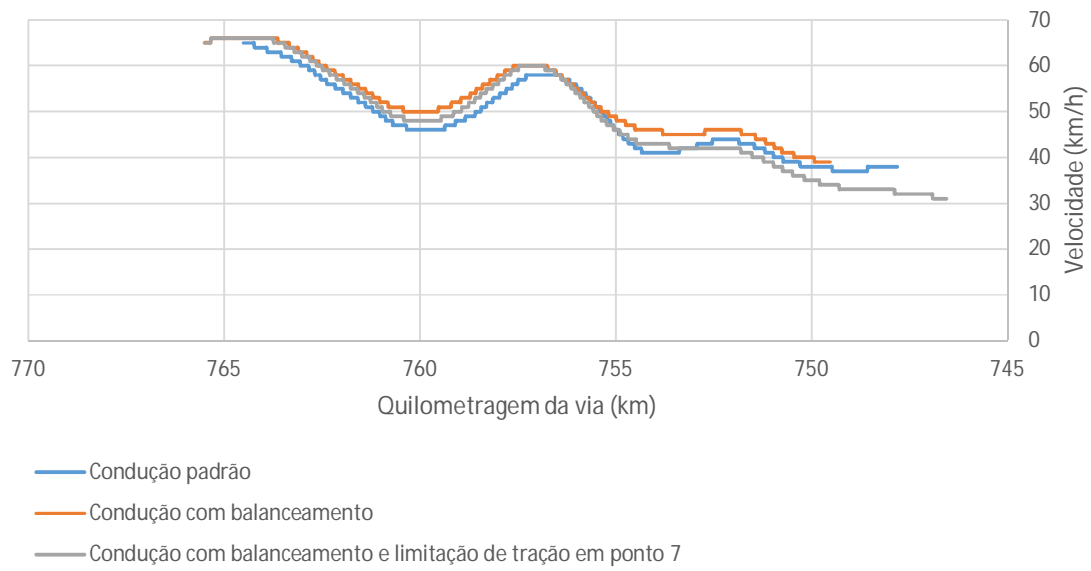
Gráfico 5.6 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9



(a)



(b)



(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Como visto no Gráfico 5.6, é possível transpor o relevo utilizando menos força tratora das locomotivas, executando o balanceamento dos trens e o aproveitamento da inércia. Porém uma análise detalhada deve ser realizada para validar a condução mais econômica em termos energéticos.

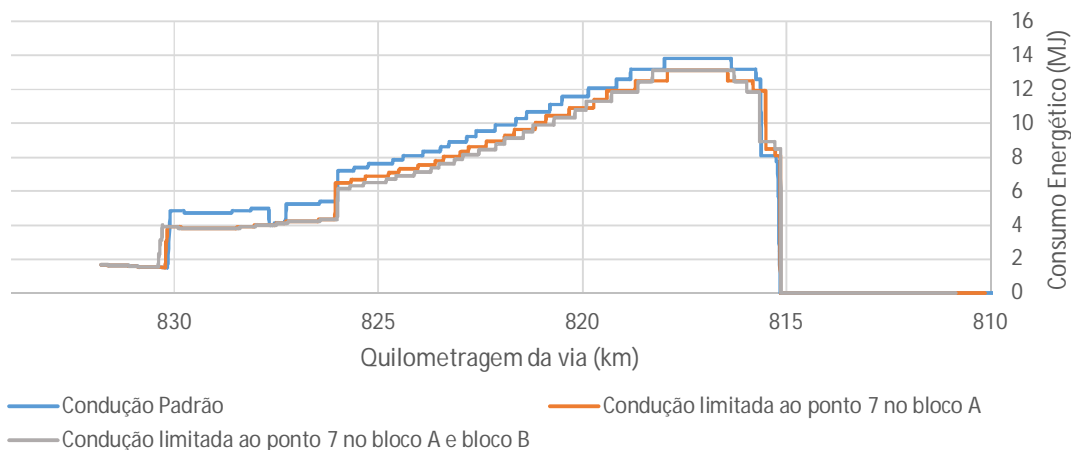
Nas simulações realizadas na seção 5, em comparação com a condução padrão, a composição obteve uma velocidade média igual ou superior, exceto pela simulação em que todos os blocos tratores são limitados ao ponto 7 de aceleração, representada pela linha verde, cujo valor foi de 42,24 km/h, estando 8% abaixo do padrão, que é de 46,4 km/h, sendo esta opção descartada das análises posteriores.

Para avaliação da seção 8, diversas simulações resultaram em velocidades médias como especificado, exceto a simulação cujo maquinista utilizou apenas um bloco trator limitado ao ponto 7 de aceleração, representada pela linha de cor roxa, na qual apresentou 60,49 km/h, estando 2% abaixo do padrão, que é de 61,57 km/h, também considerada uma alternativa inválida.

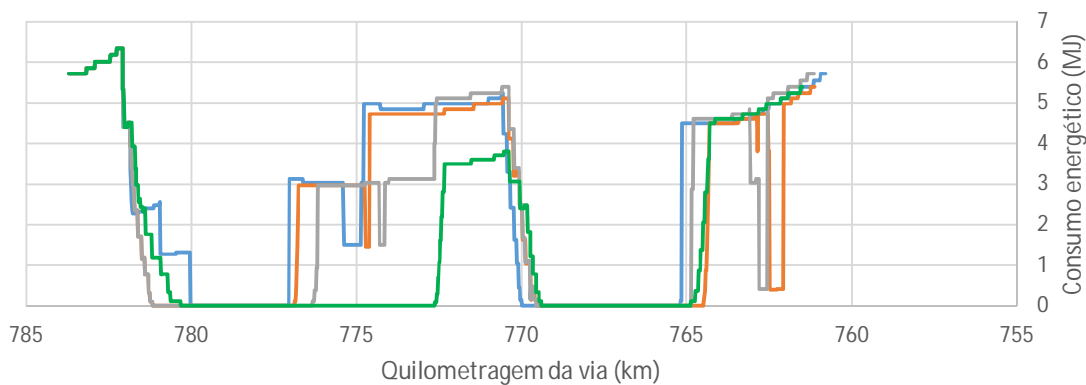
Por fim, a seção 9 apresentou duas propostas aplicando as mesmas técnicas descritas anteriormente. Porém, a segunda foi realizada tendo o ponto 7 como limite máximo de tração, e não apresentou um desempenho satisfatório como a primeira, por resultar em uma velocidade média de 45,6 km/h (5,5% abaixo do padrão de 48,25 km/h).

De forma a avaliar a redução do consumo energético destes casos, o Gráfico 5.7 foi obtido por meio dos dados das simulações.

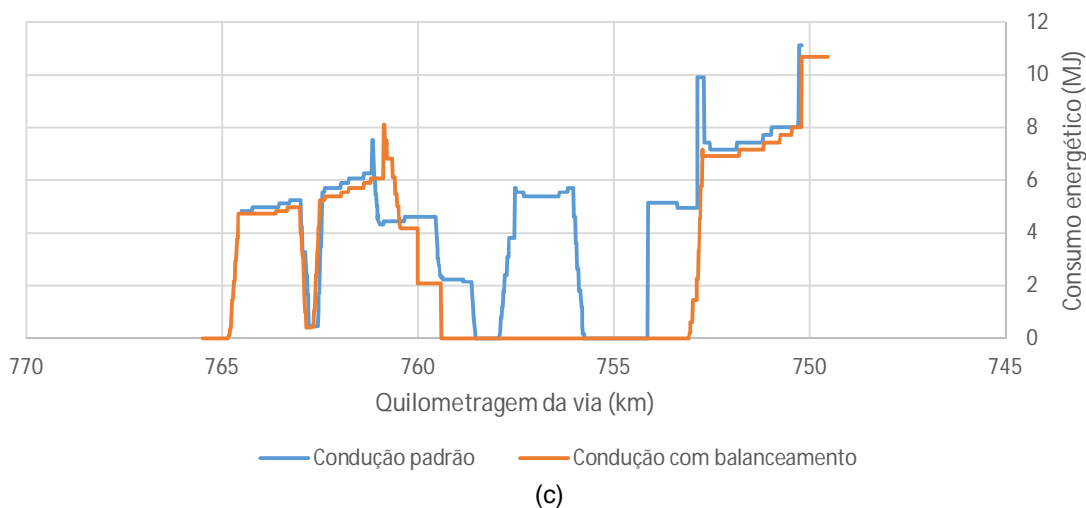
Gráfico 5.7 – Comparação do consumo energético em cada simulação das (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9



(a)



(b)



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

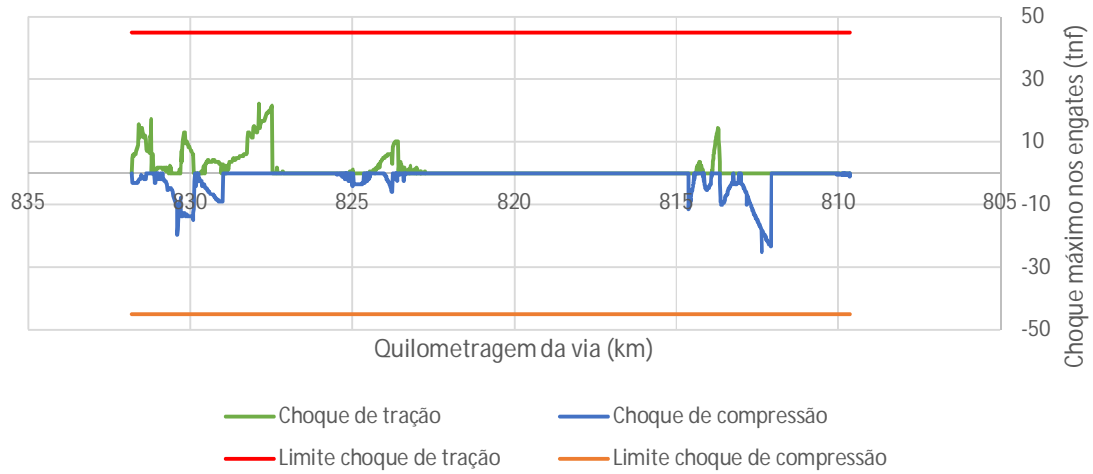
O Gráfico 5.7 evidencia os consumos instantâneos para cada simulação, de forma a proporcionar a comparação entre as diversas propostas. Para a seção 5, a condução limitada ao ponto 7 nos blocos A e B, representada pela curva cinza do Gráfico 5.7(a), foi a alternativa que apresentou o menor consumo energético, com um total de 12.684,29 MJ, sendo 16,6% menor que a condução padrão, que consumiu 15.208,36 MJ.

Analisando o Gráfico 5.7(b), referente à seção 8, a condução padrão apresentou um consumo total de 4.070 MJ e, por meio das simulações realizadas, foi possível obter a maior redução no consumo total, equivalente a 44,8%, considerando-se a aplicação do balanceamento do trem nas duas rampas, o aproveitamento da inércia do trem no trecho plano e a utilização apenas da tração do bloco A para transposição da segunda rampa, a qual apresentou um consumo de 2.246 MJ, representada pela curva verde no referido gráfico.

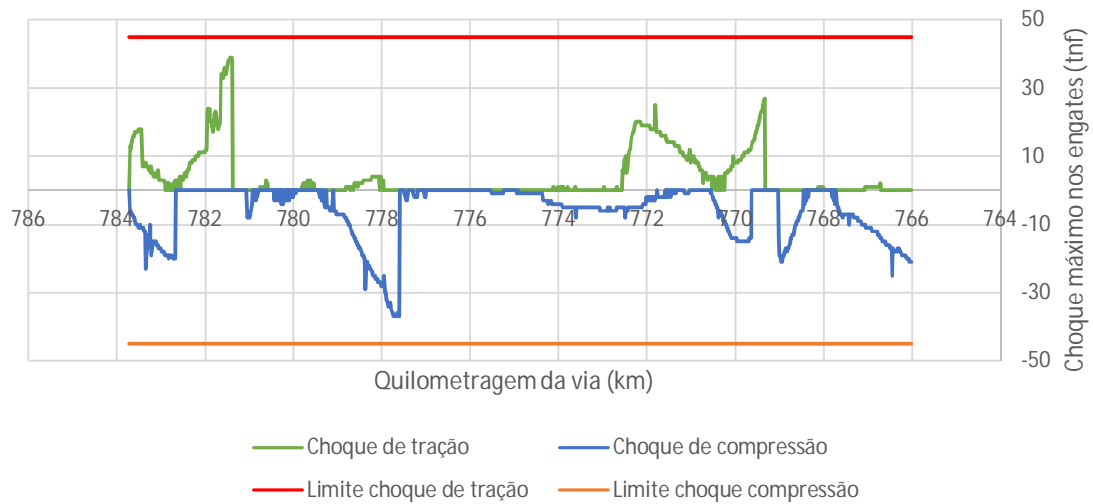
A seção 9, cujos resultados das simulações estão ilustrados no Gráfico 5.7(c), apresentou um consumo total de 3.914,49 MJ considerando-se a condução proposta, reduzindo em 30,69% o padrão, que é de 5.647,87 MJ (curva laranja).

Para garantir a segurança da operação e a estabilidade dos trens, é também necessária a avaliação da intensidade de choques e esforços nos engates durante as operações propostas, evidenciadas nos Gráfico 5.8 e Gráfico 5.9.

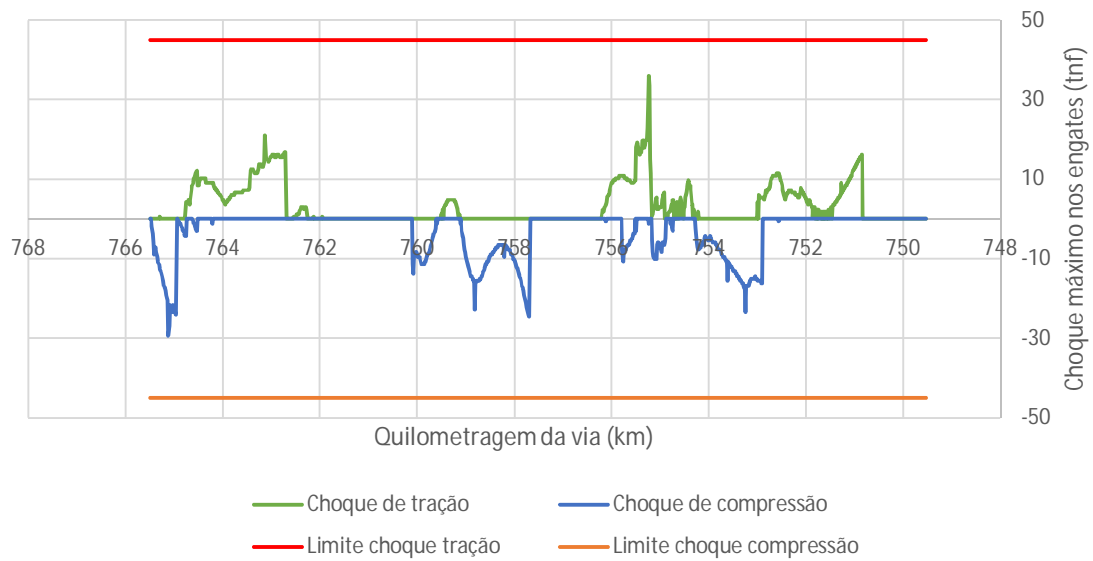
Gráfico 5.8 - Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações de menor consumo energético nas (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9



(a)



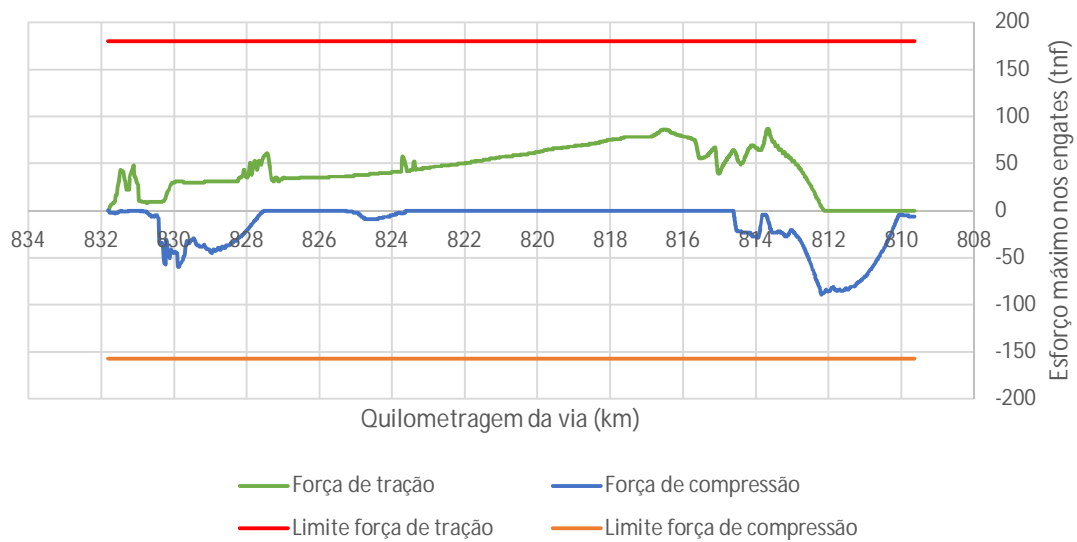
(b)



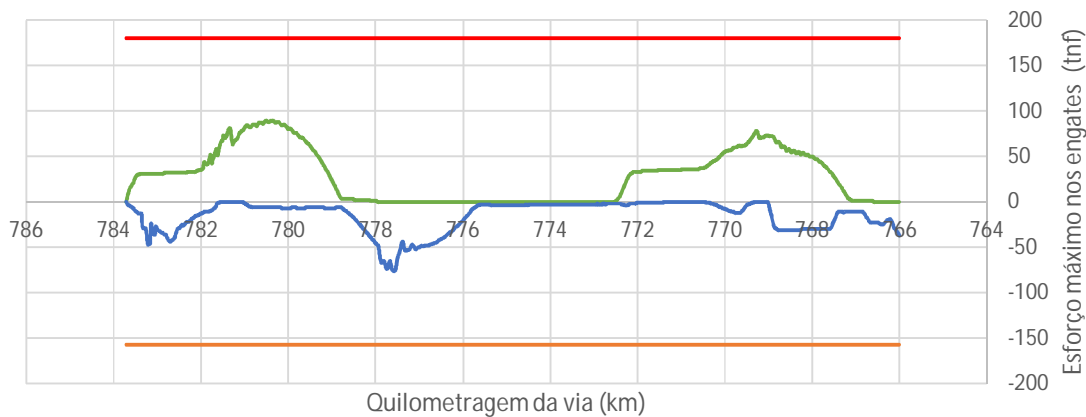
(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 5.9 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante a simulações de menor consumo energético nas (a) seção 5, (b) seção 8 e (c) seção 9

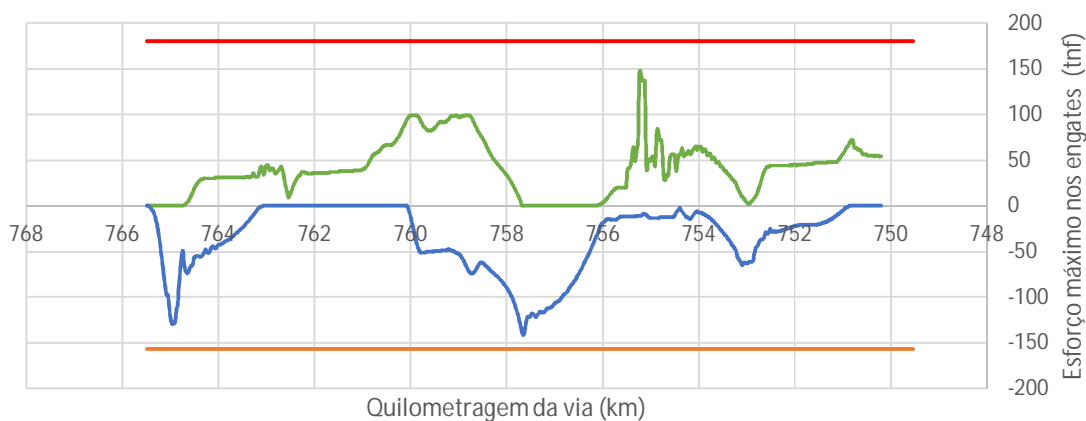


(a)



— Força de tração — Força de compressão
 — Limite força de compressão — Limite força de compressão

(b)



— Força de Tração — Força de Compressão
 — Limite força de compressão — Limite força de compressão

(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Por meio dos valores plotados, é possível garantir a viabilidade das operações propostas, pois os valores de choques, em todos os casos, são inferiores a 45 toneladas força, que é o limite estipulado pela AAR, e os esforços não ultrapassam 180 toneladas força de tração nem 142 toneladas força de compressão, definidos como valores limite pela engenharia da Vale S.A. juntamente com os fabricantes dos engates (ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, 2008b; PEREIRA, 2010).

Como forma de consolidar a melhoria operacional proposta, a Tabela 5.1 apresenta um resumo das informações obtidas nas simulações, juntamente com o consumo de combustível equivalente a cada uma das operações analisadas.

Tabela 5.1 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Carajás a Marabá

Seção	Tipo de Condução	Consumo Energético (MJ)	Redução do Consumo Energético	Consumo de Combustível (L)	Redução do Consumo de Combustível	Eficiência Energética (L/ktkb)
5	Padrão	15.208,36	16,60%	1153,00	14,83%	1,97
	Aprimorada	12.684,29		982,00		1,68
8	Padrão	4.070,45	44,71%	329,00	34,35%	0,56
	Aprimorada	2.250,75		216,00		0,37
9	Padrão	5.647,87	30,69%	409,00	14,18%	0,70
	Aprimorada	3.914,49		351,00		0,60
Total	Padrão	56.193,39	10,81%	3826,00	8,94%	0,70
	Aprimorada	50.116,24		3484,00		0,63

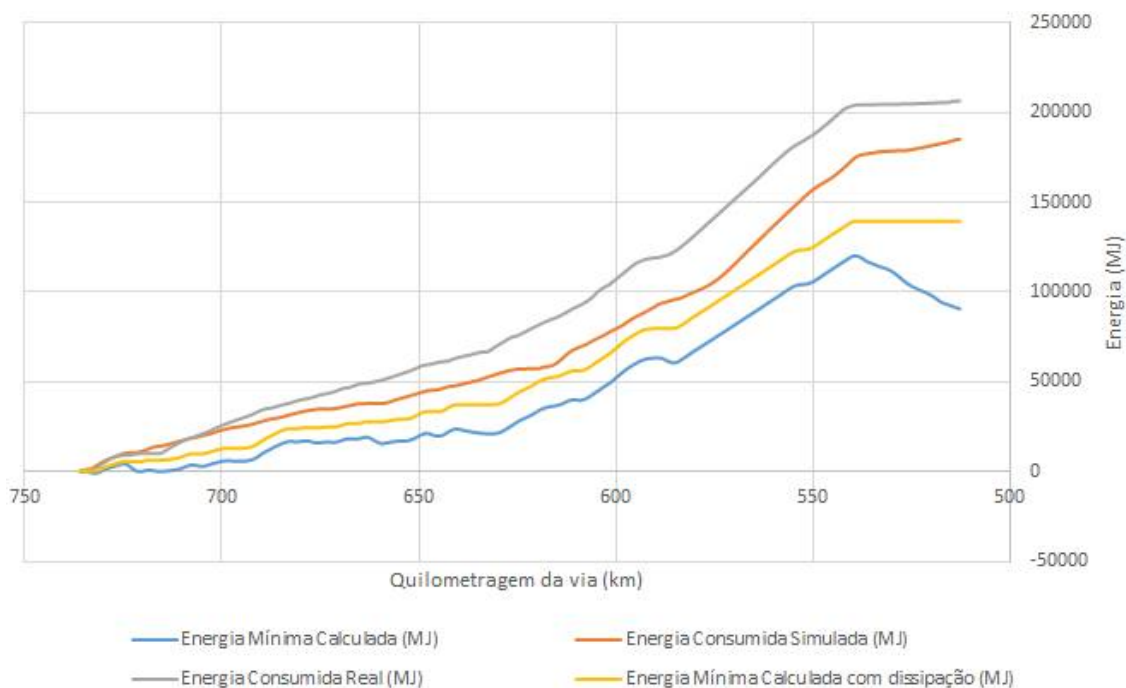
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

A partir dos dados dispostos foi possível comprovar a viabilidade das três propostas de revisão do modelo operacional no trecho de Carajás a Marabá para os trens carregados de minério de ferro. A melhoria na eficiência energética do trecho passou de 0,70 L/ktkb para 0,63 L/ktkb, significando uma economia de 342 litros de diesel por viagem realizada.

5.2 ANÁLISE DO TRECHO DE MARABÁ A AÇAILÂNDIA

Seguindo com a análise da EFC, foi utilizado o Gráfico 5.10 para comparação dos valores de consumo energético de Marabá até a chegada ao pátio de Açailândia.

Gráfico 5.10 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Marabá a Açailândia



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O perfil altimétrico, nesta parte da ferrovia, pode ser visto no Gráfico 5.11 como forma de estabelecer um parâmetro comparativo com o gasto energético apresentado.

Gráfico 5.11 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Marabá até Açailândia



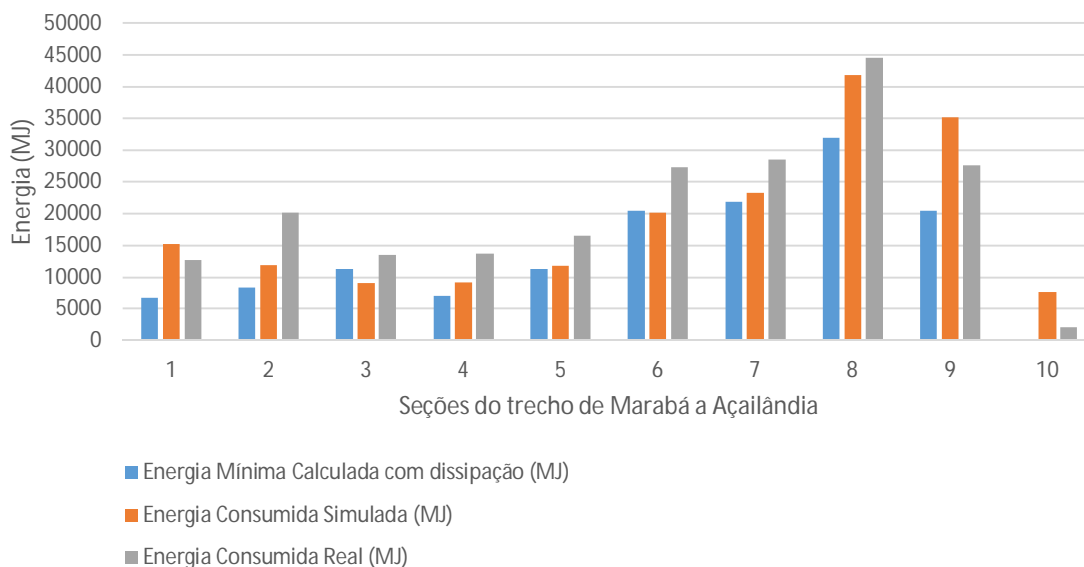
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Três viagens foram realizadas de Marabá, localizada no quilômetro 735,8, até Açailândia, no quilômetro 512,8 para que os valores do consumo energético real, nesta parte do percurso, fossem obtidos, cujos arquivos de dados foram extraídos das locomotivas presentes nas viagens selecionadas.

As viagens escolhidas aconteceram nos dias 07 de janeiro, pela composição de prefixo M008, no dia 11 de janeiro, pela composição de prefixo M404, e no dia 07 de julho, pela composição de prefixo M196, todas no ano de 2019, e que contemplaram as premissas estabelecidas no Capítulo 4.

Observou-se, nos citados arquivos, que alguns trechos apresentam consumos maiores, em relação à energia mínima, do que outros. Deste modo, o percurso foi segmentado em dez partes iguais para identificar exatamente onde estes valores são mais representativos, como mostra o Gráfico 5.12. Diante dos resultados, os segmentos 1, 8 e 9 se destacam como as regiões onde a diferença de consumo é mais relevante, concentrando 72% da energia consumida além da energia mínima calculada. Assim, foi possível aplicar o foco da análise da condução de forma a reduzir seu consumo energético.

Gráfico 5.12 - Comparativo de consumo energético ao longo do trecho de Marabá a Açailândia



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

De forma a identificar oportunidades de melhoria no padrão de operação estabelecido pela engenharia da Vale S.A. no trecho em questão, foram analisados os Quadros B.1 a B.5 do ANEXO B, onde os intervalos destacados representam as seções escolhidas, cujo intervalo do quilômetro 735 ao 713 se refere à seção 1 e o intervalo do quilômetro 579 ao 535, às seções 8 e 9.

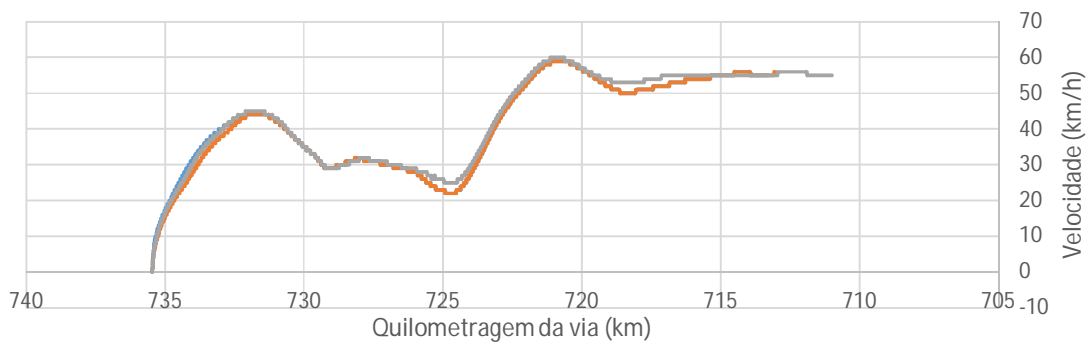
A seção 1 deste trecho da EFC foi a primeira escolhida entre as demais por seu gasto energético real elevado em relação ao mínimo calculado (Gráfico 5.12). Esta seção contempla a saída da estação de Marabá, onde o trem inicia sua viagem partindo do repouso, e contém um longo percurso ascendente, um perfil descendente bem acentuado seguido por um percurso pouco acidentado e sem curvas.

O procedimento padrão, analisado de forma detalhada, não propicia a arrancada da estação de forma econômica, como descrita no trabalho de Andrade e Santana (2018), nem o balanceamento da composição na inversão de perfil do quilômetro 717. Para que este percurso seja melhorado, foram realizadas algumas simulações implementando, primeiramente, a arrancada da composição com incremento gradativo de aceleração e, em seguida, a realização do balanceamento ao transpor o quilômetro 717 aproveitando a inércia da composição no perfil descendente, como mostra o Gráfico 5.13(a).

Pela proximidade entre as seções 8 e 9 e por possuírem um modelo de condução muito similar, estas serão analisadas em conjunto, a fim de se obter melhorias operacionais. Este percurso, em especial, contempla a operação do *helper*, locomotiva auxiliar que permite que o trem ultrapasse perfis muito íngremes e/ou acidentados, cuja operação padrão utiliza o esforço total de todas as locomotivas disponíveis ao longo da rampa ascendente.

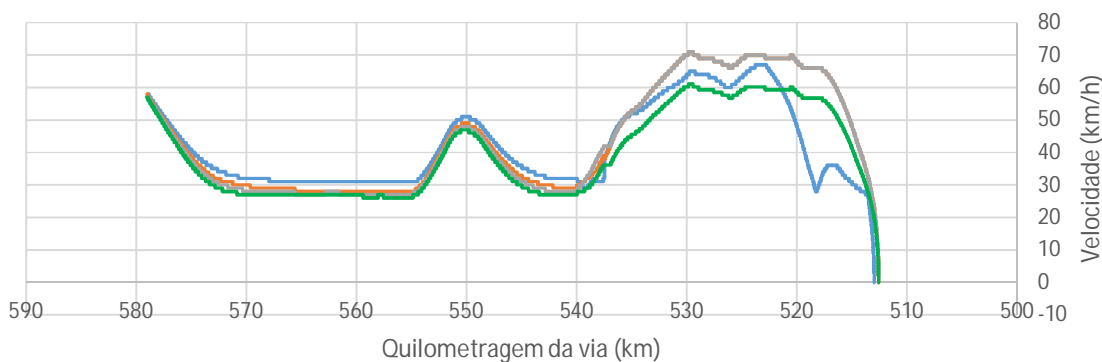
Um aspecto que pode ser observado é o balanceamento correto da composição na inversão de perfil no quilômetro 540, estipulado no procedimento padrão, o que não oferece nenhuma oportunidade de melhoria operacional além da tentativa de redução de esforço trator em prol da redução do consumo energético, isto se a velocidade média puder ser recuperada ao longo do perfil descendente. Esta análise pode ser feita com o auxílio do Gráfico 5.13(b).

Gráfico 5.13 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9



- Condução Padrão
- Condução com arrancada suave
- Condução com arrancada suave e balanceamento

(a)



- Condução Padrão
- Condução limitada ao ponto 7 no helper
- Condução limitada ao ponto 7 nos blocos C e helper
- Condução limitada ao ponto 7 em nos blocos B, C e helper

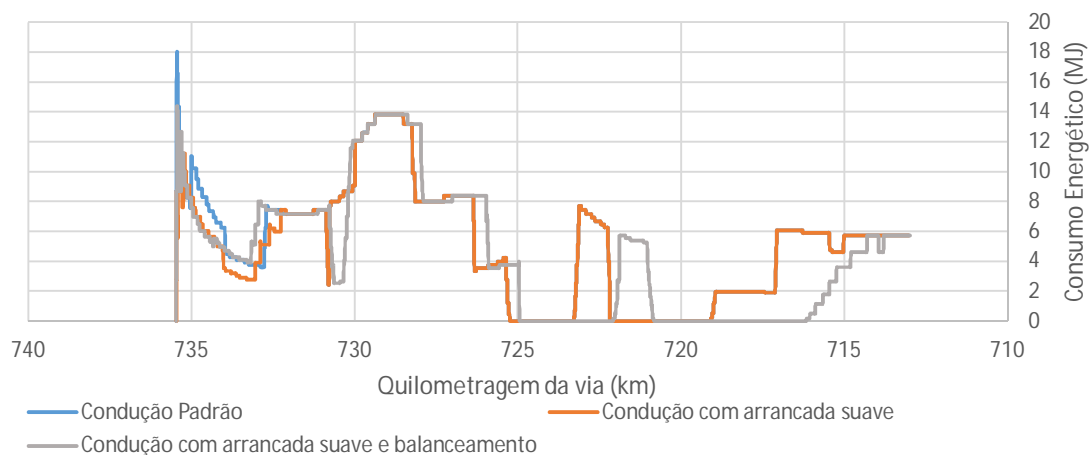
(b)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

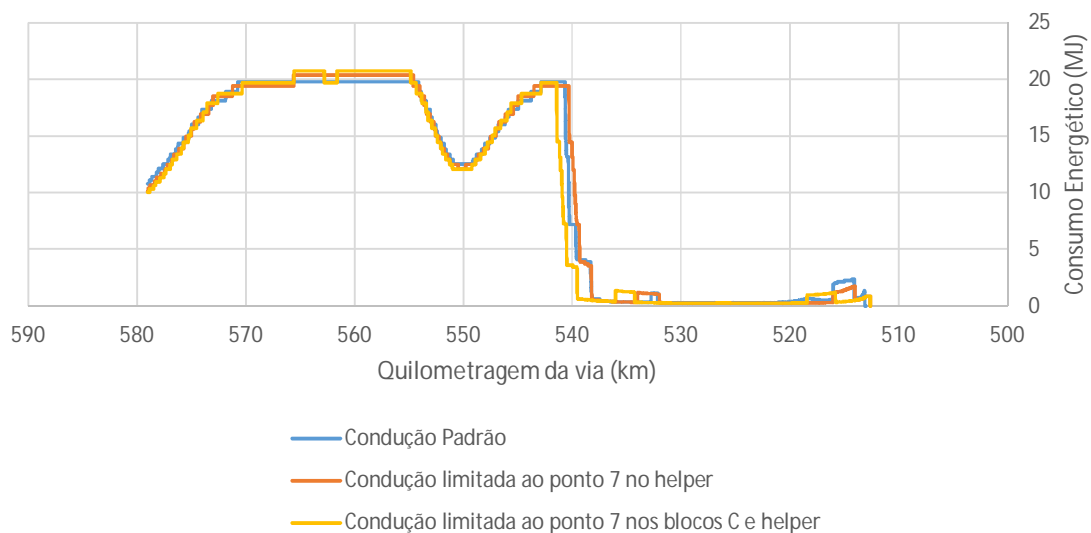
O Gráfico 5.13(a) evidencia que é possível implantar as melhorias operacionais na arrancada das composições do pátio de Marabá e realizar o balanceamento ao longo da seção 1 sem reduzir o tempo de percurso em ambas as simulações. O padrão de condução proporciona uma velocidade média de 37,47 km/h nesta seção. De forma comparativa a simulação apenas com a arrancada suave apresentou a velocidade média em 37,48 km/h (curva em laranja) e a simulação aplicando também o balanceamento obteve velocidade média de 38,5 km/h (curva em cinza).

De todas as simulações mostradas no Gráfico 5.13(b), apenas a condução limitando ao ponto 7 os blocos remotos B, C e a locomotiva *helper* (curva em verde) apresentou a velocidade média de 36,3 km/h, inferior ao padrão que é de 39,4 km/h, equivalente a uma redução de 8%, sendo essa descartada dentre as soluções viáveis. As outras simulações apresentaram velocidade média equivalente à condução padrão, sendo de 40 km/h e 39,41 km/h, respectivamente, representadas pelas curvas em laranja e cinza no citado gráfico.

Gráfico 5.14 – Comparação do consumo energético de cada simulação para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9



(a)



(b)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Em virtude das curvas plotadas no Gráfico 5.14(a), percebe-se que foi possível reduzir o total de energia consumida nas operações propostas para a seção 1, de modo que a condução aplicando o balanceamento e a arrancada do pátio de Marabá de forma suave proporcionou uma diminuição de 14,2%, em relação à operação padrão, que consome 15.178,05 MJ e a nova proposta, apenas 13.022,39 MJ.

Observando-se o Gráfico 5.14(b), que ilustra que o consumo energético nas seções 8 e 9 para cada uma das três operações, verifica-se que o mesmo é muito próximo. Ou seja, numa análise quantitativa, as duas propostas de redução do esforço trator não apresentaram ganhos a favor da eficiência energética, pelo contrário, ambas consumiram mais energia que a operação padrão, cujo impacto foi menor na limitação do esforço trator na locomotiva *helper*, gerando um consumo 6,02% maior.

Por outro lado, em função da topografia do terreno e das condições operacionais, não foi possível aplicar nenhuma das técnicas apresentadas por Andrade (2017) ou *United States of America* (2014). Assim, a simples redução do esforço trator não é uma solução eficiente para ser aplicada em perfis ascendentes, em virtude do acréscimo de tempo em que as locomotivas necessitam estar em modo de aceleração.

Esta constatação é reforçada quando se analisa o desempenho da locomotiva utilizada em função de cada ponto de aceleração, como mostra a Quadro 5.1.

Quadro 5.1 - Consumo e eficiência da locomotiva Dash 9 da EFC em relação a cada ponto de aceleração

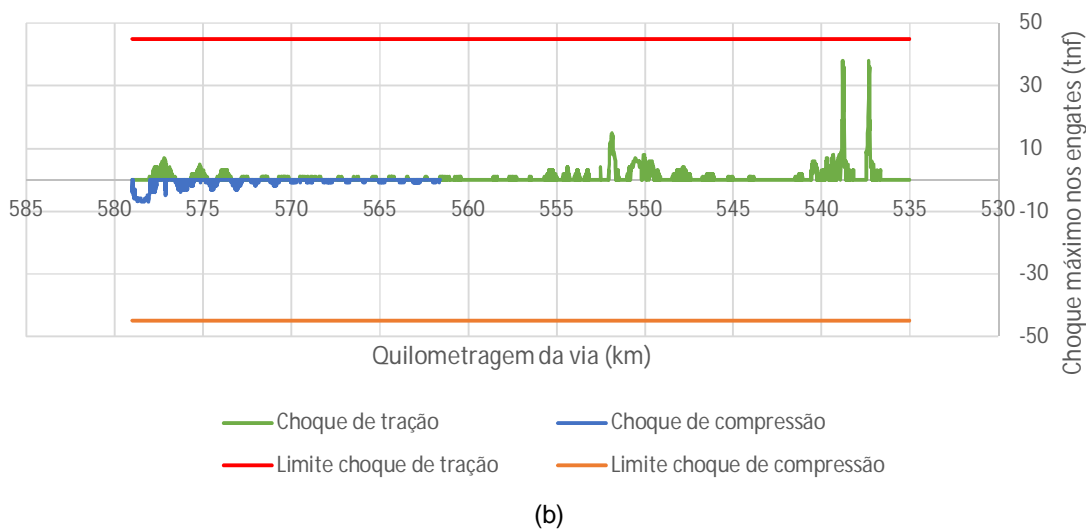
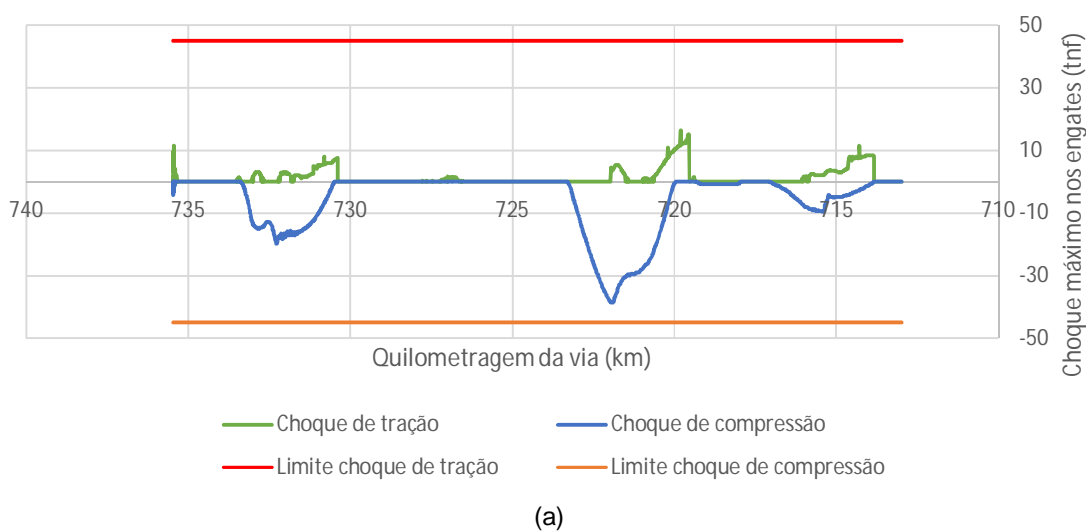
Ponto	Consumo (L/h)	Eficiência (L/HP.h)
<i>Low Idle</i>	10,598	1,063
<i>Idle</i>	10,598	0,981
# 1	43,906	0,224
# 2	100,303	0,209
# 3	202,876	0,202
# 4	285,011	0,194
# 5	395,533	0,189
# 6	501,134	0,182
# 7	610,142	0,177
# 8	801,285	0,175

Fonte: Parreira (2014).

Fica evidente que a eficiência dos pontos mais altos é melhor, pois consegue aplicar a potência solicitada nas rodas a um gasto menor de combustível, principalmente nos casos em que a potência entregue é totalmente utilizada em função da forte rampa ascendente deste perfil.

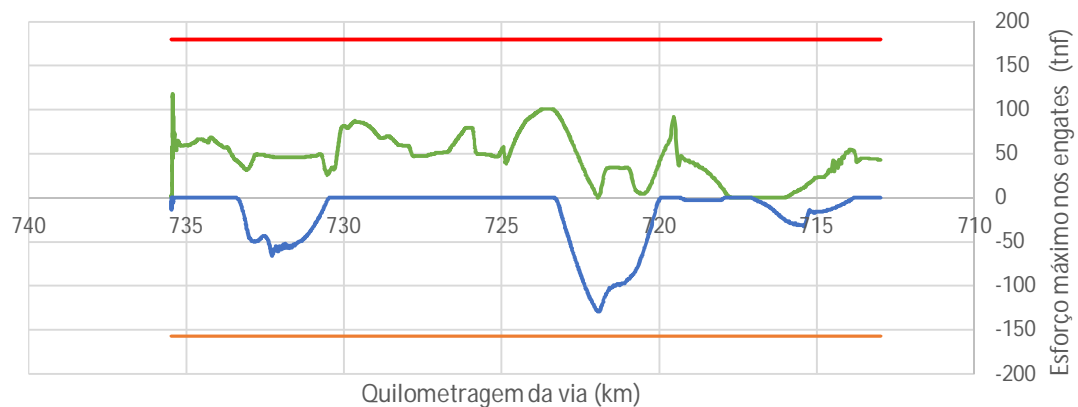
Assim, não foi possível apresentar uma solução mais eficiente para as seções 8 e 9 deste trecho baseando-se na metodologia adotada para este trabalho.

Gráfico 5.15 – Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9



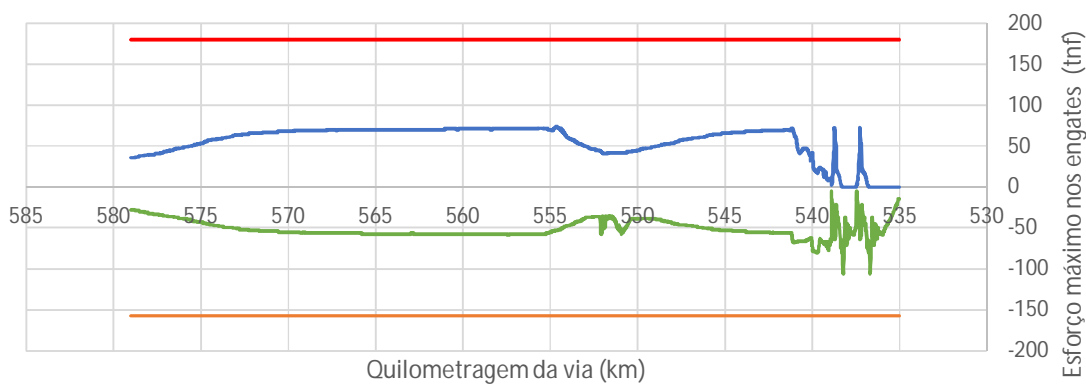
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 5.16 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1 e (b) seções 8 e 9



— Força de tração — Força de compressão
 — Limite força de tração — Limite força de compressão

(a)



— Força de tração — Força de compressão
 — Limite força de tração — Limite força de compressão

(b)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Portanto, no que diz respeito à da intensidade de choques e esforços nos engates, com as informações do Gráfico 5.15 e do Gráfico 5.16, é possível afirmar que todas as simulações propostas para este trecho da via estão dentro dos parâmetros de segurança e estabilidade utilizados pela AAR e pela engenharia da Vale S.A. e poderiam ser implantadas sem nenhuma restrição nos casos em que a viabilidade econômica seja favorável.

Para consolidar as informações obtidas nas simulações, a Tabela 5.2 apresenta os dados de consumo energético e a equivalência deles no consumo de combustível em cada uma das seções analisadas.

Tabela 5.2 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Marabá a Açailândia

Seção	Tipo de Condução	Consumo Energético (MJ)	Redução do Consumo Energético	Consumo de Combustível (L)	Redução do Consumo de Combustível	Eficiência Energética (L/ktkb)
1	Padrão	15.178,05	14,20%	764,00	4,06%	0,97
	Aprimorada	13.022,39		733,00		0,93
8 e 9	Padrão	76.935,17	-6,02%	5.251,00	-3,24%	6,65
	Aprimorada	81.566,69		5.421,00		6,86
Total	Padrão	185.013,89	1,17%	12752,00	0,24%	1,615
	Aprimorada	182.858,24		12721,00		1,611

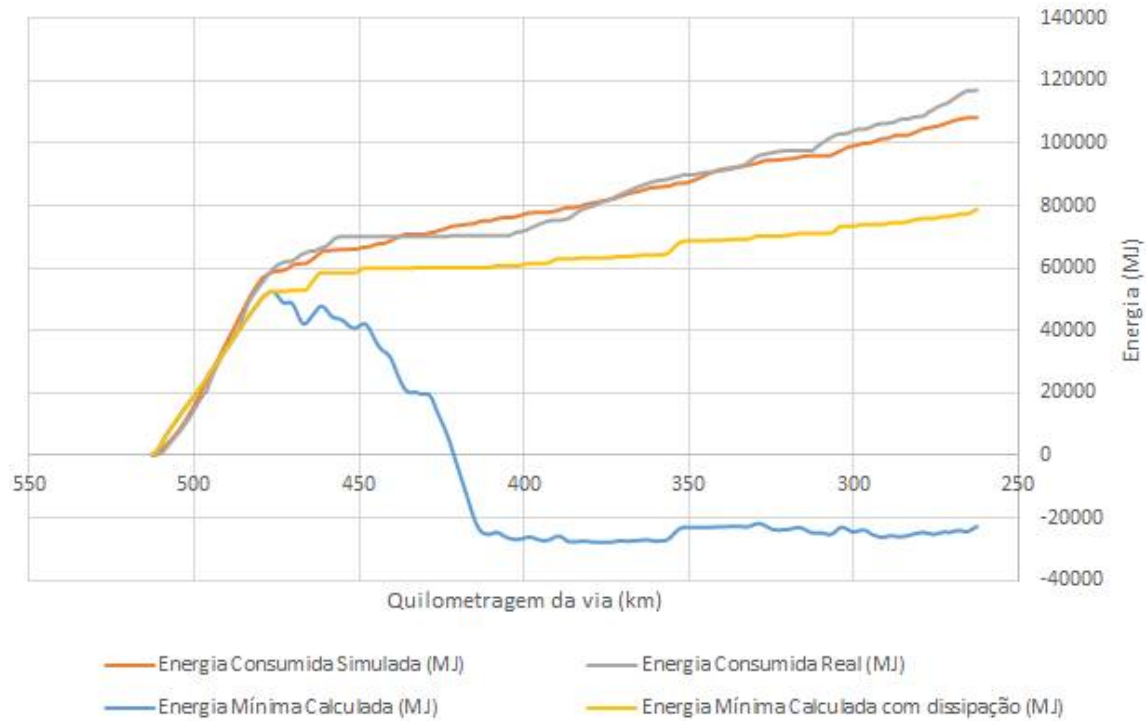
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Como resultado para o percurso entre Marabá e Açailândia, foi possível obter uma melhoria operacional implantando apenas a proposta para a seção 1, totalizando uma economia de 31 litros de combustível para cada viagem realizada entre estas localidades. Isso é traduzido em uma redução de 0,24% ao longo deste trecho, com a consequente melhoria na eficiência energética de 1,615 L/ktkb para 1,611 l/ktkb, visto que é o percurso com o maior consumo de toda a ferrovia.

5.3 ANÁLISE DO TRECHO DE AÇAILÂNDIA A ALTO ALEGRE

Os modelos operacionais aplicados entre as localidades de Açailândia e Alto Alegre foram também analisados segundo a metodologia adotada nos trechos da via avaliados anteriormente. Neste caso, os valores de consumo energético podem ser observados no Gráfico 5.17.

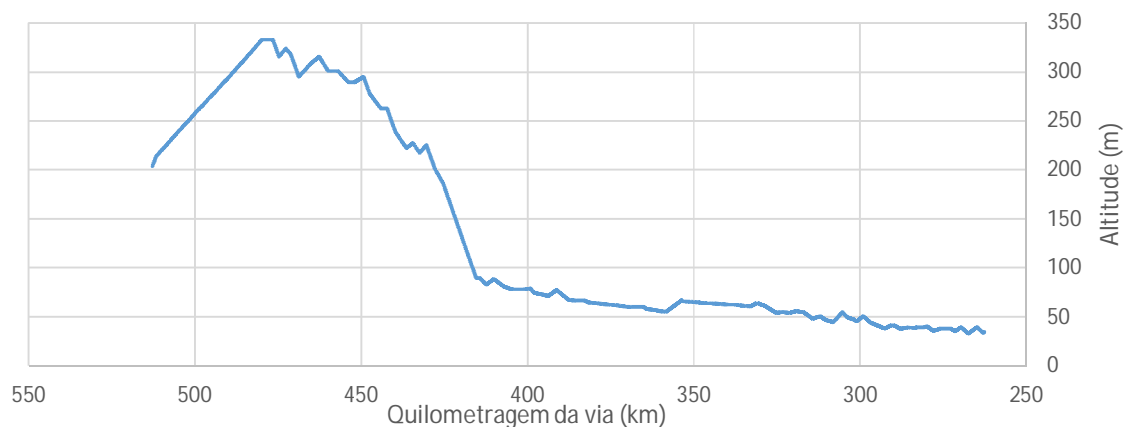
Gráfico 5.17 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Açailândia a Alto Alegre



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

No Gráfico 5.18 pode também ser observado o perfil altimétrico nesta parte da ferrovia para que seja levada em consideração a influência topográfica dos modelos operacionais utilizados.

Gráfico 5.18 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Açailândia até Alto Alegre



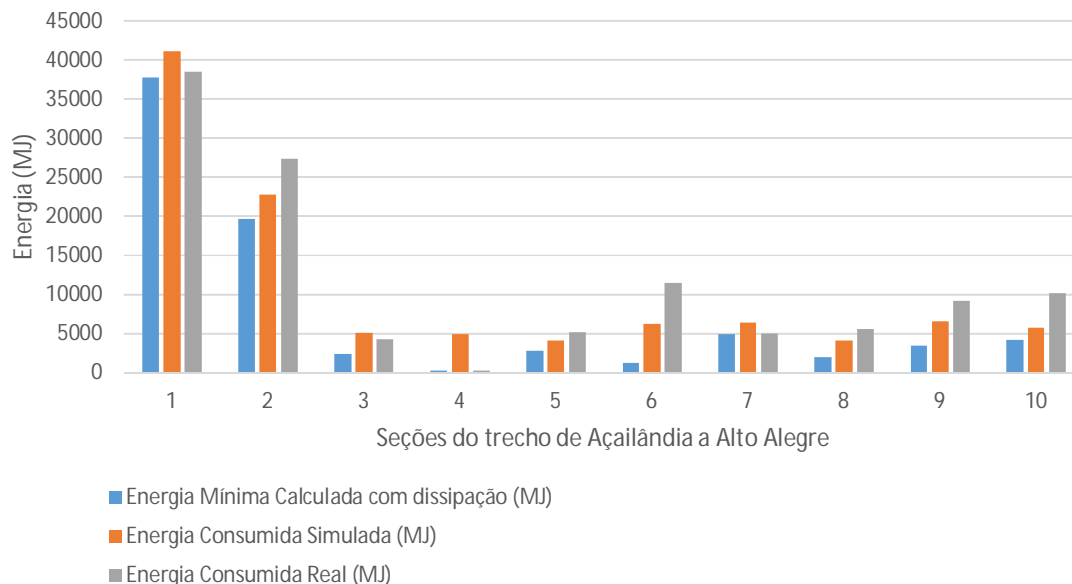
Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Por meio dos arquivos de três viagens realizadas de Açailândia, localizada no quilômetro 512,8, até Alto Alegre, no quilômetro 262,6, foram obtidos os valores do consumo energético real no trecho em questão. Tais arquivos de condução foram

obtidos através do *download* dos registradores embarcados nas locomotivas utilizadas nas viagens selecionadas, que ocorreram nos dias 13 de setembro, pela composição de prefixo M318, no dia 14 de setembro, pela composição de prefixo M164, e no dia 29 de setembro, pela composição de prefixo M180, todas no ano de 2019.

Após a segmentação da via em dez partes iguais, foi possível identificar exatamente onde as diferenças entre o consumo simulado e a energia mínima são mais representativas, como mostra o Gráfico 5.19. Diante dos resultados, os segmentos 1, 4 e 6 foram as seções onde essa diferença é mais relevante, concentrando 46% do total, atraindo o foco da análise nesta porção da estrada de ferro.

Gráfico 5.19 – Comparativo de consumo energético ao longo do trecho de Açailândia a Alto Alegre



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O padrão de operação deste trecho está descrito nos Quadros B.6 a B.12 do ANEXO B, e as seções em destaque compreendem do quilômetro 512,8 ao 487, representando a seção 1, do 437 ao 412,3, a seção 4, e do 387 ao 362, a seção 6.

A operação da primeira seção define a saída do trem do pátio de Açailândia e um longo percurso de rampa acentuada. Devido à característica do perfil altimétrico da via, não é possível identificar oportunidades de melhoria da condução, exceto na arrancada, quando pode ser aplicado o procedimento de arrancada suave apresentada por Andrade e Souza (2018), onde as mudanças de aceleração são

graduais e cadenciadas, de forma a executar o ganho de velocidade do trem suavemente, garantindo a eficiência da energia utilizada para a movimentação da carga.

Já a seção 4 apresenta um perfil essencialmente descendente, com exceção de um pequeno intervalo de rampa de dois quilômetros de extensão onde o procedimento indica 8 pontos de aceleração para vencê-la. Como forma de aproveitamento da inércia existente na composição, esta porção pode ser vencida sem o uso de tração das locomotivas, com o ganho de velocidade através da redução do uso do freio dinâmico nos trechos descendentes.

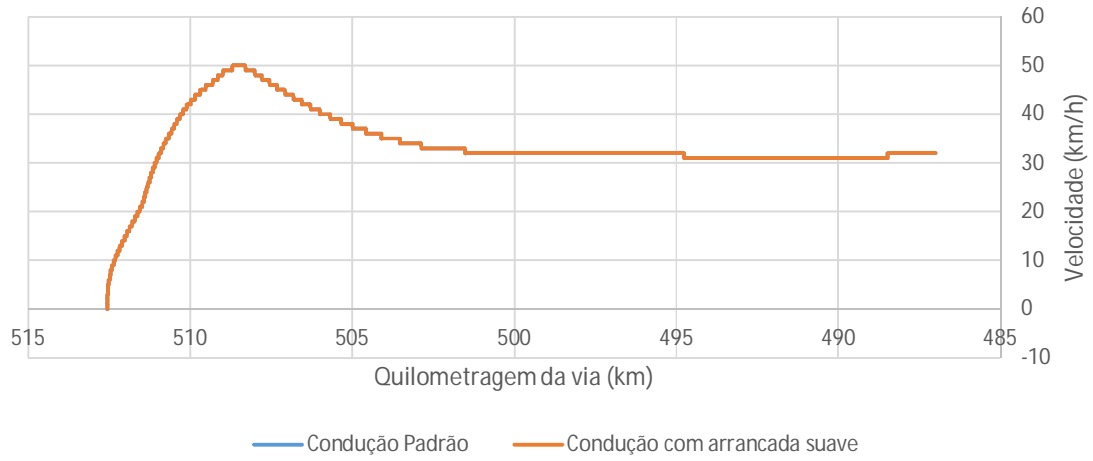
A última seção analisada neste trecho, seção 6, compreende um perfil quase plano, onde as rampas não superam 0,2% de inclinação. Sua operação é executada em sua totalidade tracionando os dois primeiros blocos tratores da composição. Ou seja, este perfil topográfico e sua condução padrão não destaca nenhuma oportunidade de melhoria com a utilização da metodologia aqui adotada.

Pode ser observado, porém, que o procedimento permite ao maquinista utilizar de dois a oito pontos de aceleração ao longo do trecho, de forma flexível, tentando buscar uma operação mais próxima à velocidade máxima autorizada (VMA) para trens carregados, de 70 km/h.

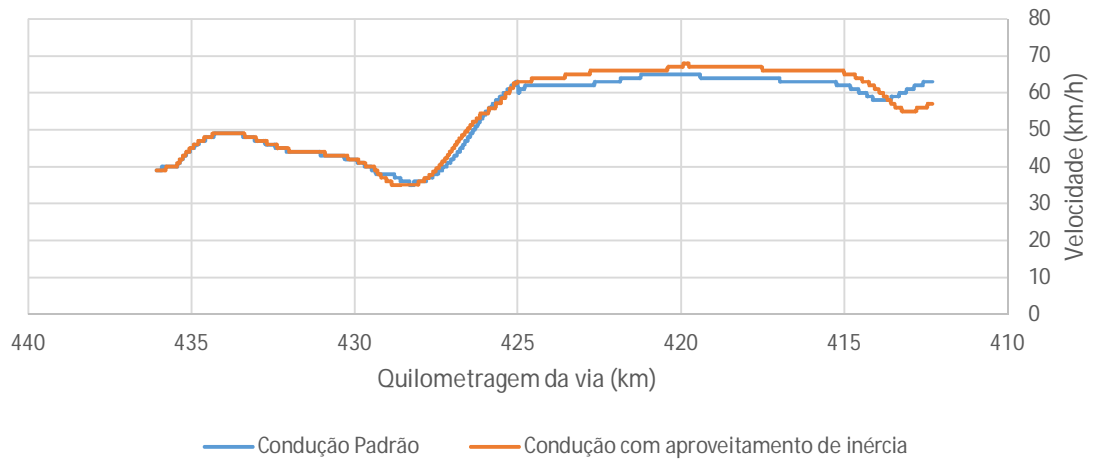
Assim, foram realizadas diversas simulações, limitando a aceleração máxima nos pontos 6, 5 e 4, já que as viagens reais coletadas não apresentaram utilização do ponto 8. Esta foi uma tentativa de reduzir o consumo energético, pois o consumo de combustível é crescente em função do uso de pontos mais altos de aceleração.

Por outro lado, todas as propostas simuladas (Gráfico 5.20) devem apresentar velocidades médias equivalentes ao procedimento padrão, para que o ciclo de carregamento não seja impactado ao longo da ferrovia, o que geraria outros custos colaterais a esta modificação.

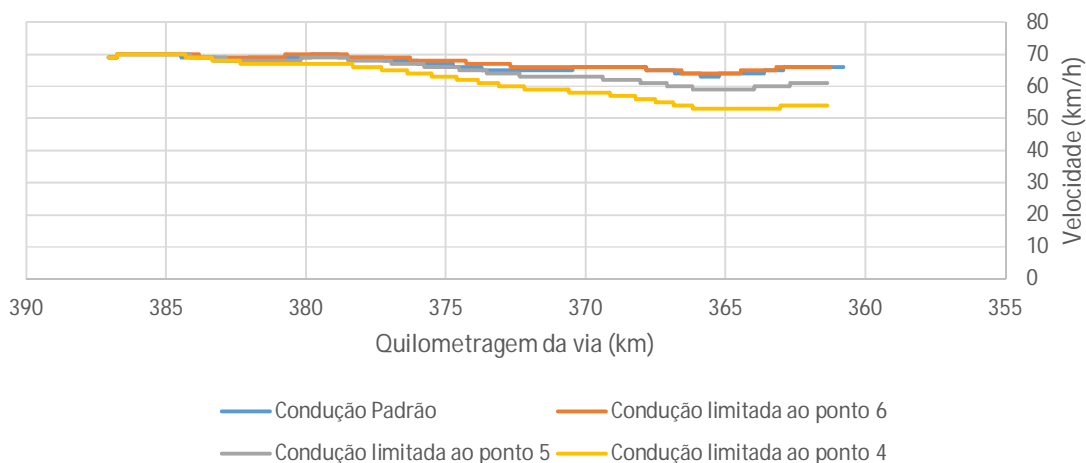
Gráfico 5.20 – Comparação da velocidade do trem em cada simulação realizada para as (a) seção 1, (b) seção 4 e seção 6 (c)



(a)



(b)



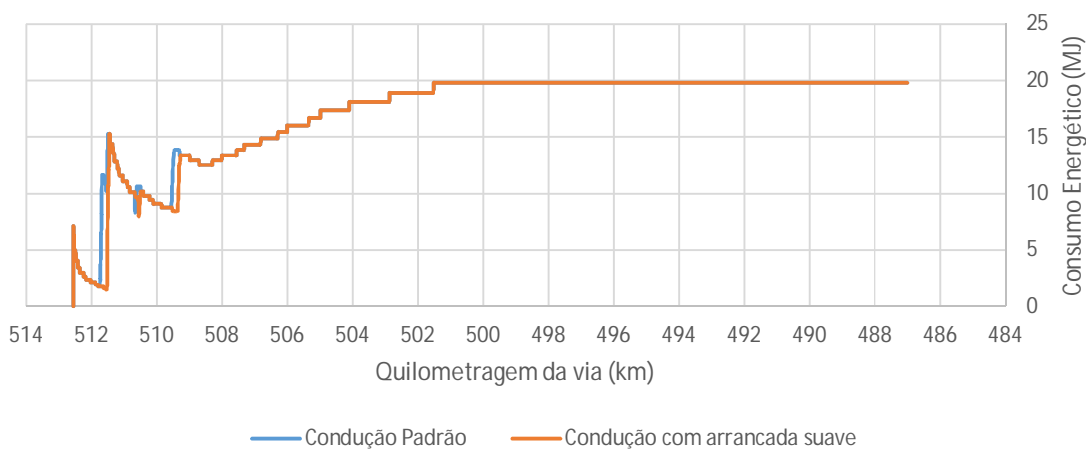
(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

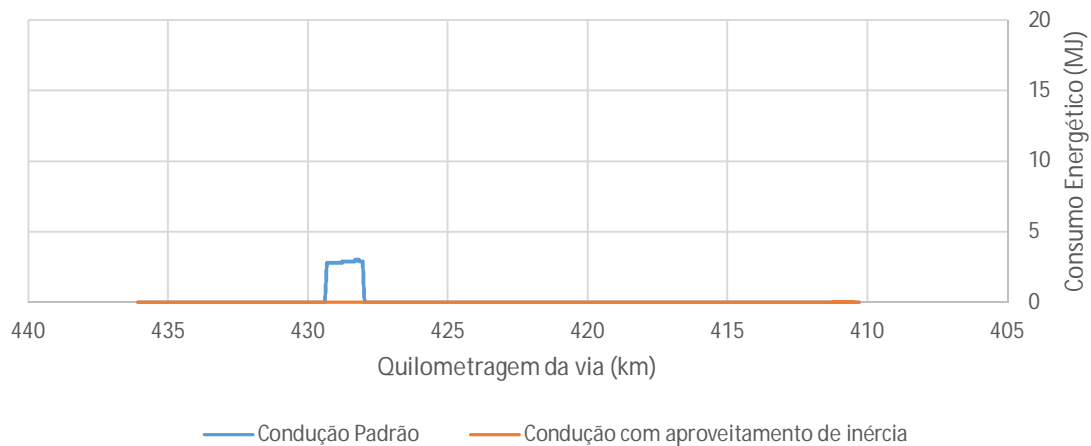
As opções de condução avaliadas para as seções 1 e 4, ilustradas nos Gráfico 5.20(a) e (b), respectivamente, apresentaram velocidades médias compatíveis com o procedimento padrão atual. Entretanto, as propostas para a seção 6, contidas no Gráfico 5.20(c), não atenderam à premissa de velocidade média, com exceção da curva em laranja, que obteve 66,9 km/h, superior ao padrão de 66,81 km/h.

Para a verificação do consumo energético, foi traçado o Gráfico 5.21 contendo apenas as propostas que atenderam à premissa anterior.

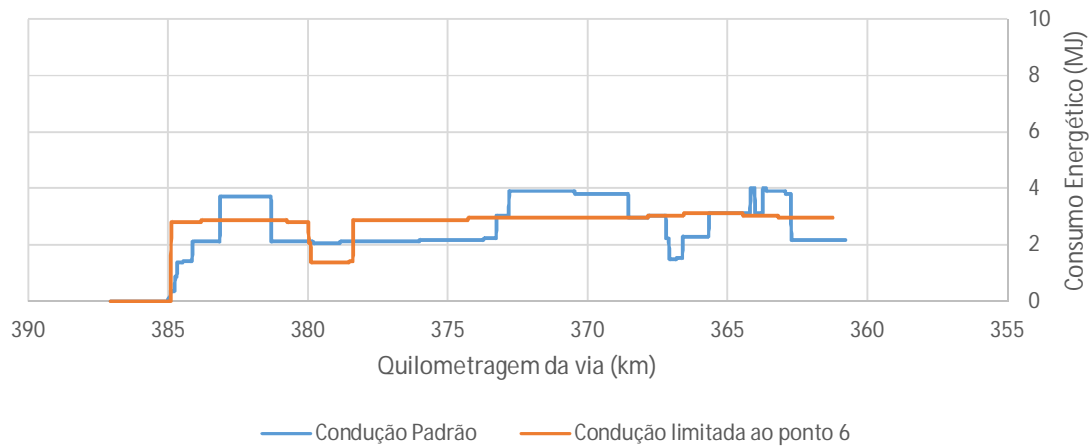
Gráfico 5.21 – Comparação do consumo energético de cada simulação para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6



(a)



(b)



(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

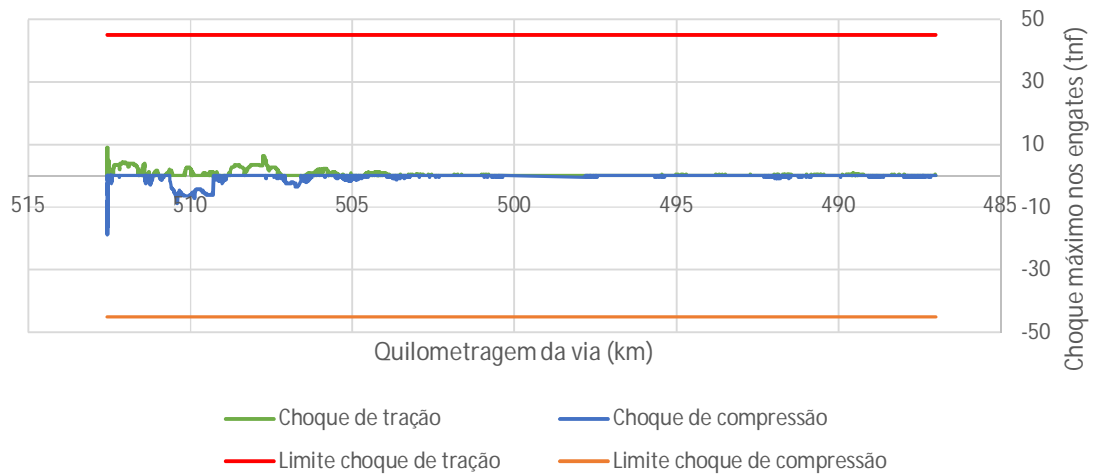
A proposta para a seção 1 (Gráfico 5.21(a)) apresentou uma redução de energia de 1,09% em virtude da revisão do procedimento de arrancada. Já no caso da seção 4, o Gráfico 5.21(b) mostra uma redução de 100% da energia consumida em virtude da proposta sugerir o percurso de toda a seção 4 sem o uso de força tratora das locomotivas.

Já o Gráfico 5.21(c) ilustra a operação de trens com a limitação máxima de 6 pontos de aceleração para transpor a seção 6, porém, o consumo total relativo à essa proposta apresentou um aumento de 1,05% de energia em relação ao padrão atual. Este caso reflete o mesmo comportamento apresentado no Gráfico 5.14(b), ou seja, a simples redução de força tratora nas locomotivas não é uma opção de melhoria na eficiência

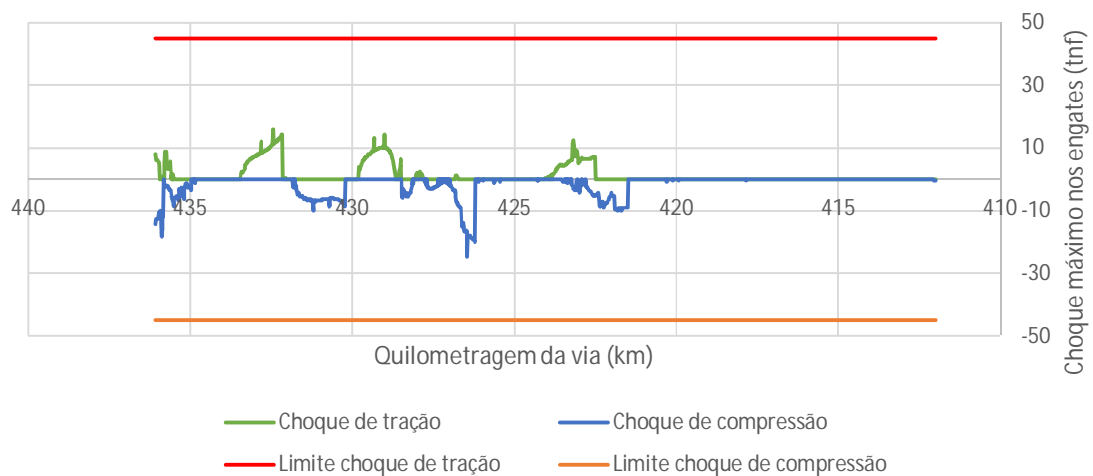
energética em nenhum tipo de perfil topográfico. Como esta seção não apresenta outra oportunidade de revisão do procedimento baseado na metodologia empregada neste trabalho, nenhuma modificação é sugerida para a sua operação.

A validação técnica das propostas apresentadas foi feita baseando-se na análise dos Gráfico 5.22 e Gráfico 5.23.

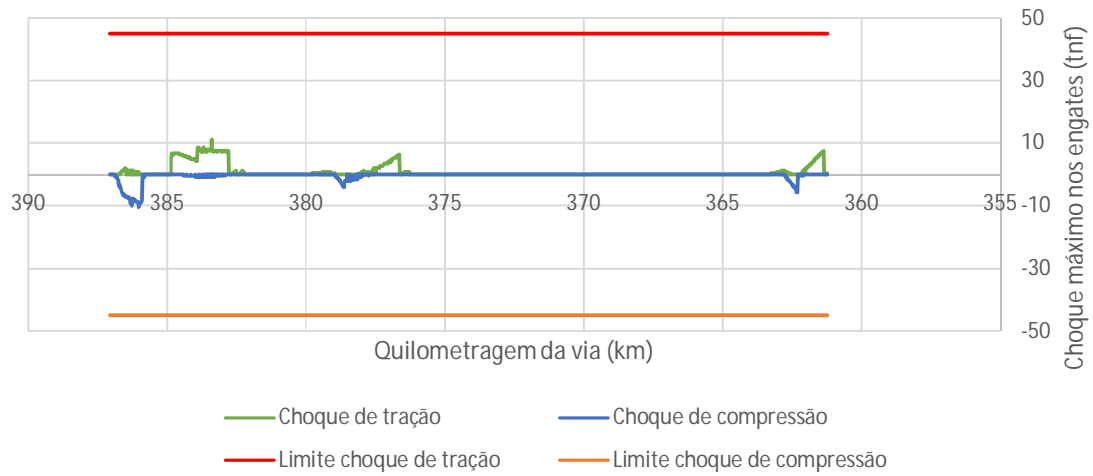
Gráfico 5.22 – Intensidade de choques máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6



(a)



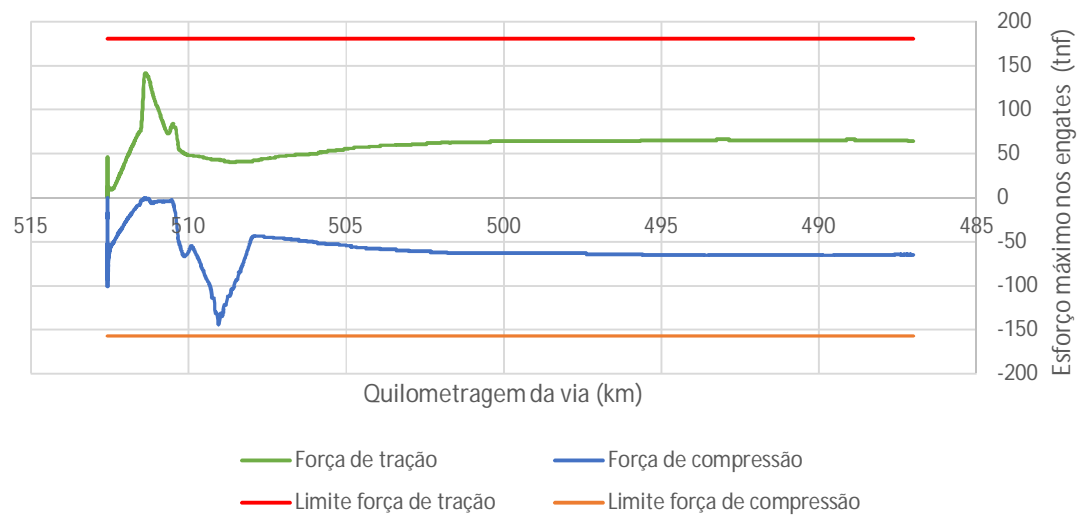
(b)



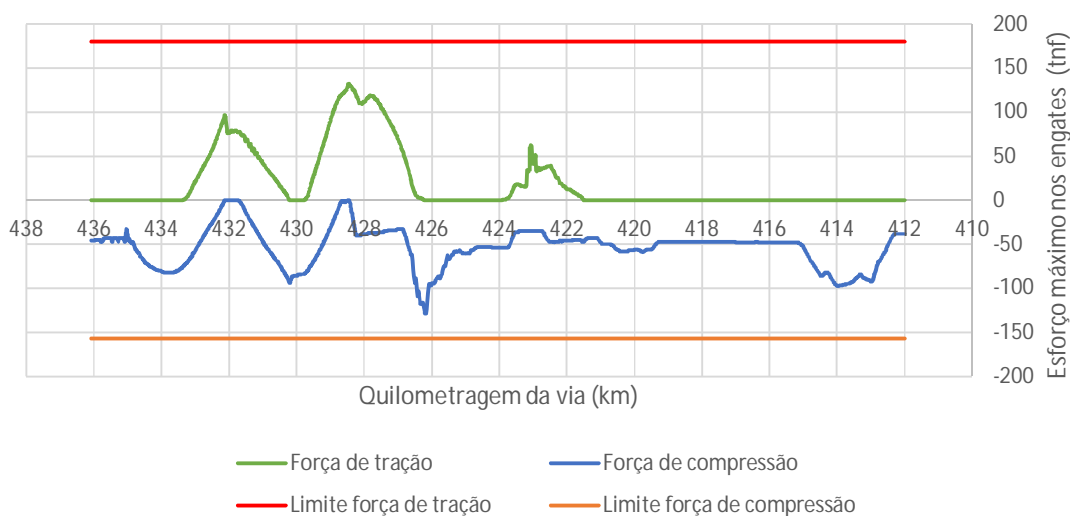
(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

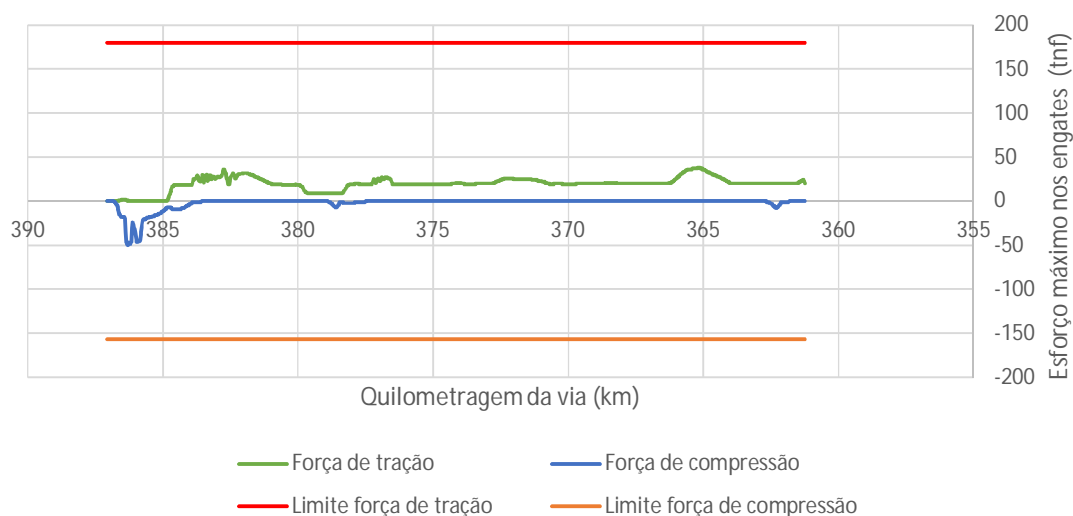
Gráfico 5.23 – Intensidade dos esforços máximos nos engates durante as simulações propostas para as (a) seção 1, (b) seção 4 e (c) seção 6



(a)



(b)



(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Após a análise dos perfis de choques e esforços das operações simuladas para o trecho Açailândia a Alto Alegre, é possível validar tecnicamente todas as propostas apresentadas no que tange à segurança e à estabilidade das operações, visto que os limites estabelecidos não foram ultrapassados.

Um resumo das informações propostas na revisão dos padrões de operação de trens é descrito na Tabela 5.3, onde fica evidenciada a desqualificação da proposta de revisão para a seção 6 devido à inviabilidade econômica da operação.

Tabela 5.3 – Comparativo entre as propostas e a operação padrão de cada seção estudada no trecho de Açailândia a Alto Alegre

Seção	Tipo de Condução	Consumo Energético (MJ)	Redução do Consumo Energético	Consumo de Combustível (L)	Redução do Consumo de Combustível	Eficiência Energética (L/ktkb)
1	Padrão	41.111,72	1,09%	2710,00	0,22%	4,78
	Aprimorada	40.664,46		2704,00		4,77
4	Padrão	4.942,88	100,00%	450,00	46,67%	0,79
	Aprimorada	0,00		240,00		0,42
6	Padrão	6.220,56	-1,05%	429,00	-3,03%	0,76
	Aprimorada	6.286,06		442,00		0,78
Total	Padrão	96.679,15	5,58%	7786,00	2,77%	0,88
	Aprimorada	91.288,99		7570,00		0,85

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

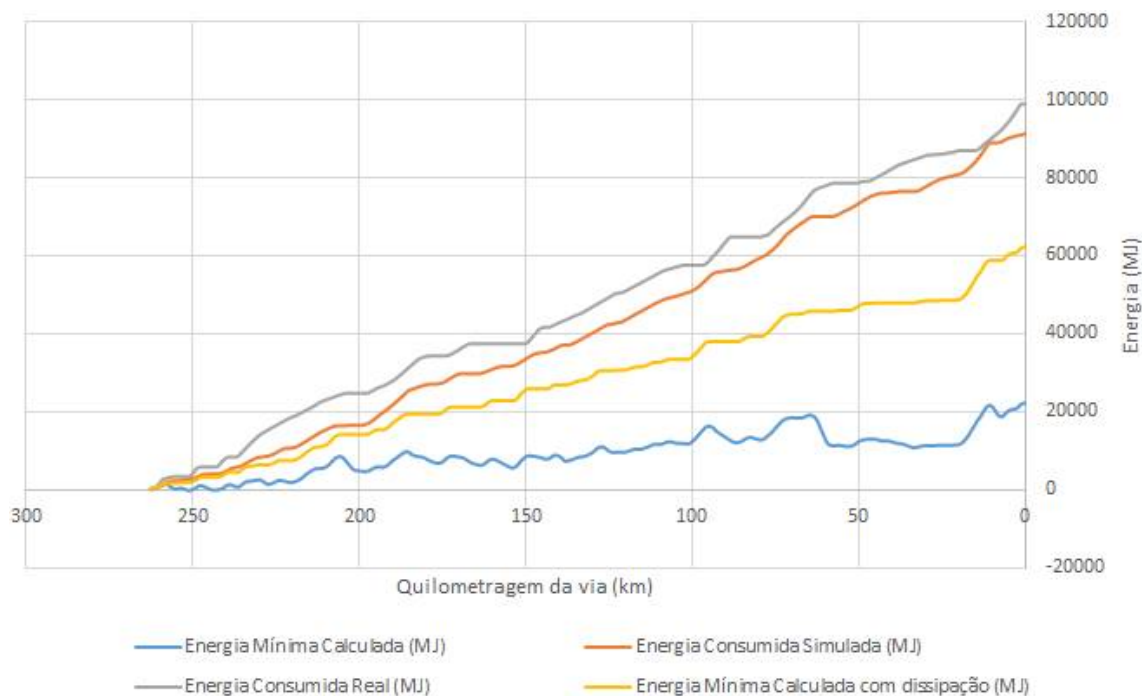
Visto que as propostas apresentadas geraram ganhos consideráveis no âmbito energético, foi comprovado uma redução potencial de 216 litros de combustível por viagem realizada, podendo ser traduzida como uma melhoria na eficiência energética do trecho de 0,88 L/ktkb para 0,85 L/ktkb

5.4 ANÁLISE DO TRECHO DE ALTO ALEGRE A PONTA DA MADEIRA

A operação com trens carregados partindo do pátio de Alto Alegre até a chegada ao terminal portuário de Ponta da Madeira foi analisada de forma detalhada, segundo a metodologia proposta, e valores de consumo energético podem ser observados no Gráfico 5.24.

Como já mencionado anteriormente, é importante conhecer o perfil altimétrico (Gráfico 5) da via como uma referência comparativa para os gastos energéticos apresentados no Gráfico 5.25.

Gráfico 5.26 – Comparativo do consumo energético acumulado no trecho de Alto Alegre ao Porto de Ponta da Madeira



Fonte: Produzido pelo próprio autor.

Gráfico 5.25 – Perfil altimétrico do trecho da EFC de Alto Alegre até o Porto de Ponta da Madeira

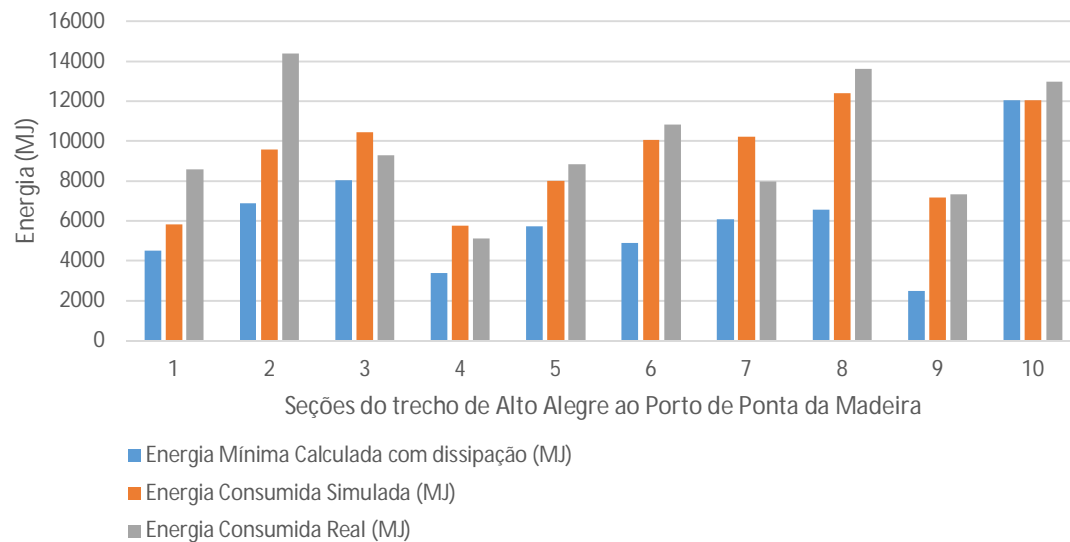


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

As viagens reais escolhidas para comparação de gastos energéticos aconteceram nos dias 25 de julho, pela composição de prefixo M104, no dia 27 de agosto, pela composição de prefixo M234, e no dia 13 de setembro, pela composição de prefixo M318, todas no ano de 2019. Estas partiram do pátio de Alto Alegre, localizado no quilômetro 262,6, da EFC, com destino ao Porto de Ponta da Madeira, situado no quilômetro zero, cujos arquivos de condução foram extraídos das locomotivas utilizadas nos trens citados.

Diante dos resultados dos consumos energéticos calculados, simulados e reais nas diversas seções do trecho em estudo, apresentados no Gráfico 5.26 destacam-se os segmentos 7, 9 e 10 como os mais relevantes, concentrando 54% da diferença da energia consumida comparada à energia mínima calculada, direcionando, assim, a atenção das análises.

Gráfico 5.26 – Comparativo de consumo energético ao longo do trecho de Alto Alegre ao Porto de Ponta da Madeira

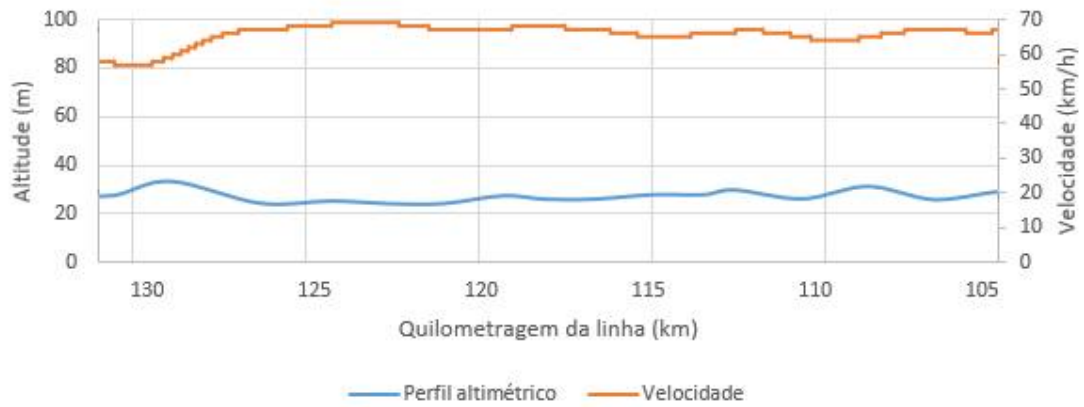


Fonte: Produzido pelo próprio autor.

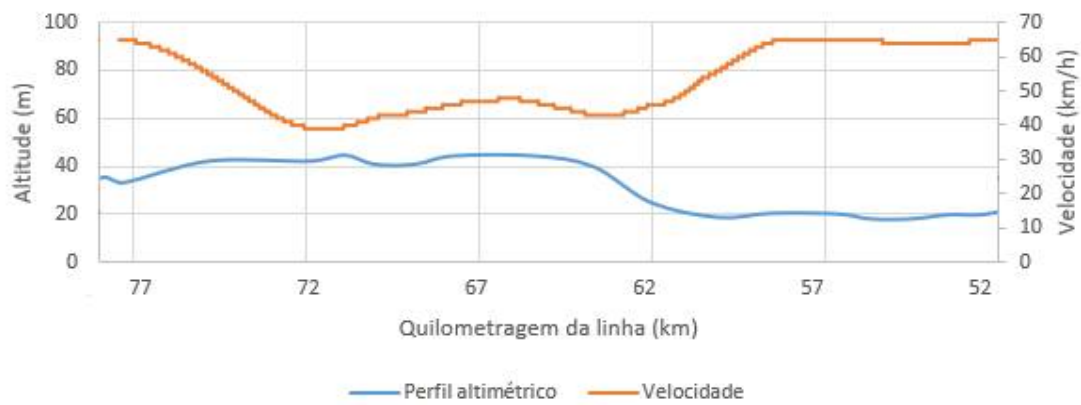
Observando-se os Quadros A.2 a A.7 do ANEXO A, fica evidente que estas seções possuem um perfil topográfico muito suave, apresentando diversos planos e rampas de elevação muito pequena. Além disso, o padrão de operação se assemelha muito ao caso já estudado na seção 6 do trecho anterior (Açailândia a Alto Alegre).

Para que fiquem mais nítidas as observações realizadas, foi traçado o Gráfico 5.27, destacando-se apenas o perfil da via e a velocidade de operação atual.

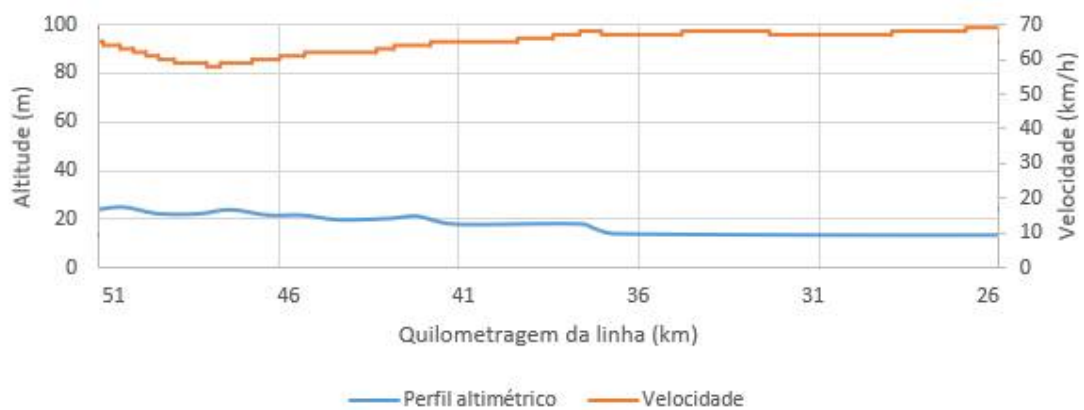
Gráfico 5.27 – Perfil altimétrico e velocidade da composição durante a operação padrão de trens carregados na seção 7 (a), seção 9 (b) e seção 10 (c)



(a)



(b)



(c)

Fonte: Produzido pelo próprio autor.

O único ponto de aproveitamento de inércia identificado está no quilômetro 63 da via. Porém, esta operação já é realizada de forma eficiente, de acordo com metodologia aplicada neste trabalho, atingindo a velocidade máxima permitida de 70 km/h, não proporcionando espaço para melhorias.

De forma análoga, foram analisadas as outras seções desse trecho, as quais apresentam as mesmas características já comentadas. Adicionalmente a estas avaliações, checkou-se o procedimento de arrancada do pátio de Alto Alegre disponível nos Quadros C.1 e C.2 do ANEXO C. De acordo com o procedimento de arrancada suave é possível dizer este padrão já é realizado de forma eficiente, como descrito no trabalho de Andrade e Souza (2018).

Diante dessas características de operação e perfil, não foi possível identificar oportunidades de melhoria nas operações utilizando apenas a metodologia empregada nesta dissertação. Para que a operação dos trens neste trecho seja aprimorada, seria necessário a utilização de algoritmos de otimização, cujas análises são mais profundas e criteriosas, buscando alternativas não contempladas neste projeto.

5.5 ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para se obter, de forma consolidada, a economia de combustível potencial que a EFC possuirá, caso a presente proposta de revisão seja implantada em campo, deve-se levar em consideração os dados obtidos nas análises dos trechos e na quantidade de trens carregados que circulam anualmente na ferrovia (Tabela 4.1).

Sabendo-se que foi identificado um potencial de economia de 589 litros de diesel por trem em operação e que um total de 2.131 trens, apenas com a formação estudada (4 locomotivas e 330 vagões) circulam por ano na ferrovia, pode-se estimar em 1,26 milhões de litros de combustível economizados por ano. Entretanto, deve-se ressaltar que este levantamento não considera os impactos que podem ocorrer na circulação da malha (paradas para cruzamento, interdições de trechos para manutenção, paradas fora dos pontos de trocas para maquinistas devido a congestionamento da circulação e intempéries climáticas, entre outras). Em resumo, este valor seria o

máximo possível de retorno (retorno potencial) a ser obtido com a implantação destas revisões operacionais.

É importante ressaltar que esta metodologia pode ser aplicada também para as demais formações de trens em circulação na EFC, tanto para trens carregados, quanto para trens vazios, podendo aumentar ainda mais os ganhos de eficiência energética deste transporte de carga.

Em termos econômicos, para efeitos de estimativa, foi levado em consideração o custo do óleo diesel a um preço médio de R\$ 3,70 por litro a ser adquirido, isto representaria um gasto evitado máximo de R\$ 4,64 milhões para a companhia.

Segundo Caliman (2018), as equações (49) e (50) podem ser utilizadas para calcular os poluentes atmosféricos advindos da queima de combustível nas locomotivas em operação. De forma análoga, é possível calcular a quantidade de GEE que deixarão de ser lançados na atmosfera devido à melhoria operacional proposta no presente trabalho.

$$TE_p^{WTP} = \sum_{f \in F} \sum_{l \in L} TF_{fl} FE_{fp}^{WTP} \quad (49)$$

$$TE_p^{PTW} = \sum_{f \in F} \sum_{l \in L} TF_{fl} FE_{fp}^{PTW} \quad (50)$$

Onde TE_p^{WTP} é a quantidade de poluentes atmosféricos na fase WTP (*wheel to pump*) da metodologia apresentada no Capítulo 3, TE_p^{PTW} é a quantidade de poluentes atmosféricos na fase PTW (*pump to wheel*), TF_{fl} é a quantidade de combustível que pode ser poupado e FE_{fp}^{WTP} e FE_{fp}^{PTW} são, respectivamente, os fatores de emissão das fases WTP e PTW, levantados no quinto passo do método proposto (CALIMAN, 2018).

Assim, o cálculo do total de poluentes atmosféricos que podem ser evitados se faz pela equação (51).

$$TE_p^{WTW} = TE_p^{WTP} + TE_p^{PTW} \quad (51)$$

Levando-se em consideração que o combustível padrão utilizado na EFC para o abastecimento das locomotivas é o B25, pode-se utilizar os fatores de emissão de poluentes apresentados na Tabela 5.4 como base para a estimativa de emissão dos poluentes.

Tabela 5.4 – Inventário dos fatores de emissão de poluentes para a utilização de B25

Combustível	Poluente atmosférico e GEE (kg/L de combustível)			
	CO ₂	CO	NO _x	MP
B25 (WTP)	0,771133455	0,001944766	0,002463697	0,000169598
B25 (PTW)	2,65	0,00405	0,04523	0,00146
B25 (WTW)	3,421133455	0,005994766	0,047693697	0,001629598

Fonte: Caliman (2018).

Tendo em vista o cálculo potencial de economia de combustível, pode-se concluir que, se a proposta de revisão do procedimento operacional for implantada, fazendo a multiplicação dos fatores de emissão, 4,29 mil toneladas de CO₂ podem ser anualmente evitadas de atingirem a atmosfera. Adicionalmente a este poluente, também poderiam ser evitados o lançamento anual de 7,52 t de CO, 59,86 t de NO_x e 1,83 t de material particulado.

De acordo com Vale (2018b), uma viagem completa pela EFC com uma composição de 330 vagões carregados e 4 locomotivas consome, em média, 32.066 litros de combustível, de forma que sua eficiência energética, com base na equação (2), é de 1,016 L/ktkb. Porém, se todas as propostas aqui apresentadas forem implementadas, este índice poderá melhorar em 1,77%, o que reduziria tal índice para 0,998 L/ktkb. Ou seja, um ganho muito significativo seria alcançado em se tratando dos grandes volumes transportados pela ferrovia em questão.

6 CONCLUSÕES

A busca pela melhoria na eficiência energética das operações de uma empresa não é somente uma questão de sobrevivência ao mercado globalizado dos dias atuais, mas também uma maneira de implementar a padronização de processos, de entender detalhadamente a origem dos custos e de reduzir os impactos ambientais inerentes de sua produção.

A Estrada de Ferro Carajás possui mais de 30 anos de operação e está em constante transformação tecnológica, estratégica e de sua infraestrutura, o que gera uma necessidade frequente de novos estudos e pesquisas visando à melhoria das condições operacionais e garantindo a sustentabilidade de todos os processos envolvidos, principalmente a circulação dos trens que transportam minério de ferro.

A metodologia explorada neste trabalho orienta, de maneira objetiva, a forma de avaliar o modo de operação de uma ferrovia no que tange ao consumo energético, no intuito de identificar oportunidades de redução ou mesmo estabelecer limites para estes ganhos. Dessa forma, pôde-se apontar com precisão diversos trechos ao longo de toda a extensão da EFC, locais cuja condução não se dava de forma eficiente, trazendo à luz soluções simples para diminuir o gasto de energia e, conseqüentemente, minimizar o consumo de combustível inerente ao processo de transporte.

De forma mais pontual, o trecho de Carajás a Marabá, que apesar de possuir um perfil altimétrico muito favorável ao transporte de carga, por apresentar o ponto de carregamento da mina numa cota bem mais alta que a de destino, ainda foi possível detectar, no procedimento de condução, o mau aproveitamento da energia cinética do trem em detrimento do consumo energético e da falta de balanceamento das composições nas inversões de perfil.

Estas alterações propostas demonstraram um potencial de redução de 342 litros de diesel apenas nesse trecho. A metodologia aplicada neste trecho foi analogamente empregada em todas as seções analisadas incluindo ainda a aplicação do procedimento de arrancada suave que garante um melhor aproveitamento da energia consumida pelas locomotivas.

Resumidamente, com os resultados alcançados neste trabalho, estima-se um potencial de melhoria da eficiência energética da ferrovia em 1,77%, o que representaria um consumo evitado de 1,26 milhões de litros de óleo diesel anualmente, podendo refletir em um custo anual poupado de R\$ 4,64 milhões na compra de combustível para abastecimento das locomotivas.

No que tange aos impactos ambientais, 4,29 mil toneladas de CO₂, 7,52 t de CO, 59,86 t de NO_x e 1,83 t de material particulado podem deixar de ser anualmente lançadas na atmosfera do planeta diante da proposta apresentada.

Finalmente, deve-se ressaltar que o grande diferencial deste trabalho reside na facilidade de aplicação dos resultados obtidos, pois todas as propostas validadas não necessitam de investimentos ou mobilização de ativos. Ou seja, todas as melhorias podem ser implantadas apenas por meio de treinamento dos maquinistas, pertencentes ao quadro de viagens da EFC, com o uso dos simuladores já existentes na companhia.

Como indicação de trabalhos futuros, pode-se destacar a aplicação da metodologia proposta para analisar as outras formações utilizadas na ferrovia, como as que utilizam locomotivas AC, quanto as formações com maior número de 440 vagões, cada vez mais frequentes na EFC, ou ainda, o desenvolvimento de um algoritmo de otimização buscando reduções ainda maiores no consumo energético, garantido também a segurança de estabilidade das operações.

Outra proposta é a realização da análise da eficiência energética para os trens vazios, quando os mesmos retornam do porto à mina, que são de mesma importância para o transporte do minério de ferro na Vale S.A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

N°	Título	Qualis	Idioma
1	ACSELRAD, Henri. Discursos da sustentabilidade urbana. Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais , Rio de Janeiro, n. 1, p. 379-410, 31 maio 1999. <i>Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais (RBEUR)</i> .	A1	Port.
2	ALBRECHT, Amie; HOWLETT, Phil; PUDNEY, Peter; VU, Xuan; ZHOU, Peng. The key principles of optimal train control – Part 1: Formulation of the model, strategies of optimal type, evolutionary lines, location of optimal switch. Transportation Research Part B: Methodological , [S.l.], v. 94, p. 482-508, dez. 2016.	A1	Ingl.
3	ALBRECHT, Amie; HOWLETT, Phil; PUDNEY, Peter; VU, Xuan; ZHOU, Peng. The key principles of optimal train control – Part 2: Existence of an optimal strategy, the local energy minimization principle, uniqueness, computational techniques. Transportation Research Part B: Methodological , [S.l.], v. 94, p. 509-538, dez. 2016.	A1	Ingl.
4	ALBRECHT, Amie; HOWLETT, Phil; PUDNEY, Peter; VU, Xuan. Energy-efficient train control: From local convexity to global optimization and uniqueness. Automatica , [S.l.], v. 49, n. 10, p. 3072-3078, out. 2013.	A1	Ingl.
5	ALL (Brasil). RO- Regulamento Operacional da ALL . 3. ed. Curitiba: América Latina Logística S.A., 2015. 172 p.	N.A.	Port.
6	ALTOÉ, Aduino. Especificação técnica para aquisição de vagão Gôndola - GDU . Vitória: Vale S.A., 2016. 7 p. Documento técnico 13156.	N.A.	Port.
7	ANDRADE, Eustáquio Alves de; PEREIRA JÚNIOR, Elvânio Antônio; MACHADO, Fábio Luis Maciel. OPERAÇÃO OTIMIZADA DE TRENS. <i>In: SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA</i> , 21., 2015, São Paulo. Trabalhos técnicos . São Paulo: AEAMESP, 2015. v. 1, p. 1-17. Disponível em: http://www.aeamesp.org.br/biblioteca/stm/21sml44rl.pdf . Acesso em: 25 jan. 2018.	N.A.	Port.
8	ANDRADE, Eustáquio Alves de; SANTANA, Antônio Luiz. Operação econômica de trens visando à melhor eficiência energética . 2017. 18 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção), Curso de Engenharia de Produção da Universidade Estácio de Sá, Vitória, 2017.	N.A.	Port.

9	AREMA (United States of America) (ed.). AREMA Manual for Railway Engineering : Chapter 16 - Economics of Railway Engineering and Operations. 2019. ed. Lanham, Maryland: American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2019. Disponível em: https://www.arena.org/AREMA_MBRR/AREMA_MBRR/AREMAStore/MRE.aspx . Acesso em: 5 mar. 2019.	N.A.	Ingl.
10	ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (United States of America). Manual of Standards and Recommended Practices : Section M. Washington, DC: Association of American Railroads, 2008a. 420 p. Disponível em: https://www.aar.com/standards/publications.html . Acesso em: 09 maio 2018.	N.A.	Ingl.
11	ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (United States of America). Manual of Standards and Recommended Practices : Section C. Washington, DC: Association of American Railroads, 2008b. 420 p. Disponível em: https://www.aar.com/standards/publications.html . Acesso em: 09 maio 2018.	N.A.	Ingl.
12	BANCO MUNDIAL (Estados Unidos da América). The International Bank for Reconstruction and Development. Connecting to Compete 2018 : Trade Logistics in the Global Economy. 6. ed. Washington: The World Bank, 2018. 82 p. Disponível em: https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/29971/LPI2018.pdf . Acesso em: 01 ago. 2018.	N.A.	Ingl.
13	BARBOSA, Lusami Domingos. Treinamento de Locotrol . 5. ed. Vitória: Vale S.A., 2009. 109 p. (Conteúdo da Trilha Técnica da Operação Ferroviária).	N.A.	Port.
14	BARBOUR, William; MORIA, Juan Carlos Martinez; KUPPA, Shankara; WORKA, Daniel. Prediction of arrival times of freight traffic on US railroads using support vector regression. Transportation Research Part C: Emerging Technologies , [s.l.], v. 93, p. 211-227, ago. 2018.	A1	Ingl.
15	BOFF, Leonardo. Sustentabilidade: o Que é - o Que Não é . 4. ed. Petrópolis: Editora Vozes, 2015. 200 p.	N.A.	Port.
16	BRASIL. Agência Nacional de Transporte Terrestre - ANTT. Ministério dos Transportes. Anuário Estatístico . Brasília, DF, 2018a. Disponível em: http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html . Acesso em: 09 maio 2018.	N.A.	Port.

17	BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Ministério dos Transportes. Evolução do Transporte Ferroviário de Carga . Brasília, DF, 2016a. 16 p. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/evolucao_do_transporte_ferroviano_2016__ate_agosto . Acesso em: 09 maio 2018.	N.A.	Port.
18	BRASIL. Agência Nacional de Transportes Terrestres. Ministério dos Transportes. Plano trienal de investimentos das concessões ferroviárias: 2014 a 2016 . Brasília, DF, 2016b. 85 p. Disponível em: http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/plano_trienal_de_investimentos_das_concessoes_ferrovianas__2014_a_2016_1.pdf . Acesso em: 09 maio 2018.	N.A.	Port.
19	BRASIL. Confederação Nacional do Transporte. Ministério dos Transportes. Transporte e Economia: O Sistema Ferroviário Brasileiro . Brasília, DF, 2013. 58 p. Disponível em: http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/Site2015/Pesquisas/PDF/Transporte_e_Economia_-_O_Sistema_Ferroviano_Brasileiro.pdf . Acesso em: 14 maio 2017.	N.A.	Port.
20	BRASIL. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Pesquisas Coordenação de Contas Nacionais (Comp.). Séries históricas e estatísticas: Produto Interno Bruto . 2018b. Disponível em: https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=ST12 . Acesso em: 01 ago. 2018.	N.A.	Port.
21	BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. Objetivos de Desenvolvimento do Milênio: Relatório nacional de acompanhamento . Brasília, DF: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2010. 184 p.	N.A.	Port.
22	BRASIL. Lei nº 13.033, de 24 de setembro de 2014. Diário Oficial da União , Poder Executivo, Brasília, DF, 24 set. 2014. Seção 1, p. 3. ISSN 1677-7042	N.A.	Port.
23	BRASIL. Oliver Jende. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás (Org.). Barreiras e propostas de soluções para o mercado de biogás no Brasil . Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016c. 74 p. ISBN: 978-85-7958-058-1.	N.A.	Port.
24	BRASIL. Secretaria de Política Nacional de Transportes. Ministério dos Transportes. Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNL T: Relatório Final . Brasília, DF, 2012. 260 p. Disponível em: http://www.transportes.gov.br/images/2014/11/PNL T/2011.pdf . Acesso em: 14 maio 2017.	N.A.	Port.

25	BRITO, Bruno. Relatório referente às avaliações realizadas: Instrumentação e análise estrutural de Vagão GDU . Vitória: Vale S.A., 2014. 107 p. Documento técnico 17942.	N.A.	Port.
26	BRUNORO, Adilson; RIBEIRO, Ciro. Álbum de vagões da EFC e EFVM . Vitória: Vale S.A., 2010. (Rev. 01). Documento Técnico 7784.	N.A.	Port.
27	CABRAL, Eric Wilson Santos. A eficiência energética do consumo de combustível em uma ferrovia heavy haul . 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.	N.A.	Port.
28	CACCHIANI, Valentina; HUISMAN, Dennis; KIDD, Martin; KROON, Leo; TOTH, Paolo; VEELTURF, Lucas; WAGENAAR, Joris. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. Transportation Research Part B: Methodological , [S.I.], v. 63, p. 15-37, maio 2014.	A1	Ingl.
29	CALIMAN, Rafaella Ribeiro. Proposta de um método baseado na abordagem well-to-wheel para calcular e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos e gee durante o ciclo de vida dos combustíveis utilizados por locomotivas . 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.	N.A.	Port.
30	CAMPANERI JUNIOR, Alcides. Especificação técnica para aquisição de vagão Gôndola - GDT . Vitória: Vale S.A., 2013. 6 p. Documento técnico 15977.	N.A.	Port.
31	CAMPOS, Luciano Bandeira; CRUZ, Marta Monteiro da Costa; POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. Modelo integrado de apoio ao planejamento da rede de serviços no transporte ferroviário de cargas: aplicação para transporte de minério de ferro. Transportes , [S.I.], v. 18, n. 2, p. 62-71, 2 jul. 2010. Lepidus Tecnologia.	A3	Port.
32	CARVALHAES, Bernardo Bicalho; ROSA, Rodrigo de Alvarenga; D'AGOSTO, Márcio de Almeida; RIBEIRO, Glaydston Mattos. A method to measure the eco-efficiency of diesel locomotive. Transportation Research Part D: Transport and Environment , [S.I.], v. 51, p. 29-42, mar. 2017.	A1	Ingl.
33	CÉSAR, Paulo Sérgio Mendes; SOUZA, Daniel Ferreira de; SILVA, Frederico Amaral e; ALMEIDA, Gustavo Henrique Moreira Dias. Como Conciliar o Desenvolvimento Econômico com a Proteção Ambiental?: Uma Reflexão sobre o Rompimento da Barragem em Mariana. <i>In</i> : CONGRESSO VIRTUAL BRASILEIRO - ADMINISTRAÇÃO, 8., 2011, [S.I.]. Anais	N.A.	Port.

	[...]. [S.I.]: Convibra, 2016. p. 1-18. Disponível em: http://www.convibra.com.br/upload/paper/2016/28/2016_28_13377.pdf . Acesso em: 22 maio 2018.		
34	CHAMBADAL, M. Railway aerodynamics. French Railway , Paris, v. 1, n. 5, p. 327-329, 1983.	N.A.	Ingl.
35	CLARK, Stephen. A history of railway signalling (from the Bobby to the Balise). <i>In</i> : IET SEMINAR DIGESTS, 2010, Birmingham. Proceedings [...]. [S.I.]: RSCS, 2010. p. 7-20.	N.A.	Ingl.
36	COLE, Colin; SUN, Yan Quan; MCCLANACHAN, Mitchell. A Study of Starting Dynamics in Heavy Haul Trains. <i>In</i> : INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR VEHICLE SYSTEM DYNAMICS SYMPOSIUM – IAVSD 2013, 23., 2013, Qingdao, China. Proceedings [...]. Qingdao: IAVSD, 2013. p. 1-8.	N.A.	Ingl.
37	COLE, Colin. Longitudinal Train Dynamics. <i>In</i> : IWNICKI, Simon (ed.). Handbook of Railway Vehicle Dynamics . [S.I.]: CRC, 2006. p. 239-277.	N.A.	Ingl.
38	D'AGOSTO, Márcio de Almeida. Transporte, Uso de Energia e Impactos Ambientais: Uma abordagem introdutória . Rio de Janeiro: Elsevier, 2015. 272 p. ISBN: 9788535228212.	N.A.	Port.
39	DELTREGIA, Fernanda de Moraes. Estratégia de Operação da EFC e EFVM (2014-2018) . Vitória: Vale S.A., 2013. 75 p. Documento Técnico 16081 do SISPAV.	N.A.	Port.
40	DOUGLAS, Heather; ROBERTS, Clive; HILLMANSEN, Stuart; SCHMID, Felix. An assessment of available measures to reduce traction energy use in railway networks. Energy Conversion and Management , [S.I.], v. 106, p. 1149-1165, dez. 2015.	A1	Ingl.
41	FAIEGHI, Mohammadreza; JALALI, Aliakbar; MASHHADI, Seyed Kamal-e-ddin Mousavi. Robust adaptive cruise control of high speed trains. ISA Transactions , [S.I.], v. 53, n. 2, p. 533-541, mar. 2014.	A1	Ingl.
42	FONTAN, Renata Guimaraes de Oliveira. Análise da eficiência das ferrovias especializadas em transporte de minério de ferro e pelotas pertencentes às empresas mineradoras e usinas de pelotização por meio do método data envelopment analysis (DEA) . 2018. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018. Disponível em: http://portais4.ufes.br/posgrad/teses/tese_12758_v01-20181113_Disserta%E7%E3o_RenataGuimaraes.pdf . Acesso em: 18 mar. 2019.	N.A.	Port.

43	GALLO, Edmundo; SETTI, Andréia Faraoni Freitas; MAGALHÃES, Danielly de Paiva; MACHADO, Jorge Mesquita Huet; BUSS, Daniel Forsin; NETTO, Francisco de Abreu Franco; BUSS, Paulo Marchiori. Saúde e economia verde: desafios para o desenvolvimento sustentável e erradicação da pobreza. Ciência & Saúde Coletiva , [S.l.], v. 17, n. 6, p. 1457-1468, jun. 2012.	A3	Port.
44	GARG, Vijay Kumar; DUKKIPATI, Rao. Dynamics of Railway Vehicle Systems . Ontario: Academic Press Canada, 1984. 422 p.	N.A.	Ingl.
45	POPPINGA, Gerd Peter. Vale Day New York 2017: New York : Bolsa de Valores de Nova York - NYSE, 2017. 71 slides, color.	N.A.	Ingl.
46	GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa . 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p.	N.A.	Port.
47	GKORTZAS, Panagiotis. Study on optimal train movement for minimum energy consumption . 2013. 82 f. Master thesis work (Master's Programme in Product and Process Development - Production and Logistics) – School of Innovation, Design and Engineering, Mälardalen University College, Västerås, 2013.	N.A.	Ingl.
48	GONG, Cheng; ZHANG, Shiwen; ZHANG, Feng; JIANG, Jianguo; WANG, Xinheng. An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One. Energies , [S.l.], v. 7, n. 11, p. 7305-7329, 13 nov. 2014. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/en7117305 . Acesso em: 29 abr. 2019.	A1	Ingl.
49	GPV FERROVIAS: Gerenciamento da Produção Vale - Ferroviárias. Versão 1.0 [S.l.]: Vale S.A., Accenture, 2019. Navegador Web com suporte a HTML 4 e Javascript.	N.A.	Port.
50	GREENBRIER MAXION (Brasil). GDT Vagão Gôndola : Boletim Técnico. Hortolândia, SP: Gbm, 2019.	N.A.	Port.
51	GREENBRIER MAXION (Brasil). GDU Vagão Gôndola : Boletim Técnico. Hortolândia, SP: Gbm, 2019.	N.A.	Port.
52	HAY, William Walter. Railroad engineering . 2. ed. New Jersey: Wiley, 1982. 784 p. ISBN: 978-0-471-36400-9.	N.A.	Ingl.
53	HOWLETT, Philip George.; CHENG, Jiaying Optimal driving strategies for a train on a track with continuously varying gradient. The Journal of The Australian Mathematical Society. Series B. Applied Mathematics , [S.l.], v. 38, n. 03, p. 388-410, jan. 1997. Cambridge University Press (CUP). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1017/s0334270000000746 . Acesso em: 02 jul. 2018.	A4	Ingl.

54	HOWLETT, Philip George.; MILROY, Ian Peter.; PUDNEY, Peter. Energy-efficient train control. Control Engineering Practice , [S.l.], v. 2, n. 2, p. 193-200, abr. 1994. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/0967-0661(94)90198-8 . Acesso em: 02 jul. 2018.	A1	Ingl.
55	HOWLETT, Philip George.; PUDNEY, Peter.; VU, Xuan. Local energy minimization in optimal train control. Automatica , [S.l.], v. 45, n. 11, p. 2692-2698, nov. 2009. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2009.07.028 . Acesso em: 05 jul. 2018.	A1	Ingl.
56	HOWLETT, Philip George. Optimal strategies for the control of a train. Automatica , [S.l.], v. 32, n. 4, p. 519-532, abr. 1996. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(95)00184-0 . Acesso em: 02 jul. 2018.	A1	Ingl.
57	HOWLETT, Philip George. The Optimal Control of a Train. Annals of Operations Research , [S.l.], v. 98, n. 1/4, p. 65-87, dez. 2000. Springer Nature. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1023/a:1019235819716 . Acesso em: 02 jul. 2018.	N.A.	Ingl.
58	HOWLETT, Philip George.; PUDNEY, Peter. Energy-Efficient Train Control: Advances in industrial control . London: Springer, 1995. 306 p. ISSN 1430-9491.	N.A.	Ingl.
59	HOWLETT, Philip George; LEIZAROWITZ, Arie. Optimal strategies for vehicle control problems with finite control sets. Dynamics of Continuous Discrete and Impulsive Systems Series B , [S.l.], v. 8, n. 1, p. 41-70, mar. 2001.	B4	Ingl.
60	JOHNSON, Graham Richard; JAYARATNE, Rohan; LAU, Jason; THOMAS, Vaughan; JUWONO, Alamsyah; KITCHEN, Brad; MORAWSKA, Lidia. Remote measurement of diesel locomotive emission factors and particle size distributions. Atmospheric Environment , [S.l.], v. 81, p. 148-157, dez. 2013. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.09.019 . Acesso em: 04 jun. 2018.	A1	Ingl.
61	KHMELNITSKY, Eugene. On an optimal control problem of train operation. IEEE Transactions on Automatic Control , [S.l.], v. 45, n. 7, p. 1257-1266, jul. 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1109/9.867018 . Acesso em: 04 jun. 2018.	A1	Ingl.
62	KÖCHE, José Carlos. Fundamentos de Metodologia Científica: Teoria da ciência e iniciação à pesquisa . Petrópolis: Editora Vozes, 2011. Disponível em: https://pt.scribd.com/doc/192008010/Fundamentos-de-Metodologia-Cien-Jose-Carlos-Koche-pdf . Acesso em: 18 jul. 2018.	N.A.	Port.

63	LEITE, Emanuel Assis; QUINTINO, Ernani; ANDRADE, Eustáquio Alves de; FERREIRA, Hebert; BORBA, José Luiz; MENDONÇA, Leonardo; VIEIRA, Ronilson; SILVA, Washington. Fundamentos de Operação de Trens Módulo I . Rio de Janeiro: Valer - Educação Vale, 2011. 138 p. (Conteúdo da Trilha Técnica da Operação Ferroviária).	N.A.	Port.
64	LI, Xiang; LO, Hong K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. Transportation Research Part B: Methodological , [S.l.], v. 64, p. 73-89, jun. 2014. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2014.03.006 . Acesso em: 10 jul. 2018.	A1	Ingl.
65	LIMA, Maurício (ed.). Custos logísticos no Brasil . ILOS. [S.l.]. 2014. Disponível em: http://www.ilos.com.br/web/custos-logisticos-no-brasil/ . Acesso em: 10 nov. 2014.	N.A.	Port.
66	LINDGREEN, Erik; SORENSON, Spencer C. Simulation of Energy Consumption and Emissions from Rail Traffic Evaluation . Kongens Lyngby: Technical University of Denmark, 2005. 209 p. ISBN 8774753281. Disponível em: http://orbit.dtu.dk/files/3413826/lindgreen_sorenson.pdf . Acesso em: 28 maio 2018.	N.A.	Ingl.
67	LIU, Rongfang; GOLOVITCHER, Iakov. Energy-efficient operation of rail vehicles. Transportation Research Part A: Policy and Practice , [S.l.], v. 37, n. 10, p. 917-932, dez. 2003. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2003.07.001 . Acesso em: 05 jul 2018.	A1	Ingl.
68	LOBO, Alexandre. Transporte de cargas e a encruzilhada do Brasil para o futuro . ILOS. [S.l.]. 2017. Disponível em: http://www.ilos.com.br/web/transporte-de-cargas-e-a-encruzilhada-do-brasil-para-o-futuro/ . Acesso em: 20 abr. 2019.	N.A.	Port.
69	MARTÍ, Luisa; PUERTAS, Rosa; GARCÍA, Leandro. The importance of the Logistics Performance Index in international trade. Applied Economics , Valencia, v. 46, n. 24, p. 2982-2992, maio 2014. Informa UK Limited. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/00036846.2014.916394 . Acesso em: 20 abr. 2019.	A1	Ingl.
70	MARTINS, Maria de Fátima; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Modelo de avaliação do nível de sustentabilidade urbana: proposta para as cidades brasileiras. URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana , [S.l.], v. 7, n. 3, p. 397-410, 18 set. 2015. FapUNIFESP (SciELO).	A1	Port.

	Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.007.003.ao09 . Acesso em: 10 jun. 2018.		
71	MIRANDA, Marcos; SOUZA, Ailton Elias de; CAVALCANTI, Alisson; CABRAL, André; BORGES, Fernando; MELO, Gleicyane; BRANDÃO, Tatiana. Projeção Peso Médio Minério EFC - PCL 2017: Plurianual 2017 a 2022 . São Luís, MA: Vale S.A., 2017. 7 p. Documento Técnico 19789.	N.A.	Port.
72	MIYATAKE, Masafumi; KO, Hideyoshi. Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption. Transactions on Electrical and Electronic Engineering , [S.l.], v. 5, n. 3, p. 263-269, 20 abr. 2010. Wiley. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1002/tee.20528 . Acesso em: 01 jul. 2018.	N.A.	Ingl.
73	MRS (Brasil). Diretoria de Operações. ROF-Regulamento de Operação Ferroviária da MRS Logística S.A. 4. ed. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2016. 132 p.	N.A.	Port.
74	MURGEL, Liége Marcela Firmino; GUALDA, Nicolau Dionísio Fares. Modelo para formação de composições ferroviárias. Transportes , [S.l.], v. 7, n. 1, p. 30-63, 17 abr. 1999. Lepidus Tecnologia. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v7i1.219 . Acesso em: 24 abr. 2019.	A3	Port.
75	NAWEED, Anjum; ROSE, Janette. Assessing technology acceptance for skills development and real-world decision-making in the context of train driving. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour , [S.l.], v. 52, p.86-100, jan. 2018. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.trf.2017.11.003 . Acesso em: 08 jul. 2018.	A1	Ingl.
76	NUNES, Paulo Henrique Faria. Meio Ambiente & Mineração: O desenvolvimento sustentável . Curitiba: Juruá, 2007. 242 p.	N.A.	Port.
77	OJALA, Lauri; ÇELEBI, Dilay (org.). Logistics Development Strategies and Performance Measurement: Capter 3 - The World Bank's logistics performance index (LPI) and drivers of logistics performance . 158. ed. Paris: Secretaria Geral da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OECD, 2016. 145 p.	N.A.	Ingl.
78	OLIVEIRA JUNIOR, Alberto Jorge Sales de. Forças e choques na dinâmica longitudinal de composições ferroviárias . 2017. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.	N.A.	Port.

79	ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE – OPAS/OMS (Brasília). Ministério da Saúde. Enfoques ecossistêmicos em saúde: Perspectivas para sua adoção no Brasil e em países da América Latina. Brasília, DF: All Type Assessoria Editorial Ltda, 2009. 48 p.	N.A.	Port.
80	OZHIGIN, Artem; PRUNEV, Pavel; SVERDLIN, Victor; VIKULINA, Yulia. Development of an algorithm for energy efficient automated train driving. <i>In: EUROPEAN CONGRESS ON EMBEDDED REAL TIME SOFTWARE AND SYSTEMS, 8., 2016, Toulouse. Proceedings of the 8th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems (ERTS 2016).</i> Toulouse: Hal, 2016. p. 1-9.	N.A.	Ingl.
81	PAINTER, Travis. Recovering railroad diesel-electric locomotive dynamic brake energy. 2006. 103 f. Thesis (Master Science in Civil Engineering) – University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, 2006.	N.A.	Ingl.
82	PALHANO, Anaxímenes Nunes; LEITE, Emanuel Assis; QUINTINO, Ernani; ANDRADE, Eustáquio Alves de; MENDONÇA, Leonardo; VIEIRA, Ronilson; SILVA, Washington Fundamentos de Operação de Trens – Módulo II. Rio de Janeiro: Valer - Educação Vale, 2014. 98 p. (Conteúdo da Trilha Técnica da Operação Ferroviária).	N.A.	Port.
83	PEREIRA, Olyntho Carmo. Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga: O caso da Estrada de Ferro Carajás – EFC. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.	N.A.	Port.
84	PETERS, John. Optimising Aerodynamics to Raise IC Performance. French Railway: Railway Gazette International, London, p. 817-819, 1982.	N.A.	Ingl.
85	POMBAL, Ovidio Guilherme Correa; CRUZ, Adelaide Maria; SILVA, Marcio Souza e; ABREU, Robson Lopes; SILVA, Wendel Alex Castro. Transporte ferroviário: avaliação do bi-combustível no desempenho de locomotiva. <i>In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CUSTOS, 17., 2010, Belo Horizonte. Anais [...].</i> São Leopoldo: Associação Brasileira de Custos, 2010. p. 1-14. Disponível em: https://anaiscbc.emnuvens.com.br/anais/article/view/725/725 . Acesso em: 20 abr. 2018.	N.A.	Port.
86	PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.	N.A.	Port.

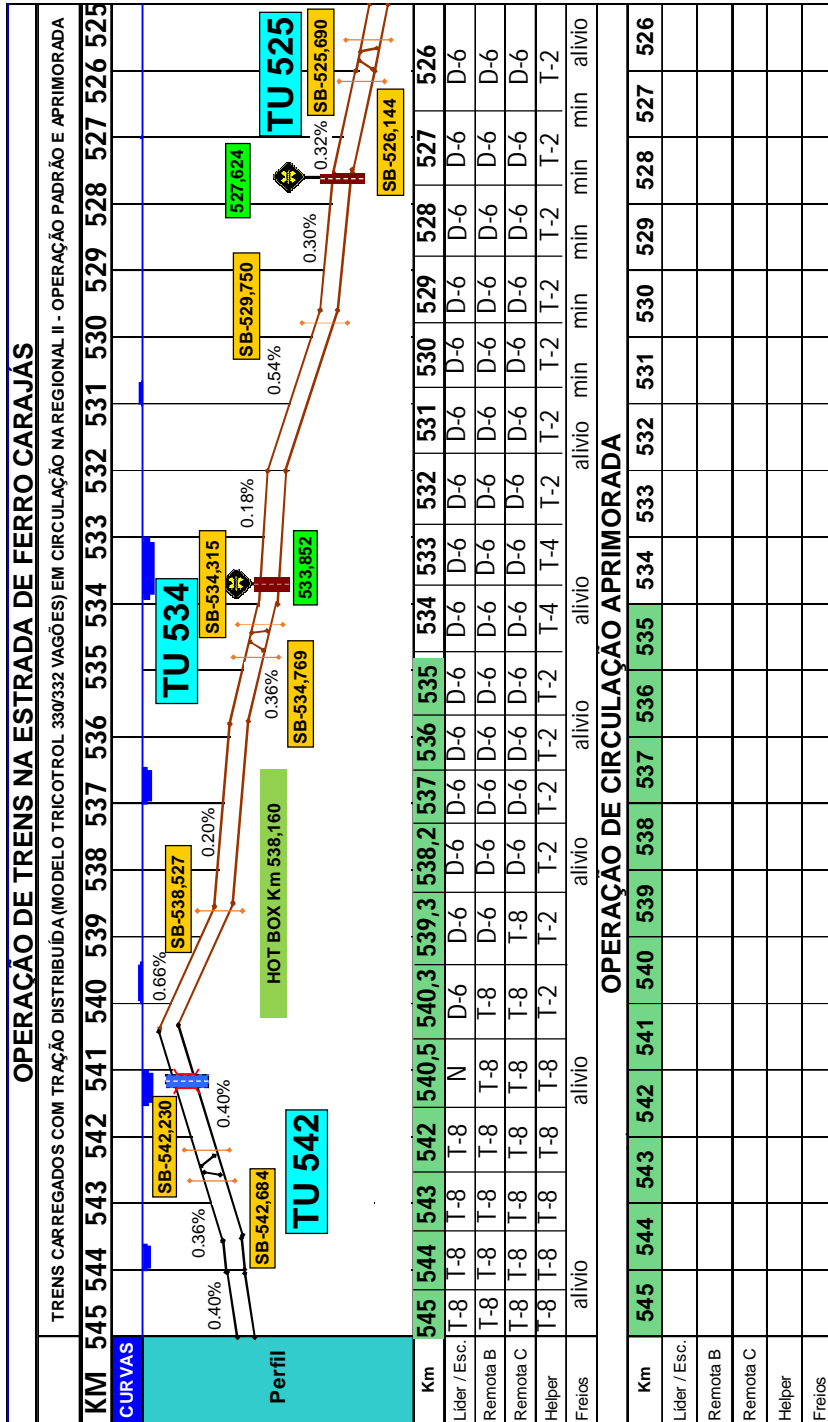
87	RIBEIRO, Daniel Fernandes. Desenvolvimento de modelos para simulação em tempo real da frenagem de composições ferroviárias de carga . 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.	N.A.	Port.
88	ROCHARD, Bernard; SCHMID, Felix. A review of methods to measure and calculate train resistances. Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit , [S.l.], v. 214, n. 4, p. 185-199, jul. 2000. SAGE Publications. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1243/0954409001531306 . Acesso em: 15 jun. 2018.	B1	Ingl.
89	SCHEEPMAKER, Gerben; GOVERDE, Rob; KROON, Leo. Review of energy-efficient train control and timetabling. European Journal of Operational Research , [S.l.], v. 257, n. 2, p. 355-376, mar. 2017. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.09.044 . Acesso em: 08 jul. 2018.	A1	Ingl.
90	SETTI, Andréia Faraoni Freitas; GALLO, Edmundo. Promoção da saúde e desenvolvimento sustentável: proposta de matriz de avaliação qualitativa de projetos locais. Saúde em Debate , Rio de Janeiro, v. 33, n. 81, p. 407-419, fev. 2009.	B2	Port.
91	SICRE, Carlos; CUCALA, Paloma; FERNÁNDEZ, Alicia; JIMÉNEZ, Jesús Manuel Almendros; RIBERA, Ignacio; SERRANO, Alfonso. A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling. Computers in Railways XII , [S.l.], v. 114, p. 549-560, 2010. WIT Press. Disponível em: http://dx.doi.org/10.2495/cr100511 . Acesso em: 25 jul 2019.	N.A.	Ingl.
92	SILVA, Ana Silveira; PALHANO, Anaximenes Nunes; FONSECA, Denio; SILVA, Edilson Gomes da; BARROS, Fernando Sousa; COSTA, Miguel Ferreira da; SOUZA, João Batista Pereira de; TAVARES, José Francikleber; PEREIRA, José Magno Martins; PAIVA FILHO, Luiz Soares; ARAUJO JUNIOR, Wilson Batista. Operar trens na Estrada de Ferro Carajás . 6. ed. São Luís: Vale S.A., 2018. 18 p. PRO-001194, Rev.: 06-04/05/2018.	N.A.	Port.
93	SPIRYAGIN, Maksym et al. Design and Simulation of Rail Vehicles. Ground Vehicle Engineering , [S.l.], v. 1, n. 6, p. 1-329, maio 2014. CRC Press. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1201/b17029 . Acesso em: 22 abr. 2019.	N.A.	Ingl.

94	SU, Shuai; LI, Xiang; TANG, Tao; GAO, Ziyou. A Subway Train Timetable Optimization Approach Based on Energy-Efficient Operation Strategy. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems , [S.l.], v. 14, n. 2, p. 883-893, jun. 2013. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Disponível em: http://dx.doi.org/10.1109/tits.2013.2244885 . Acesso em: 05 jul 2018.	A1	Ingl.
95	SZANTO, Frank. Rolling resistance revisited. In: CONFERENCES ON RAILWAY EXCELLENCE, 5., 2016, Melbourne, Australia. Proceedings [...]. [S. l.]: Railway Technical Society of Australasia, 2016. p. 628 - 633. Disponível em: https://search.informit.com.au/documentSummary;dn=437053418057936;res=IELENG . Acesso em: 01 maio 2019.	N.A.	Ingl.
96	TRANSIT DEVELOPMENT CORPORATION (Michigan). Subway Environmental Design Handbook: Volume I - Principles and Applications . 2. ed. Ann Arbor: The Corporation, 1976. 393 p.	N.A.	Ingl.
97	UNITED STATES OF AMERICA. Federal Railroad Administration. United States Department of Transportation. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: Final Report . Washington: Federal Railroad Administration, 2014. 98 p. OMB No. 0704-0188.	N.A.	Ingl.
98	UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE (Estados Unidos). Department of Commerce. RITTER, John; TOMAKA, Jan; MUDA, Jozes. Railroad Gondola or Hopper Car, Particularly A Coal Car . EUA nº 4.930.427, 30 nov. 1988, 5 jun. 1990. 1990.	N.A.	Ingl.
99	VALE (Brasil). Estrada de Ferro Carajás: o caminho onde passa a nossa riqueza . 2018a. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/carajas-railway/Paginas/default.aspx . Acesso em: 05 abr. 2018.	N.A.	Port.
100	VALE (Brasil). Relatório anual, de acordo com a seção 13 ou 15(d) da lei de mercado de capitais de 1934: Para o exercício encerrado em: 31 de dezembro de 2017 . Washington, 2017. 187 p. (Formulário 20-F registrado na Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos).	N.A.	Port.
101	VALE (Brasil). Diretoria de Engenharia de Desenvolvimento Logístico. Benchmarking Operacional Ferrovias . Vitória: Vale S.A., 2015. 27 slides, color.	N.A.	Port.
102	VALE (Brasil). Diretoria de Engenharia de Desenvolvimento Logístico. Benchmarking Operacional Ferrovias . Vitória: Vale S.A., 2018b. 21 slides, color.	N.A.	Port.

103	VALE (Brasil). Gerência Executiva de Engenharia e Planejamento Logístico. ROF - Regulamento de Operação Ferroviária . 4. ed. Vitória: Vale S.A., 2017. 131 p. PGS-002722 do SISPAV.	N.A.	Port.
104	VALEC (Brasil). Diretoria de Operações. ROF - Regulamento de Operação Ferroviária . Brasília, DF: Valec Engenharia, Construções e Ferrovias S.A, 2015. 68 p.	N.A.	Port.
105	VIANA, Augusto Nelson Carvalho; BORTONI, Edson da Costa; NOGUEIRA, Fábio José Horta; HADDAD, Jamil; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; VENTURINI, Osvaldo José; YAMACHITA, Roberto Akira. (oOrg.). Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações . 1. ed. Campinas: ELEKTRO; Universidade Federal de Itajubá; EXCEN; FUPAI, 2012. 314 p.	N.A.	Port.
106	VU, Xuan. Analysis of necessary conditions for the optimal control of a train . 2006. 297 f. Thesis (Doctorate) - School of Mathematics and Statistics, Division of Information Technology Engineering and the Environment, University of South Australia, Adelaide, 2006.	N.A.	Ingl.
107	WANG, Yi; HOU, Zhongsheng; LI, Xingyi. A novel automatic train operation algorithm based on iterative learning control theory. <i>In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SERVICE OPERATIONS AND LOGISTICS, AND INFORMATICS 2008</i> , 10, 2008, [S.l.]. Proceedings [...] . v. 2, p. 1766-1770, out. 2008. IEEE. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1109/soli.2008.4682815 . Acesso em: 01 jul 2018.	N.A.	Ingl.
108	WU, Qing; SPIRYAGIN, Maksym; COLE, Colin. Longitudinal train dynamics: an overview. Vehicle System Dynamics , [S.l.], v. 54, n. 12, p. 1688-1714, 7 set. 2016. Informa UK Limited. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2016.1228988 . Acesso em: 20 jun 2018.	N.A.	Ingl.
109	XUE, Jinlin; GRIFT, Tony E.; HANSEN, Alan C. Effect of biodiesel on engine performances and emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews , [S.l.], v. 15, n. 2, p. 1098-1116, fev. 2011. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.016 . Acesso em: 04 jun. 2018.	N.A.	Ingl.
110	YIN, Jiateng; TANG, Tao; YANG, Lixing; XUN, Jing; HUANG, Yeran; GAO, Ziyou. Research and development of automatic train operation for railway transportation systems: A survey. Transportation Research Part C: Emerging Technologies , [S.l.], v. 85, p. 548-572, dez. 2017. Elsevier BV. Disponível em:	A1	Ingl.

	http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.09.009 . Acesso em: 22 jul. 2018.		
111	YIN, Robert K. Estudo de Caso: Planejamento e Métodos . 2. ed. São Paulo: Bookman, 2001. 200 p.	N.A.	Port.
112	ZHUAN, X.; XIA, X. Speed regulation with measured output feedback in the control of heavy haul trains. Automatica , [S.l.], v. 44, n. 1, p. 242-247, jan. 2008. Elsevier BV. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2007.05.002 . Acesso em: 10 jul. 2018.	A1	Ingl.
Total de periódicos classificados no WebQualis		31	
Total de periódicos classificados no WebQualis no idioma Inglês		25	
Relação (%) entre periódicos publicados em inglês e total de periódicos classificados no WebQualis		81%	

Quadro B.5 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 8 e 9 (quilômetro 545 ao 535)



Quadro B.8 – Procedimento de operação de trens na regional 2 da EFC referente a seção 4 (quilômetro 437 ao 426)

