



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL

Guilherme André Kluch

Método para a determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudos operacionais

FLORIANÓPOLIS

2022

Guilherme André Kluch

Método para a determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudos operacionais

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial

Orientador: Prof. Amir Mattar Valente, Dr.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra

Kluch, Guilherme André

Método para a determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudos operacionais / Guilherme André Kluch ; orientador, Amir Mattar Valente, 2022.

173 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2. Sistemas de Transporte. 3. Definição de Trem-tipo. 4. Operação Ferroviária. 5. Estudo Operacional. I. Valente, Amir Mattar. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Guilherme André Kluch

Método para a determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudos operacionais

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Eduardo Lobo, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Wellington Longuini Repette, Dr.

Instituição Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

João Eugênio Cavallazzi, Dr.

Membro Externo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, área de concentração em Sistemas de Transportes.

Profª. Ana Maria Benciveni Franzoni, Dra.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação

Prof. Amir Mattar Valente, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022.

Este trabalho é dedicado à minha vó Regina Kluch (*In Memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Edimar Leandro Kluch e Soleni Regina Kluch, que são exemplos de perseverança e que sempre demonstram apoio nas minhas decisões. Ao meu irmão, Gustavo Iago Kluch, que me ajudou a refletir para encontrar diferentes soluções para os desafios que surgiram. Às minhas avós, Regina Kluch (*In Memoriam*) e Silda Genero, por todo o carinho. À minha namorada, Tamyres Tomaschewski Dias, que teve toda a paciência e apoio em me acompanhar nesse período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Amir Mattar Valente que depositou a confiança em mim e oportunizou o desenvolvimento deste trabalho com suas contribuições, ensinamentos e flexibilidade. Aos membros da banca Dr. Eduardo Lobo, Dr. Wellington Longuini Repette e Dr. João Eugênio Cavallazzi pela apreciação do trabalho e suas contribuições que enriqueceram o mesmo.

Ao Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans) que me ofereceu conhecimento e oportunidade como bolsista, estagiário e celetista. Ao André Hadlich, Fabiano Giacobbo, Guilherme Koettker e Luiz Gustavo Schmitt que oportunizaram meu crescimento enquanto estive no Labtrans/UFSC e ao André Kretzer que contribuiu em diversas discussões referentes a este estudo.

Ao Eric Wilson da *Berkeley Simulation Software* (BSS) que disponibilizou a utilização do *software Rail Traffic Controller* (RTC), além de prestar o suporte de maneira prestativa.

À Ferrovia Tereza Cristina (FTC) que disponibilizou informações e se dispôs a colaborar na construção desse estudo, em especial ao Benony Schmitz Filho, Abel Possagnolo Sergio e Luis Mário Novochadlo.

Aos colegas da Secretaria de Estado de Infraestrutura e Mobilidade (SIE) de Santa Catarina que me incentivaram a persistir no mestrado, em especial ao Silvio dos Santos que ajudou no desenvolvimento desse trabalho.

Às amigadas que construí em Erechim, Florianópolis e Chapecó que compartilharam dos meus momentos de angústia e aprendizado, fornecendo apoio e horas de descontração.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) que me oportunizou o grau de bacharel em Engenharia Civil e que continua a me proporcionar conhecimento. Às Prof.^a Dr.^a Luciana Rohde e Prof.^a Dr.^a Liane Ramos da Silva que me incentivaram a continuar na vida acadêmica.

Por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A perspectiva de crescentes investimentos na malha ferroviária brasileira estimula o desenvolvimento de estudos que visem a otimização e melhoria da operação ferroviária. Nesse sentido, a presente pesquisa tem a finalidade de desenvolver um método para a determinação de composições de trens-tipo ferroviários de carga, que atenda às restrições impostas à operação e aos parâmetros de desempenho, de acordo com os objetivos ponderados pelo tomador de decisão. Para tanto, desenvolveu-se uma revisão bibliográfica narrativa, que contemplou os principais conceitos necessários para a elaboração do método proposto e, também, buscou-se encontrar o estado da arte do Problema de Formação de Trens, por meio de uma revisão bibliográfica sistemática. Com base nas informações levantadas, desenvolveu-se o método que é composto por quatro etapas e inclui a utilização de ferramentas de simulação de marcha e método de apoio à decisão. O método pode ser uma ferramenta útil na definição de trens-tipo ferroviários de carga, em razão que frequentemente a definição do trem-tipo não é feita com a utilização de simuladores e, quando são utilizados, não são empregados critérios claros que orientem na escolha do melhor trem-tipo pelo tomador de decisão. Além disso, o método apresenta a característica de ser adaptável aos objetivos estratégicos de cada operadora ferroviária e pode anteder às particularidades de projetos específicos pelo fato de contemplar uma etapa que define junto a uma equipe com pelo menos três especialistas em planejamento de transportes e/ou operação de ferrovias os atributos a serem otimizados. Por fim, realizou-se a aplicação do método em uma situação real na malha da Ferrovia Tereza Cristina (FTC) para o transporte de carvão mineral. Os resultados alcançados na aplicação do método estimam ganhos em diminuição de 14% no tempo de ciclo e aumento de 153% na capacidade de transporte frente a um aumento de 112% no consumo de combustível para o fluxo de transporte entre Rio Fiorita e Capivari. Referente ao fluxo entre Sangão e Capivari estima-se a redução em 15% no tempo de ciclo e aumento de 142% na capacidade de transporte frente a um aumento de 111% no consumo de combustível. Para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, a estimativa é duplicar a capacidade de transporte com um aumento de tempo de ciclo inferior a 1%.

Palavras-chave: Trem-tipo. Composição Ferroviária. Simulação Operacional. Análise Multicritério. Operação Ferroviária.

ABSTRACT

The prospect of increasing investments in the Brazilian rail network encourages the development of studies aimed at optimizing and improving of the railway operation. In this sense, the present research has the purpose of developing a method for the determination of railroad freight trains, which meets the restrictions imposed on the operation and performance parameters, according to the objectives considered by the decision maker. For this purpose, a narrative bibliographic review was developed, which contemplated the main concepts necessary for the elaboration of the proposed method and, also, it sought to find the state of the art of the Train Formation Plan (TFP), by through a systematic literature review. Based on the information collected, a method was developed which is composed of four steps and includes the use of running simulation and a decision support method. The method can be a useful tool in the definition of railway freight trains. The definition of the train-type is often not done with the use of simulators and, when they are used, clear criteria are not used to guide the choose the best train-type by the decision maker. In addition, the method has the characteristic of being adaptable to the strategic objectives of each railway operator and can consider the particularities of specific projects because it includes a stage that is defined together with a team with at least three specialists in transport planning and/or railway operation the attributes to be optimized. Finally, the method was applied in a real situation in the Tereza Cristina Railway (FTC) network for the transport of mineral coal. The results achieved in the application of the method estimate gains in a 14% decrease in cycle time and a 153% increase in transport capacity against a 112% increase in fuel consumption for the transport flow between Rio Fiorita and Capivari. Regarding the flow between Sangão and Capivari, it is estimated a 15% reduction in cycle time and a 142% increase in transport capacity compared to an increase of 111% in fuel consumption. For the flow between Novo Horizonte and Capivari, the estimate is to double the transport capacity with a cycle time increase of less than 1%.

Keywords: Train-set. Train Arrangement. Operational Simulation. Multicriteria Analysis. Railway Operation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Linhas férreas em operação e inoperantes no Brasil.....	22
Figura 2 – Pontos notáveis da curva simples.....	32
Figura 3 – Pontos notáveis da curva composta com transição em espiral.....	33
Figura 4 – Pontos notáveis das curvas verticais	34
Figura 5 - Seção transversal da plataforma ferroviária.....	36
Figura 6 - Configuração básica de um pátio ferroviário.....	38
Figura 7 - Configuração de uma pera ferroviária	40
Figura 8 - Esquema de uma locomotiva diesel-elétrica.....	41
Figura 9 - Exemplo de curva de esforço trator de uma locomotiva	42
Figura 11 - Fluxograma do Projeto Básico.....	47
Figura 12 - Exemplo de Seção de Bloqueio	51
Figura 13 - Exemplo de visualização da malha no RTC	54
Figura 14 - Exemplo de Gráfico TPC.....	55
Figura 15 – Etapas da simulação no RailSys.....	56
Figura 16 - Modelo de simulação do OpenTrack	57
Figura 17 - Relação entre alternativas e consequências	65
Figura 18 - Exemplo de árvore de decomposição utilizada no método AHP.....	67
Figura 19 - Passos que compõe o método de revisão	70
Figura 20 - Framework conceitual da revisão sistemática do presente estudo.....	71
Figura 21 - Processo de busca de estudos em bases eletrônicas	73
Figura 22 - Resumo do Processo de Seleção das Publicações	74
Figura 23 - A formação de trens na estrutura clássica das decisões.....	75
Figura 24 - Exemplo de formação de trens em pátios de triagem com rampa	76
Figura 25 - Exemplo de rede e possíveis combinações de trens	78
Figura 26 - Modelos de Blocação de Vagões.....	82
Figura 27 - União de blocos para a formação de trem com múltiplos blocos.....	83
Figura 28 - Ligação de blocos para a formação de trem com múltiplos blocos.....	83
Figura 29 - <i>Variable Basic-Complementary Weight Ratio</i> (VRTT).....	84
Figura 30 - <i>Fixed Basic-Complementary Weight Ratio</i> (FRTT).....	84
Figura 31 - Fluxograma do Método para a Definição de Trem-Tipo.....	94
Figura 32 - Fluxograma das Simulações	99

Figura 33 - Malha Ferroviária da FTC	103
Figura 34 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Rio Fiorita e Capivari.....	111
Figura 35 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Sangão e Capivari.....	111
Figura 36 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Novo Horizonte e Capivari	112
Figura 37 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Urussanga e Capivari.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do modal ferroviário entre os países de dimensões continentais	21
Tabela 2 - Capacidade de carga dos perfis de trilhos	36
Tabela 3 - Carregamentos verticais médios em dormentes devido a uma carga Q	37
Tabela 4 - Características do sistema ferroviário dos Estados Unidos e da Europa.....	46
Tabela 5 - Comparativo entre simuladores de operação de ferrovias selecionados	58
Tabela 6 - Comparativo entre métodos multicritério de apoio à decisão selecionados.....	69
Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados	86
Tabela 8 - Trens-tipo em operação na FTC para o transporte de carvão.....	105
Tabela 9 - Pátios ferroviários em operação na malha da FTC.....	106
Tabela 10 – Terminais ferroviários em operação na malha da FTC	107
Tabela 11 - Informações operacionais referentes aos pátios e terminais ferroviários.....	107
Tabela 12 - Modelos de locomotivas utilizadas pela FTC e suas características	108
Tabela 13 – Curva de consumo de combustível das locomotivas da FTC	108
Tabela 14 - Modelos de vagões utilizados pela FTC e suas características	108
Tabela 15 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Rio Fiorita e Paz Ferreira.....	109
Tabela 16 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Sangão e Paz Ferreira	109
Tabela 17 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Paz Ferreira e Capivari	110
Tabela 18 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Novo Horizonte e Capivari.....	110
Tabela 19 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Urussanga e Capivari.....	110
Tabela 20 - Consumo de combustível por fluxo de transporte	112
Tabela 21 – Curva de consumo de combustível da locomotiva Dash-9.....	114
Tabela 22 - Resultados da simulação Urussanga-Capivari para o Cenário Futuro 1	116
Tabela 23 - Resultados da simulação Novo Horizonte-Capivari para o Cenário Futuro 1	117
Tabela 24 - Resultados da simulação Sangão-Capivari para o Cenário Futuro 1	118
Tabela 25 - Resultados da simulação Rio Fiorita-Capivari para o Cenário Futuro 1	119
Tabela 26 - Resultados da simulação Urussanga-Capivari para o Cenário Futuro 2	120
Tabela 27 - Resultados da simulação Novo Horizonte-Capivari para o Cenário Futuro 2	122
Tabela 28 - Resultados da simulação Sangão-Capivari para o Cenário Futuro 2	123
Tabela 29 - Resultados da simulação Rio Fiorita-Capivari para o Cenário Futuro 2.....	125
Tabela 30 – Atributos definidos para o presente estudo.....	126
Tabela 31 – Ilustração da aplicação da técnica <i>Swing Weighting</i>	127

Tabela 32 – Notas e pesos dos atributos.....	127
Tabela 33 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Urussanga e Capivari	129
Tabela 34 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari	129
Tabela 35 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Sangão e Capivari	130
Tabela 36 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.....	131
Tabela 37 – Consumo de combustível para o fluxo entre Urussanga e Capivari	133
Tabela 38 – Consumo de combustível para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivar	133
Tabela 39 – Consumo de combustível para o fluxo entre Sangão e Capivari	134
Tabela 40 – Consumo de combustível para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari	135
Tabela 41 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Urussanga e Capivari	137
Tabela 42 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari	137
Tabela 43 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Sangão e Capivari	138
Tabela 44 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.....	139
Tabela 45 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Urussanga-Capivari	141
Tabela 46 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Novo Horizonte-Capivari	143
Tabela 47 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Sangão-Capivari.....	144
Tabela 48 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Rio Fiorita-Capivari.....	145
Tabela 49 - Detalhamento com os trens-tipo escolhidos pelo método	156
Tabela 50 - Quadro comparativo de desempenho dos trens-tipo	156

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	<i>Association of American Railroads</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>
AMD	Apoio Multicritério à Decisão
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANTF	Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BAMIN	Bahia Mineração S/A
BSS	<i>Berkeley Simulation Software</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCO	Centro de Controle Operacional
CE	Circular-Espiral
CETF	Centro de Excelência em Tecnologia Ferroviária
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EC	Espiral-Circular
EFA	Estrada de Ferro do Amapá
EFC	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	Estrada de Ferro Vitória a Minas Gerais
EPL	Empresa de Planejamento e Logística S.A.
ET	Espiral-Tangente
ETHZ	Instituto Federal de Tecnologia de Zurique
EVTEA	Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental
FCA	Ferrovias Centro-Atlântica S.A.
FEPASA	Ferrovias Paulista S/A
Ferroeste	Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A.
FFE	<i>Fundación de los Ferrocarriles Españoles</i>
FICO	Ferrovias de Integração do Centro-Oeste
FIOL	Ferrovias de Integração Oeste-Leste
FNS	Ferrovias Norte-Sul

FRTT	<i>Fixed Basic-Complementary Weight Ratio</i>
FTC	Ferrovia Tereza Cristina S.A.
GM	<i>General Motors</i>
HP	<i>Horse-Power</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISF	Instruções de Serviços Ferroviários
LabTrans	Laboratório de Transportes e Logística
MAUT	<i>Multiattribute Utility Theory</i>
MInfra	Ministério da Infraestrutura
MRS	MRS Logística S.A.
OAE	Obra de Arte Especial
OD	Par Origem e Destino
ONTL	Observatório Nacional de Transporte e Logística
OpenTrack	<i>OpenTrack Railway Technology Ltda</i>
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PC	Ponto de Curva
PCV	Ponto de Curva Vertical
PI	Ponto de Interseção
PIV	Ponto de Interseção Vertical
PN	Passagem em Nível
PNL	Plano Nacional de Logística
PNV	Plano Nacional de Viação
PPI	Programa de Parcerias de Investimentos
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
PT	Ponto de Tangente
PTV	Ponto de Tangente Vertical
RF	Revista Ferroviária
RMC	Rumo Malha Central S.A.
RMCon	<i>Rail Management Consultants GmbH</i>
RMO	Rumo Malha Oeste S.A.
RMP	Rumo Malha Paulista S.A.
RMS	Rumo Malha Sul S.A.
ROF	Regulamento de Operação Ferroviária

RTC	<i>Rail Traffic Controller</i>
SIE	Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade
SNCF	<i>Société Nationale des Chemins de fer Français</i>
TE	Tangente-Espiral
TFP	<i>Train Formation Plan</i>
TIS	Terminal Intermodal Sul
TPC	<i>Train Performance Calculator</i>
TU	Tonelada Útil
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VALEC	VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A.
VD	Velocidade Diretriz
VMA	Velocidade Máxima Autorizada
VMC	Velocidade Média Comercial
VRTT	<i>Variable Basic-Complementary Weight Ratio</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	24
1.2	PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.3	OBJETIVOS	26
1.3.1	Objetivo Geral.....	27
1.3.2	Objetivos Específicos	27
1.4	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	27
1.5	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA.....	29
2.1	ENGENHARIA FERROVIÁRIA	29
2.1.1	Via Permanente.....	30
2.1.1.1	<i>Geometria da Via.....</i>	30
2.1.1.2	<i>Seção Transversal da Via</i>	35
2.1.2	Pátio Ferroviário.....	37
2.1.3	Terminal Ferroviário.....	39
2.1.4	Material Rodante	40
2.1.4.1	<i>Locomotivas.....</i>	40
2.1.4.2	<i>Vagões.....</i>	44
2.1.4.3	<i>Trem-tipo</i>	44
2.1.5	Principais Características das Ferrovias	45
2.1.6	Estudos Operacionais	46
2.1.7	Outros Conceitos.....	49
2.2	SIMULAÇÃO	52
2.2.1	Simuladores de Sistemas Ferroviários.....	52
2.2.1.1	<i>Rail Traffic Controller (RTC).....</i>	53
2.2.1.2	<i>RailSys</i>	56

2.2.1.3	<i>OpenTrack</i>	57
2.2.1.4	<i>Análise Comparativa dos Simuladores</i>	58
2.3	TEORIA DA DECISÃO.....	59
2.3.1	Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD)	63
2.3.1.1	<i>Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)</i>	64
2.3.1.2	<i>Método de Análise Hierárquica (AHP)</i>	66
2.3.1.3	<i>Método de Organização de Classificação de Preferência para Avaliações de Enriquecimento (PROMETHEE)</i>	67
2.3.1.4	<i>Análise Comparativa dos Métodos</i>	68
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	70
3.1	DEFINIÇÃO DA QUESTÃO E DO FRAMEWORK CONCEITUAL	71
3.2	ESCOLHA DA EQUIPE DE TRABALHO.....	72
3.3	ESTRATÉGIA DE BUSCA DOS ESTUDOS.....	72
3.3.1	Termos de busca	72
3.3.2	Fontes de busca	73
3.3.3	CrITÉrios de inclusão e exclusão de estudos	73
3.4	BUSCA DE ESTUDOS EM BASES ELETRÔNICAS.....	73
3.5	AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS ENCONTRADOS.....	74
3.6	APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS.....	74
3.7	SÍNTESE DOS ESTUDOS SELECIONADOS	85
3.8	CONSIDERAES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA	
	93	
4	PROPOSIÇÃO DE MÉTODOS PARA A DEFINIÇÃO DE TREM-TIPO	94
4.1	FASE 1 - CENÁRIO BASE	95
4.1.1	Etapa 1.1 - Diagnóstico	95
4.1.2	Etapa 1.2 - Dados de Entrada	95
4.1.3	Etapa 1.3 - Simulação	97

4.1.4	Etapa 1.4 - Calibração	97
4.2	FASE 2.A - CENÁRIO FUTURO	97
4.2.1	Etapa 2.A.1 - Formulação dos Cenários	98
4.2.2	Etapa 2.A.2 - Simulação	98
4.3	FASE 2.B - ATRIBUTOS	100
4.3.1	Etapa 2.B.1 - Definição dos Atributos	100
4.3.2	Etapa 2.B.2 - Definição de Peso dos Atributos	100
4.4	FASE 3 - ANÁLISE MULTICRITÉRIO	100
4.4.1	Etapa 3.1 - Cálculo dos Atributos	101
4.4.2	Etapa 3.2 - Aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo	101
4.4.3	Etapa 3.3 - Análise dos Resultados	101
4.4.4	Etapa 3.4 - Definição do Trem-Tipo	101
5	DEMONSTRAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO	
	102	
5.1	FASE 1 - CENÁRIO BASE	102
5.1.1	Etapa 1.1 - Diagnóstico	102
5.1.2	Etapa 1.2 - Dados de Entrada	106
5.1.3	Etapa 1.3 - Simulação	109
5.1.4	Etapa 1.4 - Calibração	113
5.2	FASE 2.A - CENÁRIO FUTURO	113
5.2.1	Etapa 2.A.1 - Formulação dos Cenários	113
5.2.2	Etapa 2.A.2 – Simulação	114
5.2.2.1	<i>Cenário Futuro 1</i>	114
5.2.2.2	<i>Cenário Futuro 2</i>	119
5.3	FASE 2.B - ATRIBUTOS	126
5.3.1	Etapa 2.B.1 - Definição dos Atributos	126
5.3.2	Etapa 2.B.2 - Definição de Peso dos Atributos	126
5.4	FASE 3 - ANÁLISE MULTICRITÉRIO	128

5.4.1	Etapa 3.1 - Cálculo dos Atributos	128
5.4.1.1	<i>Tempo de Ciclo.....</i>	<i>128</i>
5.4.1.2	<i>Consumo de Combustível</i>	<i>132</i>
5.4.1.3	<i>Capacidade de Transporte</i>	<i>136</i>
5.4.2	Etapa 3.2 - Aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo.....	140
5.4.3	Etapa 3.3 - Análise dos Resultados.....	146
5.4.3.1	<i>Fluxo entre Urussanga e Capivari</i>	<i>147</i>
5.4.3.2	<i>Fluxo entre Novo Horizonte e Capivari</i>	<i>149</i>
5.4.3.3	<i>Fluxo entre Sangão e Capivari.....</i>	<i>151</i>
5.4.3.4	<i>Fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.....</i>	<i>153</i>
5.4.4	Etapa 3.4 - Definição do Trem-Tipo	155
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	158
6.1	CONCLUSÕES	158
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	161
	REFERÊNCIAS.....	162

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, no âmbito das ferrovias, demonstrou historicamente que tem dificuldade em realizar investimentos que proporcionem uma expansão da malha condizente com o tamanho de sua extensão territorial e com as necessidades dos setores exportadores de *commodities* (PINHEIRO e RIBEIRO, 2017).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação do modal ferroviário do Brasil com os outros países de dimensões continentais.

Tabela 1 - Comparação do modal ferroviário entre os países de dimensões continentais

País	Extensão da Malha Ferroviária (mil km)	Densidade da Malha Ferroviária (Km/1.000 km ²)	Participação do modal ferroviário na matriz de transporte de carga (%)
Austrália	36,97	4,80	43%
Brasil	29,18	3,40	15%
Canadá	77,93	7,80	46%
China	124,00	13,20	37%
Estados Unidos	293,56	29,80	43%
Rússia	87,16	5,10	81%

Vermelho: Menor valor do indicador dentre os países selecionados.

Verde: Maior valor do indicador dentre os países selecionados.

Fonte: ANTF (c2021). Adaptado pelo autor.

Na comparação com os países de dimensões continentais, o Brasil apresenta a menor extensão, menor densidade e menor participação do modal ferroviário na matriz de transporte de cargas. Além disso, cerca de 80% das cargas transportadas por ferrovias são compostas por minério e carvão, o que demonstra a pequena diversificação das mercadorias que são transportadas pelo modal (ANTF, c2021).

A malha ferroviária brasileira possui uma extensão de 29.180 km, na qual 20.520 km, o que corresponde a 70,4% da malha, encontra-se em operação, enquanto o restante, 29,6% da malha, não está operacional (ONTL, [2021]).

Na Figura 1 são apresentadas as linhas em operação e as inoperantes da malha ferroviária brasileira.

Figura 1 - Linhas férreas em operação e inoperantes no Brasil



Fonte: BRASIL ([2020]d).

No cenário futuro, o modal ferroviário no Brasil apresenta a perspectiva de dobrar a parcela de carga transportada de 15% para 31% a partir de 2025, por meio dos projetos inclusos no Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) do governo federal (BRASIL, 2019a).

Na carteira de investimentos do PPI, no âmbito do modal ferroviário, há em andamento duas renovações antecipadas de contratos de concessão, três novas concessões, uma desestatização e uma relicitação (BRASIL, [2022]d). No mesmo programa foram concluídas quatro renovações antecipadas e realizadas duas subconcessões (BRASIL, [2022]c).

Em 31 de julho de 2019, por meio do PPI, foi assinado o contrato de subconcessão do Tramo Central e Tramo Sul da Ferrovia Norte-Sul (FNS) – EF-151 – com a Rumo Malha Central S.A. (RMC). A empresa será responsável pela exploração do serviço público de transporte ferroviário de cargas, por meio do modelo vertical, ou seja, além da operação, a concessionária deverá manter e ampliar a infraestrutura ferroviária (BRASIL, [2019]b).

Outra ferrovia subconcedida é a Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL) – EF-334 – entre Ilhéus (BA) e Caetité (BA), a qual é estratégica para o escoamento de minério do sul da Bahia e de grãos do oeste deste mesmo estado (BRASIL, [2021]a). O contrato de subconcessão foi assinado em 3 de setembro de 2021, sendo a empresa Bahia Ferrovias S.A., vinculada à Bahia Mineração S/A (BAMIN), responsável por concluir as obras de construção da ferrovia e operar por 35 anos (BAMIN, c2022).

A Ferrogrão – EF-170 – entre Sinop (MT) e Itaituba (PA) é um projeto que visa consolidar o novo corredor ferroviário de exportação do Brasil pelo Arco Norte (BRASIL, [2021]b). Este é um projeto *greenfield*, ou seja, será um ativo novo no qual a concessionária fará a construção da ferrovia e, posteriormente, será responsável pela sua operação. A Ferrogrão possibilitará reduzir o custo de transporte de grãos do Centro-Oeste até o Porto de Miritituba no estado do Pará (BRASIL, [2020]b).

Além das novas ferrovias, encontram-se em andamento as renovações antecipadas dos contratos de concessão da Ferrovia Centro-Atlântica S.A. (FCA) e Rumo Malha Sul S.A. (RMS). Dentre as renovações, a concessão da Rumo Malha Paulista S.A. (RMP) teve seu Termo Aditivo assinado em 27 de maio de 2020 e prevê a realização de 6 bilhões de reais em investimentos (BRASIL, 2020e). Outra ferrovia que teve sua renovação antecipada foi a MRS Logística S.A. (MRS), com a obrigatoriedade da empresa realizar investimentos previstos em R\$ 9,7 bilhões (BRASIL, [2022]b).

As ferrovias concedidas à Vale S/A, Estrada de Ferro Carajás (EFC) e Estrada de Ferro Vitória a Minas Gerais (EFVM), tiveram seus termos aditivos de prorrogação dos contratos de concessão assinados em 18 de dezembro de 2020. Em contrapartida, serão realizados mais de R\$ 17 bilhões em investimentos e R\$ 4,6 bilhões em outorgas, sendo parte desse valor destinado à construção da Ferrovia de Integração do Centro-Oeste (FICO) entre Mara Rosa (GO) e Água Boa (MT) (BRASIL, 2020c).

A estruturação do modelo de concessão do trecho em construção da FICO está em análise e uma possibilidade é englobá-lo em uma concessão única, junto à FIOL, trechos II (Caetité-Barreiras) e III (Barreiras-Figueirópolis), os quais foram qualificados no PPI (RF, 2021).

A Estrada de Ferro Paraná Oeste S.A. (Ferroeste) é uma empresa que tem o Governo do Paraná como maior acionista e opera uma ferrovia entre Guarapuava (PR) e Cascavel (PR). Esse trecho compõe o chamado Projeto do Corredor Oeste de Exportação, que prevê a revitalização da ferrovia existente e construção de novos trechos, totalizando 1.370 km de

ferrovias. Para efetuar o projeto, como empreendimento atrativo para a iniciativa privada, a empresa está em processo de desestatização (BRASIL, [2022]a).

A denominada Malha Oeste, ferrovia concedida à Rumo Malha Oeste S.A. (RMO), está em fase de estudos para a relicitação, haja vista que a RMO protocolou em 21 de julho de 2020 o pedido de devolução da concessão. A nova licitação tem como objetivo a aplicação de investimentos para modernizar e ampliar a ferrovia (BRASIL, [2022]e).

Além do PPI, estão previstos investimentos no modal ferroviário por meio do Programa de Autorizações Ferroviárias, também denominado de Pro Trilhos (BRASIL, [2022]f). O programa viabiliza a exploração do serviço de transporte ferroviário mediante o modelo de autorizações ferroviárias, estabelecido pela Lei nº 14.273, de 23/12/2021 (BRASIL, 2021c).

Ao todo estão em análise 76 requerimentos de diferentes entes privados que estão interessados em construir e operar mais de 19 mil de ferrovias, o que corresponde a mais de R\$ 224 bilhões em investimentos (BRASIL, [2022]f). Após a solicitação do requerente, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) avalia a compatibilidade locacional da ferrovia, analisa a convergência com política pública do setor ferroviário e, se atendido a todos os critérios de análise, é emitida a autorização do requerimento (BRASIL, 2021c).

De acordo com o Secretário Nacional de Transportes Terrestres do Ministério da Infraestrutura (MInfra), a demanda por eficiência e competitividade no setor ferroviário oportunizará o desenvolvimento de soluções nacionais que envolvam a automação e a digitalização de processos (BRASIL, 2020a).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As composições ferroviárias, que são constituídas de vagões e locomotivas, podem ser organizadas de diferentes formas para atender a uma demanda de transporte. Nesse sentido, a depender do objetivo do planejador da operação, o trem-tipo pode ter um número reduzido de vagões de forma a reduzir o tempo de ciclo ou uma configuração que vise a redução de consumo de combustível, por exemplo.

Ressalta-se que o termo trem-tipo é frequentemente associado a um carregamento móvel aplicado em Obras de Arte Especiais (OAEs) rodoviárias e ferroviárias. A definição de trem-tipo considerada nesse estudo é a de trem-tipo empregado em estudos operacionais, ou seja, a composição mais frequente relacionada a uma certa demanda. Esse trem-tipo é utilizado

no planejamento como informação necessária para estimar custos, receitas, dimensionar material rodante e estudos de viabilidade econômica.

Relacionada com os custos e impacto ambiental, a eficiência energética, no âmbito do modal ferroviário, consiste em transportar um alto volume de carga com o mínimo consumo de combustível. Os custos com combustível representam cerca de 35% dos custos totais da EFC (CABRAL, 2017) e quase 29% das despesas anuais na Ferroeste (FABRO, 2015). Com base na grande representatividade do custo de combustível nas despesas das empresas ferroviárias, estima-se que as mesmas desenvolvam estudos e utilizem ferramentas que reduzam esse consumo (CABRAL, 2017).

O custo é um fator importante no processo decisório, porém nem sempre é avaliado como o mais importante. A qualidade do serviço também deve ser considerada e está relacionada com o tempo de trânsito, haja vista que a sua variação pode ser considerada como um custo adicional, ou seja, como um custo de oportunidade devido ao atraso (HASHIBA, 2012).

Dessa forma, verifica-se a necessidade de gestão operacional do material rodante de forma a alcançar um equilíbrio entre a redução de custos, alocação otimizada dos ativos, diminuição do tempo de trânsito e redução nas emissões de gases poluidores, principalmente, do dióxido de carbono (CO₂).

1.2 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O processo decisório para a definição do trem-tipo compreende a determinação dos modelos, quantidades e posição dos vagões e locomotivas da composição ferroviária que fará o transporte de carga por determinados trechos da ferrovia. Essa múltipla possibilidade de configurações resultará em diferentes desempenhos operacionais.

Para tanto, há uma série de restrições que devem ser consideradas. No âmbito da infraestrutura da ferrovia, há restrição quanto às rampas máximas, raio mínimo das curvas e comprimento útil dos pátios de cruzamento. Além disso, o modelo de operação dos terminais, o máximo esforço trator nos engates e a velocidade mínima em regime contínuo das locomotivas influenciam na definição do trem-tipo.

Atendendo às restrições supracitadas, o desempenho do trem-tipo pode ser analisado de várias formas, como em relação à eficiência energética, tempo de trânsito, tempo de ciclo, produtividade da locomotiva e produtividade do vagão. Esse conjunto de indicadores, se

analisados de acordo com os objetivos do tomador de decisões, podem trazer uma escolha que ofereça ganhos no âmbito de custos, satisfação do cliente e redução do impacto ambiental.

Ressalta-se que o tipo de carga transportada pelo trem-tipo analisado pode gerar uma abordagem diferente quanto à importância de cada parâmetro de desempenho da composição. Nesse sentido, o transporte de cargas de alto valor agregado tende a priorizar a redução do tempo de trânsito, enquanto cargas de baixo valor agregado, como as *commodities*, o custo tem uma relevância maior.

Com base no exposto, o presente trabalho se propõe a desenvolver um método para a determinação de composições de trens-tipo ferroviários de carga, que atenda às restrições impostas à operação e que atenda aos parâmetros de desempenho de acordo com os objetivos ponderados pelo tomador de decisão.

A justificativa para desenvolver essa pesquisa está baseada na necessidade de elaboração de estudos relacionados ao modal ferroviário, relacionados à renovação das concessões e também dos novos empreendimentos a serem autorizados por meio do novo regime de construção e operação de ferrovias. Além disso, às empresas ferroviárias o método pode auxiliar no dimensionamento de trens-tipo ferroviário para atender novas demandas do mercado ou otimizar operações existentes.

Os investimentos no modal ferroviário tem motivado o desenvolvimento de pesquisas na área, em consonância com a criação do Centro de Excelência em Tecnologia Ferroviária (CETF), que será instalado em Anápolis (GO) (BRASIL, 2021d).

A partir da revisão bibliográfica desenvolvida, foram verificadas diversas abordagens sobre o tema, porém não foram encontrados estudos que abordam o dimensionamento de trens-tipo ferroviários utilizando, em conjunto, métodos de análise multicritério e simulação, demonstrando a relevância do presente estudo.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, conforme é detalhado a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho consiste em desenvolver um método para a determinação da composição de trens-tipo ferroviários para o transporte de cargas, com o uso combinado de ferramentas de simulação de marcha e método multicritério de apoio à decisão.

1.3.2 Objetivos Específicos

Além do objetivo geral, o trabalho possui objetivos específicos, os quais são elencados a seguir.

- a) Realizar e apresentar uma revisão bibliográfica sistemática, que visa coletar e analisar artigos que abordam a problemática da determinação de composições de trens-tipo ferroviários de carga.
- b) Demonstrar a aplicabilidade do método proposto para uma situação real ou factível.
- c) Avaliar o impacto da alteração dos parâmetros na determinação de composições de trens-tipo.

1.4 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Na etapa de demonstração da aplicabilidade do método não foram consideradas as restrições de velocidades provocadas pela existência de Passagens em Nível (PNs). Essa limitação foi adotada com o objetivo de simplificar o cadastro dos dados da ferrovia no *software*, reduzindo o tempo de pesquisa da coleta de informações e inserção no sistema de forma a viabilizar a conclusão do presente trabalho no prazo previsto.

O *software* de simulação escolhido não considera os efeitos provocados pela superelevação e pela superlargura adotadas no projeto geométrico da via ferroviária. Além disso, esse sistema também não engloba a operação nos terminais ferroviários. Nesse sentido, as limitações supracitadas se devem ao *software* utilizado.

Ainda, dentre as limitações assumidas nessa pesquisa pode-se citar que o método proposto foi restrito à determinação da composição de trens-tipo para o transporte de cargas, ou seja, não são consideradas as especificidades do transporte ferroviário de passageiros. Essa

limitação foi adotada para fins de restringir o escopo do trabalho para que o mesmo pudesse ser finalizado no prazo previsto.

Ressalta-se, também, que há limitações inerentes ao caráter acadêmico deste trabalho, tendo em vista que o autor não dispõe de equipe multidisciplinar para a elaboração do estudo e a obtenção de dados é limitada àqueles encontrados de forma pública e aos disponibilizados pela concessionária ferroviária.

As locomotivas que operam na FTC são modernizadas e, portanto, sofreram alterações das características originais, conforme detalhado na seção 5.1.2. Os dados referentes às locomotivas utilizados no presente estudo foram fornecidos pela FTC, Locofer e IPT. Porém, recomenda-se que sejam utilizados os dados, dentre eles a curva de consumo de combustível, disponibilizados pelo fabricante das locomotivas.

1.5 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está disposto em seis capítulos, incluindo este intitulado INTRODUÇÃO. No referido capítulo, é apresentada uma contextualização do setor ferroviário no Brasil e uma comparação com outros países. Ademais, é exposto o problema e a justificativa da escolha do tema abordado por esta pesquisa. Também são elencados o objetivo geral, os objetivos específicos e as limitações do estudo.

No Capítulo 2 (REVISÃO BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA) é apresentada a revisão bibliográfica narrativa referente às disciplinas de estudo que são base para o desenvolvimento do método proposto.

No Capítulo 3 (REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA) é apresentada a revisão bibliográfica sistemática que aborda publicações nacionais e internacionais referentes à problemática da formação de trens.

No Capítulo 4 (PROPOSIÇÃO DE MÉTODO PARA A DEFINIÇÃO DE TREM-TIPO) é apresentada de forma detalhada as fases e etapas do método proposto.

No Capítulo 5 (DEMONSTRAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO) é apresentada a aplicação do método nos fluxos de transporte de carvão mineral na Ferrovia Tereza Cristina (FTC).

No Capítulo 6 (CONSIDERAÇÕES FINAIS) são apresentadas as conclusões obtidas a partir do desenvolvimento deste estudo e sugestões de trabalhos futuros relacionados com o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA

A presente revisão bibliográfica narrativa foi desenvolvida a partir de pesquisas realizadas em livros, artigos e a partir da análise crítica pessoal do autor. Como o tema desse trabalho envolve diferentes campos de conhecimento, a pesquisa foi realizada em variadas áreas, conforme apresentado nos itens a seguir:

- 2.1 ENGENHARIA FERROVIÁRIA
- 2.2 SIMULAÇÃO
- 2.3 TEORIA DA DECISÃO

Dessa forma, nessa seção são apresentados os conceitos relativos a cada uma das áreas supracitadas.

2.1 ENGENHARIA FERROVIÁRIA

Dentre os principais conceitos necessários para elaborar este trabalho estão aqueles que condizem respeito à Engenharia Ferroviária. Em linhas gerais, conforme apresentado por Nabais (2014), a ferrovia é composta por dois subsistemas principais, denominados de material rodante e via permanente. Rosa (2016) também inclui o sistema de comunicação e sinalização como um terceiro elemento básico de uma ferrovia, porém, este é considerado virtual por não possuir nenhum elemento físico, apenas salas e computadores.

Ressalta-se que a operação ferroviária, além de abordar a circulação de trens, atua na operação de pátios e terminais (ROSA, 2016).

No âmbito da Engenharia Ferroviária, os conceitos necessários para o entendimento e desenvolvimento deste trabalho podem ser elencados a seguir.

- 2.1.1 Via Permanente
- 2.1.2 Pátio Ferroviário
- 2.1.3 Terminal Ferroviário
- 2.1.4 Material Rodante
- 2.1.5 Principais Características das Ferrovias

- 2.1.6 Estudos Operacionais
- 2.1.7 Outros Conceitos

Os conceitos supracitados são apresentados de forma detalhada no decorrer da presente seção.

2.1.1 Via Permanente

A via permanente, de acordo com Santos (2011), pode ser definida como a linha por onde circula o trem. Nabais (2014) aponta que a via permanente pode ser dividida em infraestrutura e superestrutura.

Para o presente estudo abordou-se os aspectos da via permanente que refletem na operação ferroviária como, por exemplo, as restrições de peso impostas pela grade ferroviária e os esforços envolvidos no deslocamento dos trens, que impactam também na definição dos trens-tipos.

Com base no exposto, a movimentação das composições é restringida pela geometria da via, haja vista que as curvas horizontais e as rampas ascendentes ocasionam as denominadas resistências acidentais. Enquanto os componentes da seção transversal da via limitam o peso do material rodante e/ou da carga transportada.

2.1.1.1 Geometria da Via

A geometria da via é definida com base em algumas premissas definidas no projeto conceitual da ferrovia. Dentre essas características pode-se citar a velocidade diretriz ou de projeto a ser adotada, que é definida como a velocidade máxima que o trem-tipo pode trafegar em condições normais de segurança. Ressalta-se que o terreno onde a ferrovia vai ser construída pode influenciar na definição da velocidade diretriz a ser adotada, uma vez que busca-se a viabilidade econômica do projeto (PAIVA, 2016).

De forma comparativa, Santos (2011) observou que ferrovias modernas, com rampa de inclinação menor que 1,0% e curvas com raios maiores que 600 m resultam em um custo operacional bem menor que as ferrovias antigas. Porém, uma ferrovia com essas características tem custo de implantação, composto por terraplenagem, drenagem, túneis e OAES, de até 60% do custo total da obra.

Paiva (2016) apresenta a velocidade de 80 km/h como sendo o valor mínimo usual para uma ferrovia utilizada para transporte de cargas e 100 km/h como valor recomendável. Há ainda a definição de Velocidade Máxima Autorizada (VMA), na qual adota-se a velocidade de projeto geométrico e pode ser restringida de acordo com as condições da via permanente, material rodante e segurança operacional (VALEC, 2016). Essa restrição da velocidade é adotada até que seja corrigido o problema (ANTT, 2016).

Conforme apresentado por Nabais (2014) as especificações recomendadas para a elaboração de projetos geométricos de ferrovias são apresentadas pela Especificação de Projeto nº 80-EG-000A-26-0000 (VALEC, 2011) e nº 80-EG-000A-29-0000 (VALEC, 2019), além das instruções de serviço de projetos rodoviários presentes na IS-208, da IPR 726 (DNIT, 2006) e na IPR 706 (DNER, 1999), com algumas adequações específicas para projetos ferroviários.

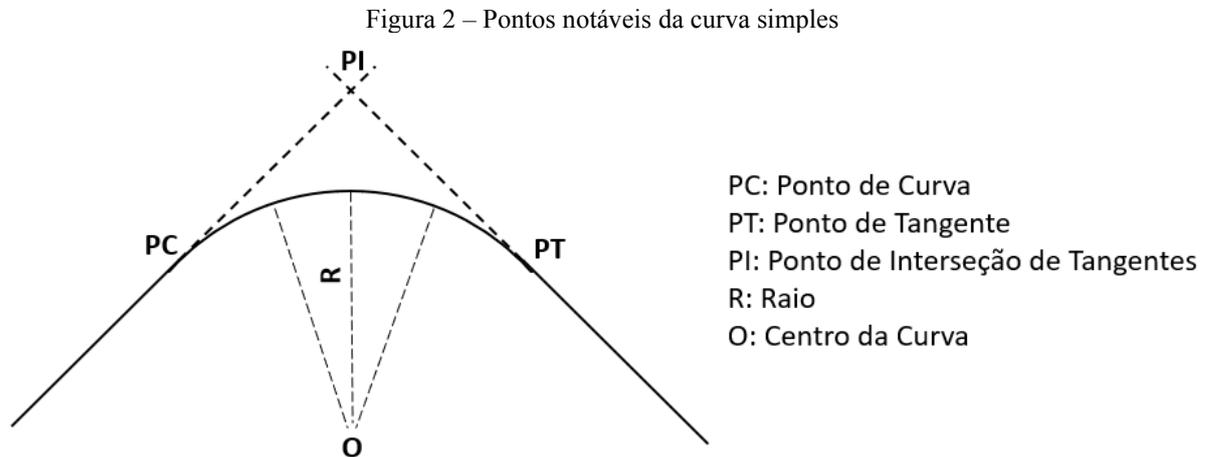
Compõe a geometria da via: o projeto geométrico horizontal, vertical e a seção transversal típica. Ainda segundo Paiva (2016), o projeto geométrico horizontal, também denominado de projeto planimétrico, é elaborado definindo os pontos notáveis e auxiliares para a locação de curvas circulares, espirais, de Aparelhos de Mudança de Via (AMVs) e demais pontos de que forem considerados importantes para a implantação da ferrovia.

Dentre as várias possibilidades de concepção de curvas no projeto do plano horizontal da ferrovia, nesse estudo são abordadas as curvas circular simples e circular composta com transição em espiral. A curva circular simples é caracterizada por ter raio constante ao longo da curva, enquanto a curva composta com transição em espiral é composta por seguimento central de curva circular simples conectada às tangentes por meio de seguimentos de curva de raio variável, geralmente com comportamento espiral. De acordo com Paiva (2016), as curvas de transição proporcionam um aumento do conforto e da segurança na ferrovia em razão da variação da aceleração centrífuga ao longo da mesma.

Os pontos notáveis das curvas horizontais circulares simples, que integram os projetos planimétricos das ferrovias, assim como as suas definições são apresentados a seguir.

- **Ponto de Interseção (PI):** ponto de interseção entre duas tangentes no plano do projeto planimétrico.
- **Ponto de Curva (PC):** ponto de início de uma curva circular sem transição e término da tangente, no plano do projeto planimétrico.
- **Ponto de Tangente (PT):** ponto de início da tangente e término da curva circular sem transição, no plano do projeto planimétrico.

De forma gráfica, na Figura 2 é apresentado um exemplo da disposição dos pontos notáveis da curva circular simples.



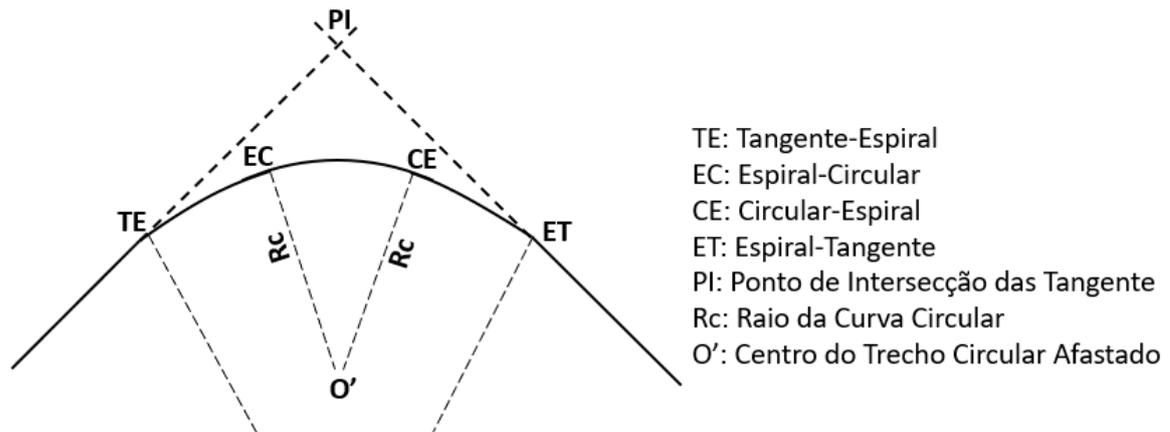
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os pontos notáveis das curvas horizontais compostas de transição em espiral, que integram os projetos planimétricos das ferrovias, assim como as suas definições são apresentados a seguir.

- **Ponto de Interseção (PI):** ponto de interseção entre duas tangentes no plano do projeto planimétrico.
- **Tangente-Espiral (TE):** ponto que delimita o término da tangente e o início da curva de transição espiral, no plano do projeto planimétrico.
- **Espiral-Circular (EC):** ponto que delimita o término da curva de transição espiral e o início da curva circular, no plano do projeto planimétrico.
- **Circular-Espiral (CE):** ponto que delimita o término da curva circular e o início da curva de transição espiral, no plano do projeto planimétrico.
- **Espiral-Tangente (ET):** ponto que delimita o término da curva de transição espiral e o início da tangente, no plano do projeto planimétrico.

De forma gráfica, na Figura 3 é apresentado um exemplo da disposição dos pontos notáveis da curva composta com transição em espiral.

Figura 3 – Pontos notáveis da curva composta com transição em espiral



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O grau de curva, definido como o ângulo central correspondente a uma corda de comprimento c , pode ser utilizado para caracterizar uma curva. Ao determinar o grau de curva a partir dos valores de raio e comprimento de corda, é cometido um erro, porém, esse valor é inferior a 0,01 m se utilizadas cordas de 20 m em curvas de raios maiores que 180 m, cordas de 10 m em curvas de raios entre 65 e 180 m, cordas de 5 m quando o raio for entre 25 e 65 m e cordas de 2 metros quando o raio for inferior a 25 m (PONTES FILHO, 1998).

Ressalta-se que é recomendado raios de no mínimo 343,823 metros para a construção de ferrovias (NABAIS, 2014). A fórmula aplicada para a determinação do grau de curva (G_{20}) com raio superior a 180 metros é apresentada a seguir.

$$G_{20} = \frac{1.145,92}{R}$$

Em que:

- G_{20} = grau de curva para cordas de 20 m, em graus
- R = raio da curva, em metros.

Contudo, na literatura estadunidense, costuma-se utilizar cordas de 100 pés ou 30,48 m. Portanto, o grau de curva para cordas de 30,48 m é formulado a seguir.

$$G_{30,48} = \frac{1.746,38}{R}$$

Em que:

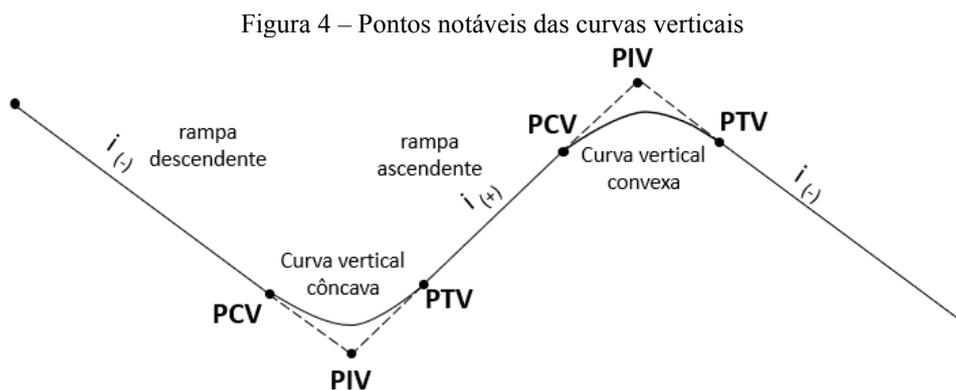
- $G_{30,48}$ = grau de curva para cordas de 30,48 m, em graus
- R = raio da curva, em metros.

No âmbito do projeto altimétrico os pontos notáveis caracterizam o perfil longitudinal da ferrovia com suas inclinações, curvas verticais e cotas desse perfil (PAIVA, 2016).

Os pontos notáveis das curvas verticais, que integram os projetos altimétricos das ferrovias, assim como as suas definições são apresentados a seguir:

- **Ponto de Interseção Vertical (PIV):** ponto de interseção entre duas tangentes no plano do projeto altimétrico.
- **Ponto de Curva Vertical (PCV):** ponto que delimita o fim da tangente e o início da curva no plano do projeto altimétrico.
- **Ponto de Tangente Vertical (PTV):** ponto que delimita o fim da curva e o início da tangente no plano do projeto altimétrico.

De forma gráfica, na Figura 4, a seguir, é apresentado um exemplo da disposição dos pontos notáveis das curvas verticais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Deve-se observar a inclinação das rampas, calculada conforme a equação apresentada a seguir, haja vista que os veículos de tração ferroviários são penalizados pela resistência ao movimento. Dessa forma, para garantir um melhor desempenho de tração, sugere-se adotar

rampas com a menor inclinação possível (PAIVA, 2016). Ressalta-se que deve ser observado também uma inclinação mínima para garantir a drenagem lateral da via.

$$i(\%) = \frac{\Delta C}{\Delta E}$$

Em que:

- $i(\%)$ = inclinação da rampa, em porcentagem
- ΔC = Cota final – Cota inicial, em metros
- ΔE = Estaca final – Estaca inicial, em metros.

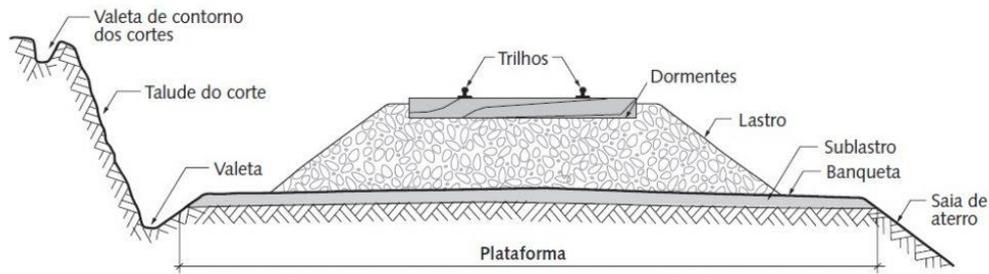
Outros componentes do projeto geométrico de uma ferrovia são a superelevação e a superlargura. A superelevação consiste na elevação do trilho externo em relação ao interno da via. A superlargura é utilizada em curvas com raios pequenos, em que são alargadas as bitolas entre 1 e 3 cm, permitindo uma melhor inscrição dos veículos de base rígida mais comprida (PAIVA, 2016).

2.1.1.2 *Seção Transversal da Via*

Por meio da seção da transversal da via, podem-se identificar os componentes básicos de uma via ferroviária: a superestrutura e a infraestrutura. A superestrutura é composta pela grade ferroviária (trilhos, dormentes e fixações), lastro e sublastro, enquanto a infraestrutura é formada pela plataforma da via, cortes, aterros, sistemas de drenagem e faixa de domínio (PAIVA, 2016).

Os principais componentes da via ferroviária podem ser observados na seção transversal apresentada na Figura 5.

Figura 5 - Seção transversal da plataforma ferroviária



Fonte: NABAIS (2014).

A grade da via férrea, conforme supracitado, é composta por três elementos: trilhos, dormentes e fixações. Esse conjunto recebe solicitações provenientes do tráfego das composições, tanto verticais quanto longitudinais. Os esforços verticais se devem ao peso dos veículos enquanto os longitudinais são provenientes do esforço de tração das rodas motrizes quando se inicia e também quando se mantém o deslocamento das composições, e o esforço de frenagem (PAIVA, 2016).

Os trilhos têm a finalidade de prover uma superfície de rolamento aos veículos ferroviários e possuem diferentes formas e comprimentos (SANTOS, 2011). A capacidade de carga depende do perfil dos trilhos, os quais são padronizados e identificados pelos seus pesos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Capacidade de carga dos perfis de trilhos

Perfil do trilho	Peso (kg/m)	Capacidade (t/Eixo)
TR-32	32,00	16
TR-37	37,10	18
TR-45	44,64	20
TR-57	56,90	25
TR-68	67,56	30

Fonte: ABNT (2012) e SANTOS (2007). Adaptado pelo autor.

De acordo com Nabais (2014), os dormentes são elementos que tem como função receber dos trilhos e transmitir ao lastro as cargas geradas pelos veículos ferroviários. Dessa forma, o carregamento vertical ocasionado por um rodéiro nos trilhos é distribuído no sentido longitudinal, principalmente, entre os 5 dormentes mais próximos (PAIVA, 2016). Como exemplo, na Tabela 3 é apresentada a distribuição de um carregamento Q entre 5 dormentes, considerando que Q está localizado no centro do dormente 3.

Tabela 3 - Carregamentos verticais médios em dormentes devido a uma carga Q

Autor	Dormente				
	1	2	3	4	5
Togno (1975)	10% Q	20% Q	40% Q	20% Q	10% Q
Liechtberger (2005)	7% Q	23% Q	40% Q	23% Q	7% Q

Fonte: PAIVA (2016).

Os componentes que fazem a ligação entre os trilhos e os dormentes são denominados de fixações, que têm o objetivo de manter o trilho na posição correta e manter a bitola da via. Ressalta-se que as fixações devem oferecer resistência ao deslocamento longitudinal e transversal dos trilhos, haja vista que a variação de temperatura e a frenagem das composições pode resultar nesses efeitos (SANTOS, 2011).

De forma resumida, a transmissão de cargas horizontais e verticais na grade ferroviária é provocada pelas composições ferroviárias e efeitos de temperatura, principalmente, nos trilhos que, por sua vez transmite aos dormentes. Nesse processo, a fixação deve resistir aos deslocamentos (SANTOS, 2011). Os dormentes, por sua vez, transmitem ao lastro os esforços resultantes da movimentação de veículos ferroviários (NABAIS, 2014).

Dentre as funções que o elemento lastro possui, de acordo com Nabais (2014), destaca-se a distribuição dos esforços resultantes sobre o sublastro, produzindo uma taxa de trabalho compatível com a sua capacidade de carga. Além disso, deve fornecer uma certa elasticidade de forma a atenuar as trepidações provenientes da passagem das composições ferroviárias.

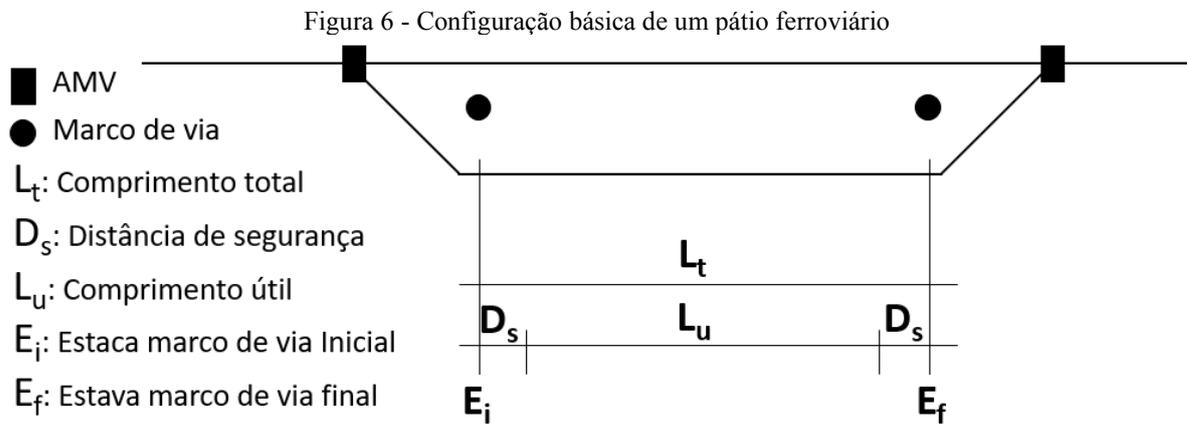
Os elementos apresentados nessa seção têm relação direta com os veículos ferroviários, uma vez que o lastro, dormentes, trilhos e solo devem ser dimensionados para o trem-tipo que irá operar na ferrovia e poderão oferecer restrições a novas composições, se mais pesadas, ou até mesmo a capacidade de carga dos vagões poderá não ser toda utilizada. Além desses elementos, Santos (2007) ressalta que as OAEs também são dimensionadas de acordo com o trem-tipo que circulará na linha, geralmente, entre 16 e 32 toneladas de carga por eixo.

2.1.2 Pátio Ferroviário

Segundo Rosa (2016) um pátio ferroviário pode ser definido como um conjunto de vias ferroviárias localizadas em área plana. Essas linhas podem ter diferentes finalidades, como o desmembramento e formação de trens, o estacionamento de carros e vagões, a operação de

carga e descarga de produtos, a manutenção de material rodante, ou ainda, pode servir como desvios de cruzamento.

Na Figura 6 é apresentada a configuração básica de um pátio ferroviário.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O desvio, segundo o Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) (VALEC, 2016), é uma linha adjacente à linha principal de um pátio ferroviário que pode ter diversas finalidades, a saber: desvio de vagões, formação de trens, estacionamento de veículos ferroviários e acesso aos terminais particulares ou próprios. Ressalta-se que para manter a segurança das operações, determina-se o comprimento útil do desvio (L_u), o qual é definido como a parte onde o material rodante pode ficar estacionado sem que ocorra colisão com o material rodante que está em linha adjacente. O comprimento útil é calculado conforme a fórmula apresentada a seguir.

$$L_u = \Delta E_{mv} - 2 \times D_s$$

Em que:

- L_u = Comprimento útil, em metros.
- ΔE_{mv} = Estaca do marco de via final (E_f) – Estaca do marco de via inicial (E_i), em metros.
- D_s = Distância de segurança, em metros.

Segundo Rosa (2016), deve-se adotar uma distância de segurança (D_s) de no mínimo 25 m, ou seja, considerando uma D_s para cada AMV, são ao todo 50 m em cada desvio, com o objetivo de garantir a segurança na operação ferroviária, por conta da frenagem das composições.

O Aparelho de Mudança de Via (AMV), segundo Paiva (2016), é um elemento da ferrovia que permite que as composições ferroviárias passem de uma via para outra por meio de uma derivação da primeira via, ou seja, é o AMV que permite o desvio dos trens. O acionamento desses dispositivos é realizado de forma remota quando o sistema de controle de tráfego é centralizado ou de forma manual e, nesse caso, exige a presença humana.

O marco de via, também denominado de marco de entrevista ou marco de segurança, é definido, de acordo com o ROF (VALEC, 2016), como um elemento físico cravado no lastro a uma distância segura entre duas linhas ferroviárias paralelas que indicam a posição limite de estacionamento ou parada de composições ferroviárias, sem restringir o gabarito da linha ao lado.

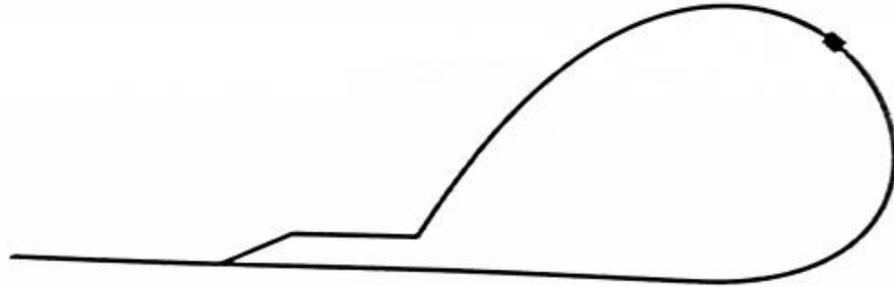
Dentre as especificações que os pátios ferroviários devem seguir para um bom funcionamento de uma ferrovia, Nabais (2014) cita que o perfil da linha ferroviária no local de implantação do pátio deve estar preferencialmente em nível ou, no máximo, com rampa de 0,2%. Além disso, sugere que a geometria em planta e perfil do pátio ferroviário deve possuir tangentes suficientes para a implantação do AMV.

2.1.3 Terminal Ferroviário

Conforme descrito no ROF (VALEC, 2016), o terminal é uma estrutura física que contém desvio ferroviário, com a finalidade de desmembrar o trem em lotes de vagões, que são enviados para os terminais ferroviários específicos (ROSA, 2016). Nesse local são realizadas operações de carga, descarga, transbordo intermodal e armazenagem, dispendo de instalações e equipamentos adequados para tal (VALEC, 2016).

Após carregar os vagões nos terminais ferroviários específicos, movimentam-se os vagões de volta ao desvio ferroviário para serem classificados e reagrupados por destino, cliente e produto (ROSA, 2016). Ressalta-se que de acordo com o tipo de carga e vagões operados nos terminais, existem equipamentos específicos que são utilizados como moegas, viradores de vagões, tulhas, empilhadeiras, pórticos e bicos de carregamento, por exemplo. Além disso, há outras configurações de terminais, dentre eles a pera ferroviária, que permite a carga ou descarga de grandes volumes de produtos a granel, geralmente sem a necessidade de desacoplamento da composição durante a operação (NABAIS, 2014). A configuração de uma pera ferroviária é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Configuração de uma pera ferroviária



Fonte: Nabais (2014).

Pode-se concluir que o tamanho dos desvios, os equipamentos utilizados na carga e descarga, a configuração do terminal ferroviário e também a capacidade de armazenagem afetam no tempo de operação dos terminais e na escolha da configuração ideal das composições ferroviárias de acordo com a realidade de cada situação.

2.1.4 Material Rodante

A bibliografia consultada apresenta diferentes denominações para o conjunto formado por uma ou mais locomotivas – material de tração – acopladas, por meio de engates, a um ou mais vagões – material rebocado –, a saber: trem, composição ferroviária ou comboio.

2.1.4.1 Locomotivas

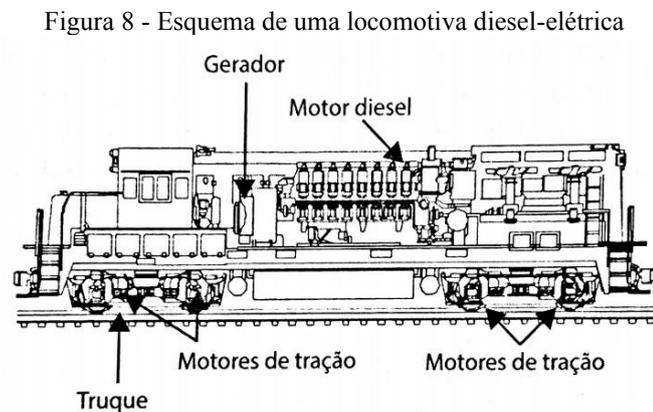
A locomotiva é um material de tração e pode ser classificada em locomotivas de viagem e de manobra, tendo como finalidade puxar o trem de carga ou passageiros pela via principal ou secundária e movimentar os vagões de uma linha a outra nos pátios ferroviários, respectivamente (ROSA, 2016).

As locomotivas podem ser classificadas de acordo com a sua forma de tração, a saber: vapor, elétrica e diesel. No caso das locomotivas a vapor, o movimento é provocado pelo vapor sob pressão que aciona os êmbolos, os quais transmitem esse movimento até as rodas por meio de puxavantes e braçagens. Muito utilizadas no passado, atualmente as locomotivas a vapor são apenas utilizadas em serviços de trens turísticos e culturais (NABAIS, 2014).

Por sua vez, as locomotivas elétricas obtêm energia para tracionar as composições por meio de sistemas de eletrificação, que podem ser por rede aérea ou de um terceiro trilho.

Ademais, segundo Nabais (2014) são utilizados equipamentos de controle que alimentam os motores de tração localizados nos truques. Esse tipo de tração foi utilizado no Brasil para o transporte de cargas, conforme detalhado por Santos (2011), na Companhia Paulista de Estradas de Ferro, Estrada de Ferro Sorocabana, Ferrovia Paulista S/A (FEPASA) e Ferrovia do Aço. Porém, de acordo com Nabais (2014) a obsolescência dos dispositivos, o alto custo de manutenção dos equipamentos fixos, provocou a desativação da tração elétrica, a qual ficou restrita ao trecho de cremalheira operado pela MRS e aos trens-unidade de passageiros dos sistemas de trens metropolitanos.

Por fim, as locomotivas de tração a diesel não tiveram aplicação imediata nas ferrovias, haja vista que o seu peso e tamanho excessivos não viabilizavam a operação e havia dificuldade de transmitir o torque para as rodas motrizes (SANTOS, 2011). Contudo, em 1925 foi apresentado pela General Electric e Ingersoll-Rand uma locomotiva diesel-elétrica, que é composta por um motor a diesel que gera energia que é transformada por um gerador de eletricidade, o qual alimenta os motores elétricos. Esses últimos geram a tração que comandam as engrenagens que movem as rodas das locomotivas (ROSA, 2016). O modelo de uma locomotiva diesel-elétrica é apresentado na Figura 8.



Fonte: Rosa (2016).

Atualmente, no Brasil, as ferrovias de carga utilizam majoritariamente locomotivas diesel-elétricas para tracionar suas composições. Dessa forma, daqui em diante os conceitos apresentados se referem a esse modelo de locomotiva.

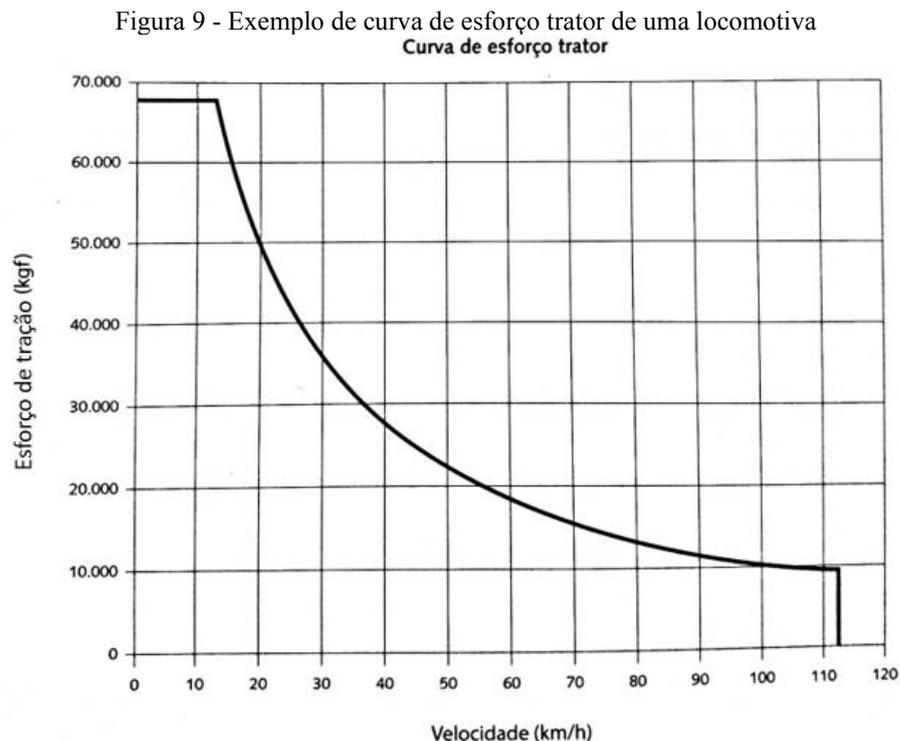
Em locomotivas, o esforço trator é definido, segundo Rosa (2016) como a força mínima necessária iniciar o movimento da locomotiva, para tanto ela deve se igualar a força de aderência e superar a força de resistência. A aderência pode ser explicada como a força passiva

exercida entre as moléculas das superfícies em contato, que agem de forma a opor-se à força que tende a produzir o desligamento dessas superfícies, enquanto a força de resistência é o total de força a ser vencido, ou seja, o peso da composição ferroviária dividido pela quantidade de rodas motrizes da locomotiva.

Ressalta-se que caso a força de tração for maior que a força de aderência e maior que a força de resistência, a roda gira sem haver o deslocamento do ponto de contato, fenômeno conhecido como patinagem (ROSA, 2016). Para solucionar esse problema pode-se recorrer ao lançamento de areia entre o trilho e as rodas, aumentar o peso da locomotiva ou aumentar o número de rodas motrizes da locomotiva.

A capacidade que a locomotiva tem de gerar força de tração é denominada de potência e é medida em *horse-power* (HP). Contudo, conforme apresentado por Rosa (2016), não se pode dar potência máxima na partida da locomotiva, pois nessa situação ocorre o efeito da patinagem. As locomotivas, de acordo com Nabais (2014), possuem oito pontos de aceleração, que são utilizados de acordo com a necessidade de condução do trem, os quais agem de forma a graduar o esforço trator.

O esforço trator de cada locomotiva pode ser representado de forma gráfica por meio de uma curva de esforço trator, conforme exemplo apresentado na Figura 9.



Fonte: Nabais (2014).

A curva do esforço trator, segundo Nabais (2014), representa o máximo esforço trator disponível para cada velocidade, referente ao ponto de aceleração oito. Dessa forma, para os pontos de aceleração menores há um esforço de trator menor para a mesma velocidade, ou seja, existem diversas curvas de esforço trator que representam cada uma um ponto de aceleração.

Observa-se que o comportamento da curva do esforço apresenta um patamar inicial, onde as características eletromecânicas da locomotiva impõem limitação do esforço trator em baixas velocidades. Depois, a curva descreve uma hipérbole até alcançar a velocidade máxima de operação da locomotiva (NABAIS, 2014).

A potência líquida disponível para a tração dos vagões é denominada de Potência útil e é obtida a partir da potência nas rodas das locomotivas subtraída a potência necessária para a movimentação da locomotiva (NABAIS, 2014).

Os principais tipos de freio das locomotivas são o freio dinâmico e o freio pneumático. Segundo Nabais (2014), o freio dinâmico é resultante da inversão da polaridade do motor de tração, ou seja, ele passa a trabalhar como gerador e, portanto, transforma a energia mecânica do movimento em energia elétrica, sendo dissipada em um banco de resistências elétricas. Esse tipo de freio é utilizado na redução e controle da velocidade da composição.

Enquanto que o freio pneumático das locomotivas, ou também chamado de freio independente da locomotiva, é aplicado por sapatas diretamente nas rodas das locomotivas. Esse freio é mais utilizado para estacionar ou em velocidade muito baixas (NABAIS, 2014).

Ressalta-se que em rampas acentuadas com percurso de mais de uma hora, o aquecimento das rodas dos vagões ocasionado pela frenagem é um fator limitador da velocidade. Ademais, o uso de tração distribuída diminui o tempo de reação do sistema de freios e possibilita uma frenagem mais rápida do que uma tração apenas dianteira (NABAIS, 2014).

Outro conceito importante relacionado às locomotivas é a velocidade mínima em regime contínuo, que é definida como a velocidade que deve ser respeitada no dimensionamento do trem em determinada rampa. Essa medida é necessária para evitar problemas de manutenção relacionados à queima prematura dos motores de tração, haja vista que os motores são dimensionados para classes de isolação que determinam a corrente máxima que pode estar sujeito. Como consequência de ultrapassar os limites de corrente máxima, ocorre o superaquecimento do motor e, portanto, a diminuição da sua vida útil (NABAIS, 2014).

2.1.4.2 Vagões

Os vagões que compõe o material rebocado têm a finalidade de transportar cargas e não possuem capacidade motriz, dessa forma necessitam serem puxados por locomotivas. Conforme Rosa (2016), os vagões são compostos pela caixa – compartimento onde a carga é acomodada – e o truque – conjunto de base rígida mais rodeiros que são responsáveis por dar suporte à caixa.

Com relação à capacidade de cargas dos vagões, esta depende da resistência dos eixos que compõe o truque e também da capacidade da linha, conforme exposto na seção 2.1.1.2. Além disso, a capacidade dos vagões está relacionada ao tipo de mercadoria e da sua densidade, ou seja, a quantidade de carga que pode ser transportada em um vagão estará limitada ao seu volume caso todo o espaço disponível no vagão seja ocupado ou para mercadoria mais densas o limite será quando atingir a capacidade de carga dos eixos (SANTOS, 2011).

Os tipos de vagões são: fechados, gaiola, gôndola, plataforma, *hopper*, tanque, isotérmico, *caboose* e especiais.

Assim como as locomotivas, os vagões também possuem freio pneumático, o qual se caracteriza por ser composto por sapatas que são aplicadas na superfície das rodas (NABAIS, 2014).

2.1.4.3 Trem-tipo

O termo trem-tipo está é frequentemente associado a um carregamento móvel aplicado em obras de arte especiais rodoviárias e ferroviárias. A definição de trem-tipo considerada nesse estudo é a de trem-tipo aplicada em estudos operacionais, ou seja, a composição mais frequente relacionada a uma certa demanda. Essa definição de trem-tipo é utilizada no planejamento como informação necessária para estimar custos, receitas, dimensionar material rodante e estudos de viabilidade econômica.

O trem-tipo, de acordo com Amicis (2018), é definido como uma composição ferroviária dimensionada para transportar um determinado tipo de produto por um determinado trecho da ferrovia. Nesse sentido, o trem-tipo é formado por um conjunto de locomotivas e vagões, sendo que considera-se que a unidade mínima de transporte é o vagão e a unidade mínima de tração é a locomotiva (ROSA, 2016).

Ainda, segundo Amicis (2018, pág. 33), para descrever um trem-tipo deve-se atender as seguintes informações:

1. Quantas locomotivas vão tracionar a composição;
2. Qual(is) locomotiva(s) vão tracionar a composição;
3. Posição de cada locomotiva;
4. Quantidade de vagões da composição;
5. Tipos de vagões da composição;
6. Posição de cada vagão na composição.

Os trens-tipos podem ser tracionados por apenas uma locomotiva localizada na frente da composição, o qual é denominado de tração simples. Por vezes são necessárias mais de uma locomotiva para fornecer o esforço para tracionar os vagões e quando essas locomotivas estão todas acopladas na frente do trem, denomina-se tração múltipla, porém quando são utilizadas mais de uma locomotiva e opta-se por alocá-las em diferentes posições ao longo do trem, essa configuração é denominada de tração distribuída (ROSA, 2016).

A tração distribuída tem como benefício a redução do esforço nos engates, se comparada com a tração múltipla, e também distribui melhor a tração ao longo do trem. Ainda há casos em que há rampas muito íngremes e, para que a composição possa transpor esse trecho, utiliza-se uma locomotiva na cauda da composição apenas nesse trecho. Essa locomotiva é denominada de *Helper* (ROSA, 2016).

2.1.5 Principais Características das Ferrovias

O transporte ferroviário possui diferentes características técnicas e operacionais de acordo com a política desse modal estabelecida em cada país. Dentre os principais sistemas ferroviários, pode-se citar o modelo adotado nos Estados Unidos e o adotado na Europa.

As características físicas da via ferroviária são diferentes nos Estados Unidos e na Europa. Conforme levantado por Pouryousef, Lautala e White (2015), nos Estados Unidos a predominância das linhas se caracteriza por ser simples, bidirecionais, possuem longas distâncias entre pátios ferroviário e os desvios são longos, enquanto na Europa as linhas são duplas, unidirecionais, possuem curtas distâncias entre pátios ferroviários e os desvios são curtos.

Na Tabela 4 é apresentado um comparativo entre os dois modelos.

Tabela 4 - Características do sistema ferroviário dos Estados Unidos e da Europa

Característica	Estados Unidos	Europa
Quantidade de vagões	100 a 150 vagões	20 a 30 vagões
Capacidade dos vagões	80 a 100 t	60 t
Carga por trem	5.000 a 10.000 t	1.000 a 2.000 t
Velocidade	80 a 100 km/h	150 km/h
Tração	diesel-eletrica	elétrica multi voltagem
Distância média de transporte	1.000 a 4.000 km	500 a 1.000 km
Trens de passageiros	n° reduzido	n° elevado
Administração	Privada	Pública

Fonte: AAR (2004) e SNCF (1991) *apud* Santos (2005).

As características das ferrovias no Brasil se assemelham mais ao modelo utilizado nos Estados Unidos. Isso pode ser explicado, segundo Santos (2011), com a elaboração, em 1952, dos estudos da Comissão Mista Brasil-Estados Unidos que sugeriu, dentre outras alterações, a utilização de trens longos, priorização do transporte de cargas e adoção de tração diesel-elétrica.

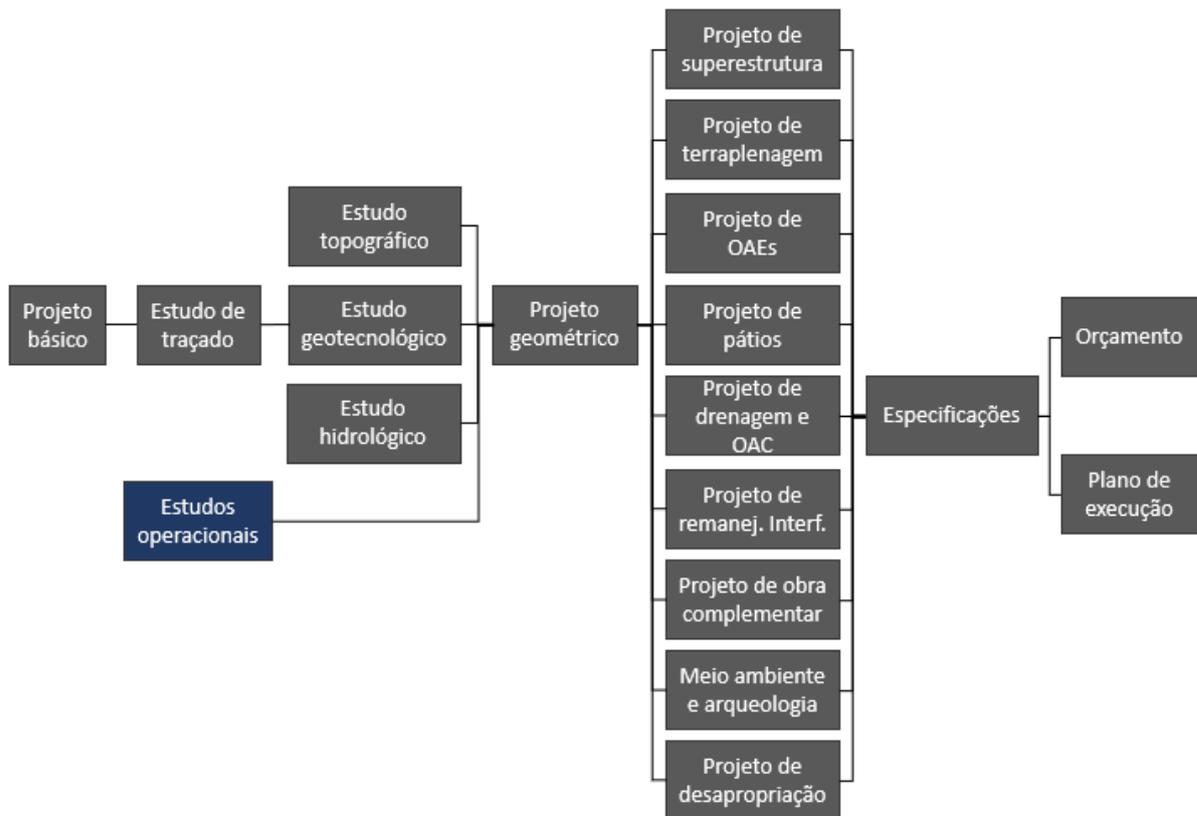
2.1.6 Estudos Operacionais

Os estudos operacionais, segundo a VALEC Engenharia, Construções e Ferrovias S.A. (VALEC, 2018), subsidiam a definição das características geométricas básicas da ferrovia e devem estar relacionados com o Estudo de Mercado, em razão de que o mesmo é responsável por estabelecer as características, especificações e dimensionamento do material rodante e equipamentos, para atendimento da demanda. Além disso, o estudo operacional auxilia na definição das características da operação, estabelecendo o plano de via com capacidade que seja suficiente para atender a programação de trens e os sistemas necessários para o controle do tráfego com segurança.

No âmbito do projeto básico, o estudo operacional permite a realização de simulações de desempenho de trens, que são utilizadas para estimar os tempos de viagens, a velocidade do trem em cada ponto da ferrovia, o consumo de combustível e a verificação da adequação do trem-tipo ao traçado, que pode ser modificado conforme a necessidade. Na Figura 10 é apresentado o fluxograma do projeto básico.

Ainda, Nabais (2014) inclui na fase do projeto executivo o auxílio do estudo operacional para o acompanhamento do detalhamento dos projetos de pátios de movimentação de carga, do plano operacional e, também, na seleção de locomotivas, vagões e equipamentos auxiliares.

Figura 10 - Fluxograma do Projeto Básico



Fonte: Nabais (2014). Adaptado pelo autor.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) dispõe de Instruções de Serviços Ferroviários (ISF) que orientam a elaboração de projetos básicos e executivos de engenharia de infraestrutura ferroviária, dentre as quais a ISF-227 (DNIT, 2015) aborda o desenvolvimento de Estudos Operacionais.

A ISF-227 (DNIT, 2015, páginas 12 e 13) define que o Estudo Operacional deve ser elaborado em duas fases: Preliminar e Definitiva. Na Fase Preliminar são desenvolvidas as seguintes etapas:

- Identificação dos principais fluxos, identificando as vazões e demandas, no sentido de caracterizar e identificar a potencialidade, as atividades econômicas e aspectos socioeconômicos da região cortada pela ferrovia;
- Determinação e configuração do plano de vias e funções dos desvios dos pátios de cruzamento, recepção, formação de trens e triagem de vagões;
- Características técnicas da via permanente (bitola, planimetria e altimetria, carga por eixo, tipo de trilho, lastro, dormente);
- Características técnicas das locomotivas (potência, peso aderente, esforço trator, raio mínimo de inscrição e características geométricas); características técnicas do material rebocado (peso total, capacidade útil, volume, características geométricas);

gabaritos estático e dinâmico e características dos trens (quantidade de locomotivas e vagões, extensão e peso total), que circularão na ferrovia;

e) Definição do trem característico que será adotado;

f) Quantidade de trens que circularão no ano de abertura e horizonte de projeto;

g) Localização e caracterização de terminais, pontos de carregamento e descarga de vagões situados na área de abrangência do projeto;

h) Localização e caracterização das instalações de apoio à operação ferroviária (estações, oficinas, postos de abastecimento, de manutenção etc.);

i) Análise e influência de planos diretores das cidades, sistemas rodoviários federal, estadual e municipal e outros projetos em implantação ou previstos para a região, que possam interagir com o projeto em desenvolvimento e de alguma forma possam interferir na operação futura do novo trecho ferroviário;

j) Coleta de informações sobre os cruzamentos rodoviários mais significativos e possíveis de interferências urbanas, inclusive estimativa preliminar de tráfego rodoviário para justificar a implantação de projetos de interseção em desnível, conjuntamente com a expectativa de tráfego de trens;

k) Apresentação do plano operacional que será adotado com capacidade de via compatível e com as características técnicas e operacionais desejáveis, sistemas de comunicação, sinalização e licenciamento a serem adotados, estudos econômicos realizados, caracterização do trecho ferroviário e sua nomenclatura no PNV.

Na Fase Definitiva, segundo o DNIT (2015, páginas 13 e 14), além de serem revistas as informações da fase preliminar, o Estudo Operacional deve atender aos seguintes requisitos:

Deverá ser efetuada a descrição das operações de tráfego, manobras, cruzamentos de trens, cargas e descargas, transbordos, informando os intervalos entre trens, comprimento de trens e vias, ou seja, deverá ser informado clara e detalhadamente o “*modus operandi*” da ferrovia, inclusive nos pátios, estações e terminais.

Deverá ser elaborado um plano de vias cotado, que atenda o horizonte de cargas compatível com a produção da região. O plano de vias deverá apresentar a configuração dos eixos das vias e AMVs nos pátios, em representação unifilar – cotadas as posições de todos os AMVs e demais cruzamentos. Além disso, deve conter localização dos marcos de entrevias, início e final de linhas, posicionamento dos sinais de tráfego e instalações, de maneira a permitir a visualização do sistema operacional da ferrovia.

O plano operacional deverá compreender análise dos fluxos de transporte; trem-tipo utilizado nos trechos; total de dias úteis por ano em operação, tempos de manobras, cargas e descargas nos terminais, interfaces com outras ferrovias.

Caracterização dos sistemas de telecomunicações, auxiliar de energia, de licenciamento e de controle operacional.

No âmbito do PPI, os estudos operacionais têm sido utilizados nos projetos de prorrogação de concessões (EFC, EFVM e RMP), de subconcessão (FIOL e RMC) e de concessão (Ferrogrão). Destaca-se que dentre as ferrovias citadas, há ferrovias em operação (EFC, EFVM e RMP), ferrovias em construção (FIOL e RMC) e ferrovias a serem construídas (Ferrogrão).

O Estudo Operacional da EFC e da EFVM foi desenvolvido com o auxílio de simulação, o qual utilizou os *softwares* TDS 5000 e o ARENA, enquanto o Estudo Operacional da RMP foi desenvolvido com o auxílio do software Translogic e TDS 5000. Os estudos

operacionais da Ferrogrão e FIOLE foram elaborados com o auxílio do *software Rail Traffic Controller* (RTC) e simulador da Sysfer, respectivamente.

2.1.7 Outros Conceitos

Além dos conceitos de engenharia ferroviária apresentados nas seções anteriores, é necessário para a execução desse trabalho, apresentar a definição de tempo de ciclo, tempo de trânsito, tempo de licenciamento, Velocidade Diretriz (VD), Velocidade Máxima Autorizada (VMA), Velocidade Média Comercial (VMC), bitola, equipagem, plano de vias e seção de bloqueio.

A rotação dos vagões, também conhecido como tempo de ciclo, é um indicador e é definido por Rosa (2016) como:

A rotação de vagões pode ser entendida como o tempo gasto entre dois carregamentos sucessivos. Nesse tempo, estão incluídos os tempos de carregamento do vagão na origem, circulação do vagão carregado até o destino, descarga no destino e transporte do vagão vazio até outro ponto de carregamento (Rosa, 2016, página 64).

A fórmula que representa o tempo de ciclo, considerando carga de retorno, segundo Rosa (2016) é definida como:

$$R = t_{po} + t_{vs} + t_{pd} + t_{vd} + t_{por} + t_{pdr}$$

Em que:

- R = Rotação de vagões, em dias
- t_{po} = tempo de operação (carregamento) no pátio de origem
- t_{vs} = tempo de viagem subindo, do pátio de origem ao pátio de destino
- t_{pd} = tempo de operação (descarregamento) no pátio de destino
- t_{vd} = tempo de viagem descendo, do pátio de destino ao pátio de origem
- t_{por} = tempo de operação (carregamento) da carga de retorno no pátio de origem
- t_{pdr} = tempo de operação (descarregamento) da carga de retorno no pátio de destino

Ressalta-se que não necessariamente o material rodante, nesse caso o vagão, retorna para mesmo terminal de origem (ROSA, 2016). Como esse indicador é utilizado para o cálculo da frota de vagões e locomotivas, deve-se entender bem o fluxo de transporte para não superestimar ou subestimar a frota.

O tempo de trânsito, às vezes utilizado na literatura como *transit time*, é definido como o período compreendido entre a expedição da mercadoria e sua entrega ao destinatário ou como o tempo onde os bens são movidos fisicamente entre diferentes locais em uma operação de transporte dentro das cadeias de suprimento (FERNANDES, 2012). No modal ferroviário, especificamente, o tempo de trânsito pode ser considerado como o tempo total da viagem da composição ferroviária até o seu destino final (CANUTO, 2007).

O tempo de licenciamento é aquele necessário para o Centro de Controle Operacional (CCO) autorizar um trem a circular pela via em um trecho específico da via permanente, que geralmente é necessário em uma seção de bloqueio (ROSA, 2016).

Na engenharia ferroviária são utilizados diferentes conceitos de velocidade para fins de projeto, regulação ou acompanhamento de produtividade. Dentre eles a Velocidade Diretriz (VD) é definida como:

Velocidade Diretriz (VD): É a velocidade máxima com que um trecho ferroviário pode ser percorrido com segurança, quando a composição ferroviária estiver submetida apenas às limitações geométricas do traçado (Km/h) (ANTT, 2015, não paginado).

A Velocidade Máxima Autorizada (VMA) é publicada pelas concessionárias ferroviárias anualmente por meio da Declaração de Rede, instrumento utilizado pela ANTT para obtenção e divulgação de dados técnicos das concessões ferroviárias, e é definida como:

Velocidade Máxima Autorizada – VMA: velocidade máxima definida no projeto, podendo ser alterada pelas condições da via permanente, material rodante e segurança operacional. (VALEC, 2016, página 13).

Assim como a VMA, a Velocidade Média Comercial (VMC) é um indicador utilizado pela ANTT e é definido como:

Velocidade Média Comercial (km/h): mede a relação entre o percurso mensal ou anual dos trens e o somatório dos tempos totais, despendidos entre a formação e o encerramento dos trens na malha. A velocidade média comercial é um indicador do lead time do serviço de transporte oferecido aos usuários (LOBO, 2019, não paginado).

Outro termo a ser definido, bastante usual na Engenharia Ferroviária, é a bitola, expressa como:

BITOLA: - É a distância entre as faces internas dos boletos dos trilhos, tomada na linha normal a essas faces, 16 mm abaixo do plano constituído pela superfície superior do boleto (DNIT, [2021], página 5).

As ferrovias de carga no Brasil em sua predominância possuem bitola métrica (1,00m) e bitola larga (1,60m). A exceção é a Estrada de Ferro do Amapá (EFA) que dispõe de bitola padrão (1,435), porém a mesma encontra-se sem operação, segundo Torrinha (2018), desde 2014.

Dentre os recursos necessários para a operação de uma ferrovia, pode-se destacar a equipagem, a qual pode ser definida como:

Equipagem formada por maquinistas responsáveis por conduzir a locomotiva obedecendo as normas pertinentes à circulação e estabelecidas no regulamento operacional da ferrovia. Nos trens de passageiros, a equipagem ainda é composta pelo chefe do trem, responsável por coordenar todo o atendimento aos passageiros nos carros de passageiros (Silva, 2015, página 47).

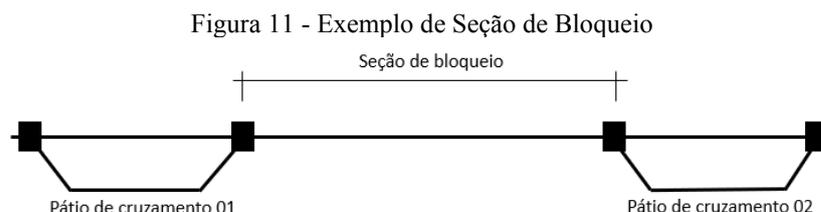
Segundo Nabais (2014), o plano de vias caracteriza-se por apresentar a disposição dos desvios de cruzamento e pátios, ou seja, é a identificação da localização por meio do estaqueamento quilométrico. O plano de vias pode apresentar também os comprimentos úteis e totais dos desvios de cruzamento, o que permite saber qual é o comprimento máximo dos trens-tipo que podem utilizar cada desvio de cruzamento.

No tocante à operação ferroviária, um conceito importante é a seção de bloqueio, a qual é explicada a seguir:

[...] uma seção de bloqueio é o espaço físico da via que somente um trem pode ocupar em certo momento de tempo.

Assim, na circulação, em casos normais, dois trens não compartilham a mesma seção de bloqueio. Vale ressaltar que mesmo trens em um mesmo sentido não podem ocupar a mesma seção de bloqueio (Rosa, 2016, página 28).

Um exemplo de seção de bloqueio pode ser visto na Figura 11.



Fonte: Rosa (2016). Adaptado pelo autor.

2.2 SIMULAÇÃO

Segundo Prado (2017), a simulação pode ser definida como:

Simulação é a técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema usando um computador digital (PRADO, 2017).

Com base no exposto, a simulação abordada no presente trabalho se refere à simulação computacional. A sua utilização tem como finalidade a análise de cenários ou também a otimização (CHWIF e MEDINA, 2010).

Outra definição importante é a de sistema, descrita por Prado (2017), como:

Sistema é uma agregação de objetos que têm alguma interação ou interdependência (PRADO, 2017).

Os sistemas podem ser contínuos ou discretos. Os sistemas discretos são aqueles que são compostos de componentes discretos ou inteiros, como um trem ou navio, enquanto os sistemas contínuos são compostos, principalmente, de um elemento de quantidades contínuas, como a água, por exemplo (PRADO, 2017).

As ferrovias são consideradas um sistema, que é composto por subsistemas, conforme a Fundación de los Ferrocarriles Españoles (FFE, 2019), por material rodante, sinalização, infraestrutura, alimentação de energia, operacional, manutenção e telecomunicação.

2.2.1 Simuladores de Sistemas Ferroviários

Conforme exposto anteriormente, o sistema ferroviário é composto de vários subsistemas que interagem entre si e possuem características específicas em cada ferrovia. Dessa forma, segundo Goodman, Sie e Ho (1998), esses simuladores são uma forma barata de prever o desempenho e caracterizar o comportamento do sistema.

No mercado há diferentes simuladores de sistemas ferroviários disponíveis, alguns exemplos são apresentados a seguir.

2.2.1.1 Rail Traffic Controller (RTC)

O RTC é um *software* desenvolvido pela *Berkeley Simulation Software* (BSS) nos Estados Unidos e é bastante utilizado na indústria ferroviária americana. Segundo a BSS ([2020]), o RTC simula o movimento dos trens através das linhas ferroviárias com um detalhamento realístico. A utilização do software tem várias finalidades, como por exemplo, para o auxílio na tomada de decisão de onde investir para melhorar o fluxo de trens.

No RTC é possível fazer o cadastramento da malha ferroviária na qual serão rodados os trens, que é representada pelo seu perfil planialtimétrico, ou seja, é necessário informar os pontos notáveis das curvas verticais e horizontais. Além disso, deve ser feito também o cadastramento de todos os pátios ferroviários, o que incluem os terminais e desvios de cruzamento que compõe a malha.

O sistema utiliza-se da Teoria de Grafos, ou seja, as informações acima descritas são representadas por linhas e nós que possuem conexões entre si. Os nós são cada um dos pontos notáveis da malha e as linhas conectam os mesmos e possuem atributos como a distância.

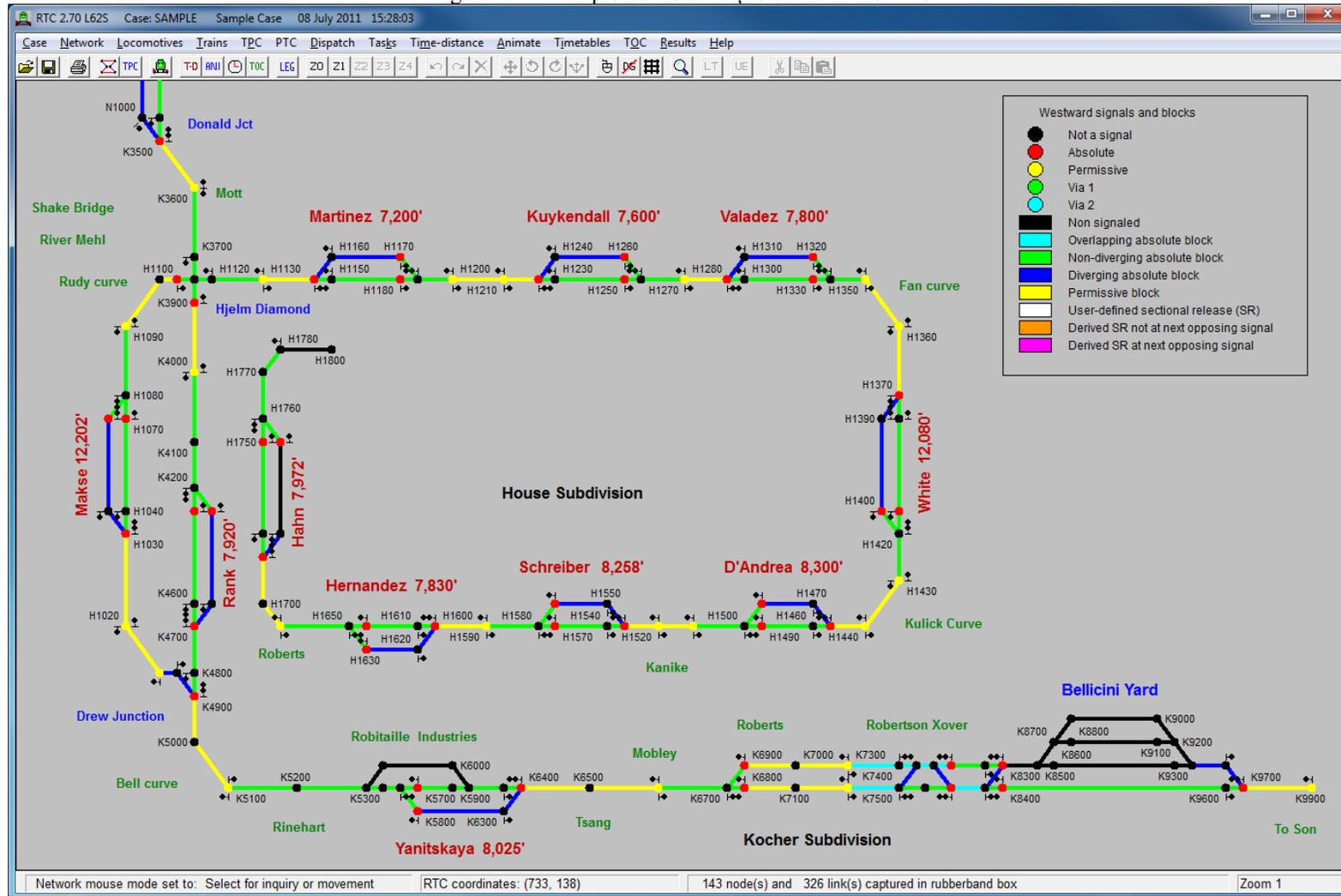
Na Figura 12 é apresentada a visualização de um exemplo de malha ferroviária cadastrada no RTC, com seus nós e linhas.

A simulação de marcha é definida como a simulação de um único trem na malha ferroviária percorrendo toda a rota, nos dois sentidos, como por exemplo, nos sentidos importação e exportação. Deve verificar se o trem-tipo proposto é capaz de vencer as resistências normais e acidentais. No caso do RTC, o próprio software indica isso.

Como um dos resultados possíveis, o RTC gera o gráfico *Train Performance Calculator* (TPC), conforme apresentado na Figura 13.

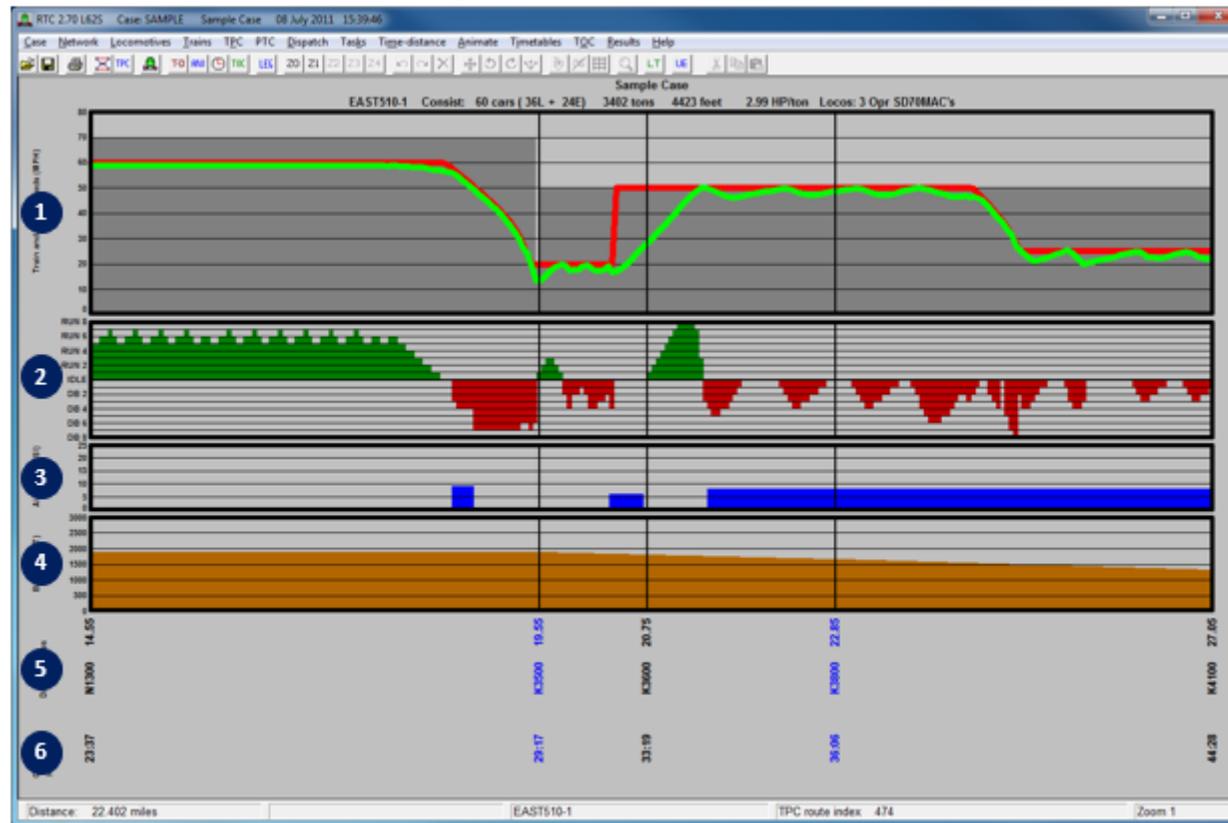
A partir do TPC é possível analisar o comportamento das composições ferroviárias quanto a sua velocidade em cada ponto da via, tempo de percurso, a utilização dos pontos do motor da locomotiva e o consumo do freio pneumático. Outra forma de obtenção dos resultados é acessar o arquivo *route*, no qual são armazenados diversos dados da simulação, como por exemplo, o consumo de combustível.

Figura 12 - Exemplo de visualização da malha no RTC



Fonte: BSS ([2020]).

Figura 13 - Exemplo de Gráfico TPC.



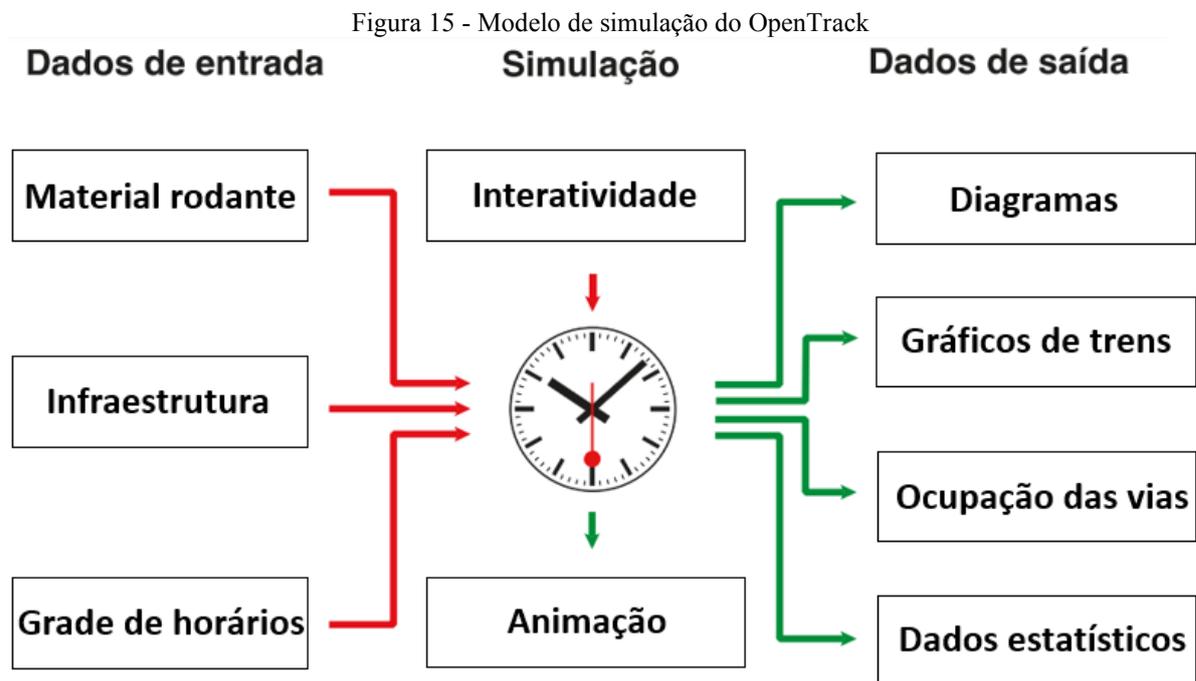
- ① Velocidade do trem e da via (Km/h) ② Aceleração ③ Freio pneumático (PSI) ④ Elevação(m)
 ⑤ Nós de exibição ⑥ Acumulado HH:MM:SS

Fonte: BSS ([2020]). Adaptado pelo autor.

2.2.1.3 OpenTrack

O *software* OpenTrack foi desenvolvido pela *OpenTrack Railway Technology Ltda*, empresa derivada do Instituto Federal de Tecnologia de Zurique (ETHZ), na Suíça. O simulador tem sido utilizado pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL) na elaboração de estudos como o Plano Nacional de Logística (PNL).

Na Figura 15 são apresentados os módulos dos dados de entrada, simulação e saída do OpenTrack.



Fonte: OpenTrack (c2021). Adaptado pelo autor.

Conforme descrito pela OpenTrack (c2021), um dos dados de entrada do simulador são as informações referentes ao material rodante, ou seja, esforço de tração da locomotiva, comprimento, fator de adesão, dentre outros.

A infraestrutura ferroviária no software é modelada, assim como no RTC, por meio da Teoria de Grafos. Os elementos gráficos contêm vários atributos como comprimento das linhas, rampa de inclinação, velocidade máxima permitida, elementos do sistema de sinalização e estações.

No âmbito da grade de horários, o OpenTrack armazena as informações de cada trem despachado, o que inclui os horários de partida, chegada e tempo mínimo de parada, por exemplo.

Quanto aos dados de saída, o simulador permite a visualização de diagramas que cruzam as informações de tempo e distância, além de velocidade e tempo. Referente aos dados estatísticos pode ser obtido, por exemplo, o comportamento da aceleração e o esforço trator.

2.2.1.4 Análise Comparativa dos Simuladores

A escolha do *software* de simulação de operação ferroviária deve ser realizada considerando a finalidade de sua utilização, as características da ferrovia a ser modelada, características do *software* e os produtos que podem ser gerados.

Na Tabela 5 é apresentado um comparativo entre os softwares de simulação de operação ferroviária selecionados.

Tabela 5 - Comparativo entre simuladores de operação de ferrovias selecionados

	RTC	RailSys	OpenTrack
País de origem	Estados Unidos	Alemanha	Suíça
Princípio da operação	Não baseada em grade de horários	Baseada em grade de horários	Baseada em grade de horários
Base de dados (Material rodante/sinalização)	Padrão dos Estados Unidos	Principalmente do sistema europeu	Principalmente do sistema europeu
Principais características	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução de conflitos e despachos automáticos por meio do meet-pass N-train logic. - Animação de trens em movimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Recurso de gestão de grade de horários (conflitos) - Otimização de grade de horários de acordo com a norma técnica UIC 406 - Ferramentas de análise em várias janelas 	<ul style="list-style-type: none"> - Resolução de conflitos automática (prioridades, roteamento e funções de atraso) - Grande quantidade de mensagens de simulação e dados de saídas
Exemplo de usuários	Empresas ferroviárias da América do Norte, consultores de ferrovias dos Estados Unidos, Agências de transporte ferroviário urbano	Operadores e consultores de ferrovia europeus, companhias ferroviárias internacionais	Operadores e consultores de ferrovia europeus, companhias ferroviárias internacionais

Fonte: Lautala e Pouryousef (2016).

Quanto aos métodos de simulação, o RailSys e o OpenTrack têm o seu princípio de operação baseado em grade de horários, ou seja, é estabelecida uma grade de horários inicial

de partida dos trens e o simulador otimiza a grade de horários o máximo possível. Esse método é comumente utilizado na Europa (POURYOUSEF, LAUTALA e WHITE, 2013).

No caso de ferrovias que operam baseadas em padrões improvisados de operação, sem grade de horários preestabelecida, são recomendados simuladores como o RTC. Após a inserção dos dados de entrada, o processo de simulação de despacho dos trens improvisa os horários de partida no pátio inicial, o qual é informado nos dados de entrada. Esse modelo de operação é utilizado da maioria das ferrovias dos Estados Unidos e do Brasil (POURYOUSEF, LAUTALA e WHITE, 2013).

Para a demonstração da aplicabilidade do método proposto neste trabalho será estudada uma ferrovia situada no Brasil e, portanto, suas características de operação são mais próximas das ferrovias dos Estados Unidos ao invés das europeias. Dessa forma, dentre os softwares apresentados, o mais adequado é o RTC e, por isso, será adotado na demonstração da aplicabilidade do método. Ressalta-se que o método não restringe a utilização de outros simuladores.

2.3 TEORIA DA DECISÃO

A Teoria da Decisão, de acordo com Gomes (2007) é descrita como o estudo dos paradigmas subjacentes à tomada de decisão e seus fundamentos analíticos. De forma mais detalhada, Gomes e Gomes (2019) descrevem a Teoria da Decisão como:

[...] conjunto de procedimentos e métodos de análise que procuram assegurar a coerência, a eficácia e a eficiência das decisões tomadas em função das informações disponíveis antevendo cenários possíveis (GOMES E GOMES, 2019, página 19).

Gomes e Gomes (2019) entendem que a Teoria da Decisão pode utilizar ferramentas matemáticas ou não e, segundo Gomes (2007), pode ser aplicada em complexos processos decisórios nas ciências humanas, sociais, da saúde, tecnologia, na vida pessoal e, também, nas atividades cívicas.

O conceito de tomada decisão pode ser descrito por Gomes (2007) como o processo que resulta em uma escolha dentre diferentes alternativas e por Freitas et al. (1997) como a definição de critérios de avaliação e a escolha de ações alternativas.

De acordo com Anthony (1965) *apud* Freitas et al. (1997), a tomada de decisões nas organizações pode ser classificada em três níveis de acordo com sua atividade administrativa:

Nível Operacional - significando o uso eficaz e eficiente das instalações existentes e de todos os recursos para executar as operações; a decisão no nível operacional é um processo pelo qual se assegura que as atividades operacionais serão bem desenvolvidas; o controle operacional utiliza procedimentos e regras preestabelecidas de decisões; uma grande parte destas decisões são programáveis e os procedimentos a serem seguidos são geralmente muito estáveis; as decisões operacionais e suas ações geralmente resultam em uma resposta imediata;

Nível Tático - englobando a aquisição genérica de recursos e as táticas para a aquisição, localização de projetos e novos produtos; as decisões no nível tático são normalmente relacionadas com o controle administrativo e são utilizadas para decidir sobre as operações de controle, formular novas regras de decisão que irão ser aplicadas por parte do pessoal de operação e designação de recursos; neste nível são necessárias informações sobre o funcionamento planejado (normas, expectativas, pressupostos), variações a partir de um funcionamento planejado, a explicação destas variações e a análise das possibilidades de decisão no curso das ações;

Nível Estratégico - englobando a definição de objetivos, políticas e critérios gerais para planejar o curso da organização; o propósito das decisões no nível estratégico é desenvolver estratégias para que a organização seja capaz de atingir seus macro objetivos; as atividades neste nível não possuem um período com ciclo uniforme; estas atividades podem ser irregulares, ainda que alguns planos estratégicos se façam dentro de planejamentos anuais ou em períodos pré- estabelecidos (FREITAS ET AL., 1997, pág. 38).

A decisão é composta, de acordo com Simon (1970) *apud* Préve, Moritz e Pereira (2010), por seis elementos básicos: tomador de decisão, objetivos, preferências, estratégia, situação e resultado.

O tomador de decisão pode ser descrito com a pessoa que faz uma escolha ou opção entre as alternativas de ação conforme os seus objetivos, que são alcançados por meio de suas ações. Os critérios que o tomador de decisão utiliza para fazer suas escolhas são denominados de preferências (PRÉVE, MORITZ e PEREIRA, 2010).

Define-se como estratégia, o curso da ação que tomador de decisão escolhe para atingir seus objetivos, está sujeita à disponibilidade de recursos e a sua aplicação, como consequência, obtém-se o resultado. Ressalta-se que há diversos aspectos do ambiente que envolvem o tomador de decisões, sendo que muitos deles encontram-se fora do seu controle, conhecimento, compreensão e afetam a sua escolha (PRÉVE, MORITZ e PEREIRA, 2010).

Segundo Gomes e Gomes (2019), os termos decisor, facilitador e analista são utilizados como sinônimos, em razão de frequentemente o mesmo indivíduo, grupo de indivíduos ou encarregado executar as três funções, porém cabe aqui a sua distinção. O decisor é aquele a quem o processo decisório destina-se e, também quem tem o poder e a responsabilidade de ratificar uma decisão e assumir suas consequências.

O papel do facilitador constitui-se em esclarecer e modelar o processo de avaliação ou negociação que conduz à tomada de decisão e o mesmo deve manter uma postura neutra para não intervir no julgamento dos decisores. Enquanto que o analista é aquele que faz a análise e auxilia o facilitador e o decisor na estruturação do problema e identificação dos fatores que influenciam na evolução, solução e configuração do mesmo (GOMES e GOMES, 2019).

Na Teoria da Decisão há dois paradigmas principais, a Teoria da Utilidade Esperada e a Teoria dos Prospecto, que são detalhados a seguir.

A Teoria da Utilidade Esperada estabelece uma norma que objetiva maximizar a medida da utilidade, a qual é definida como a satisfação proveniente do consumo de um bem ou serviço, e é expressa por meio de uma função matemática, a qual denomina-se como função de utilidade (GOMES, 2007). Essa teoria é reconhecida como um modelo razoável para ser utilizado com a função de guiar decisões sob condições de risco. A Teoria da Utilidade Esperada estrutura o problema decisório em bases objetivas, em razão de estruturar as preferências e oferecer uma representação numérica para essa estrutura (BECKER, 1988).

Utiliza-se na Teoria de Utilidade Esperada uma abordagem axiomática, ou seja, parte-se de um conjunto de axiomas ou condições que caracterizam uma estrutura de preferências, que podem ser entendidos como critérios de coerência e consistência para as preferências de um tomador de decisões ou, ainda, como hipóteses simplificadoras de uma realidade (BECKER, 1988).

Com base no exposto, desenvolve-se um modelo numérico que preserve as características da estrutura de preferências consolidada pelo conjunto de axiomas. Como etapa subsequente, devem ser feitas investigações que indicarão como esse modelo pode ser usado para auxiliar os tomadores de decisão e resolver problemas decisórios (BECKER, 1988).

Segundo Gomes e Gomes (2019), o decisor deve obedecer ao conjunto composto de seis axiomas na definição da função utilidade, que são descritos a seguir:

- **Axioma da ordenabilidade:** considerando as consequências A e B, o decisor deve preferir um ao outro ou então classificar os dois como igualmente preferíveis. Dessa forma, pode-se dizer que $A \succ B$ (A é preferível a B), ou $A \sim B$ (A é indiferente a B) ou $A \prec B$ (B é preferível a A). O decisor não pode evitar a decisão.

- **Axioma da transitividade:** considerando as consequências A, B e C, se $A \succ B$ (A é preferível a B) e $B \succ C$ (B é preferível a C), então $A \succ C$ (A é preferível a C). Além disso, se $A \sim B$ (A é indiferente a B) e $B \sim C$ (B é indiferente a C), então $A \sim C$ (A é indiferente a C).
- **Axioma da continuidade:** considerando as consequências A, B e C, se $A \succ B \succ C$ (A é preferível a B e B é preferível a C), então existe uma probabilidade p , $0 < p < 1$, de que B seja indiferente a uma loteria com probabilidade p de ocorrer A e $1-p$ de ocorrer C.
- **Axioma da substitutabilidade:** considerando as consequências A e B, se $A \sim B$ (A é indiferente a B), então é possível substituir um evento incerto com consequência A por outro evento equivalente mais complexo B.
- **Axioma da redutibilidade:** considerando as consequências A e B, é possível reduzir um evento complexo com consequência A por outro evento equivalente menos complexo B, sem afetar as preferências do decisor.
- **Axioma da monotonicidade:** considerando as consequências A e B, se $A \succ B$ (A é preferível a B) e há duas loterias como os mesmos resultados, A e B, então o decisor deve preferir a loteria com a probabilidade mais alta para A.

Por sua vez, a Teoria dos Prospectos, de acordo com Gomes (2007), é baseada em observações empíricas e considera que o tomador de decisão analisa os riscos, realizando uma ponderação relativa de ganhos e perdas, em relação a um ponto de referência.

De forma mais detalhada, na Teoria dos Prospectos, os valores de preferência são atribuídos aos ganhos e às perdas ao invés de serem associados aos resultados finais. Enquanto que as probabilidades são substituídas por pesos ou ponderações (CARDOSO, RICCIO e LOPES, 2008).

Conforme Pereira, Silva e Tavares Júnior (2017), na Teoria dos Prospectos, a primeira etapa consiste na apresentação do problema com base nos princípios heurísticos e regras que são utilizadas para simplificar a tomada de decisão. Depois, é feita a avaliação dos prospectos na sua forma apresentada, sendo que a forma de apresentação pode implicar em escolhas diferentes.

Com relação à forma de apresentação de um prospecto, Kahneman e Tversky (1979) conceituaram os efeitos de certeza, reflexo e isolamento, os quais são detalhados a seguir:

- **Efeito certeza:** ocorre quando no prospecto há ganhos, o decisor opta por escolhas que apresentam resultados certos ao invés dos incertos, por mais que tenham valores esperados menores, ou seja, é uma aversão ao risco.
- **Efeito reflexo:** ocorre quando no prospecto há perdas, nesse caso o decisor opta por prospectos arriscados, ou seja, busca-se uma preferência por perda que é meramente provável, ao invés de uma perda menor, mas que é certa.
- **Efeito isolamento:** caracteriza-se pelo decisor optar por simplificar suas escolhas, focando em distinguir as opções e ignorando características em comum das alternativas.

De acordo com Pereira, Silva e Tavares Júnior (2017), o objetivo de apresentação do prospecto é organizar e reformular as escolhas de forma a facilitar o processo de avaliação e escolha, na qual são realizadas operações que transformam os resultados e as probabilidades associadas nos prospectos.

No presente trabalho serão enfocados os métodos que utilizam a Teoria da Utilidade Esperada, em especial os métodos multicritério ou multiatributo.

2.3.1 Métodos de Apoio Multicritério à Decisão (AMD)

Segundo Gomes e Gomes (2019), os Métodos de AMD são aqueles que atuam como uma forma de auxílio à decisão, visando uma representação multidimensional dos problemas e que incorporam características bem definidas na sua metodologia, como por exemplo, a identificação de informações ou regiões críticas, melhor compreensão das dimensões do problema e possibilidade de haver diferentes formulações válidas para o problema.

Há duas vertentes principais associadas aos métodos de AMD, a Escola Americana e a Escola Francesa, também chamada de Escola Europeia. Ressalta-se que existem métodos de AMD que não se enquadram exclusivamente em uma dessas duas escolas (RANGEL e GOMES, 2010).

A Escola Francesa relaciona métodos que utilizam noções de relação de superação, dentre eles podem-se destacar os métodos ELECTRE e PROMÉTHÉE. Referente à Escola Americana, seus métodos multicritério tem como fundamentação teórica a noção de agregar as informações relacionadas ao problema e resolver por meio de uma grande síntese. Dentre os métodos da Escola Americana podem se destacar o Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)

e os métodos de análise hierárquica como o Método de Análise Hierárquica (AHP) (RANGEL e GOMES, 2010).

A seguir são detalhados alguns métodos de AMD.

2.3.1.1 Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT)

A MAUT está relacionada à Escola Americana e, segundo Gomes e Gomes (2019), pode ser definida como uma teoria que incorpora à teoria da utilidade aspectos do tratamento de problemas com múltiplos objetivos, os quais são denominados de atributos. Além disso, esse método é o único, dentre os métodos de AMD que recebe o nome de teoria, assim classificado em razão da determinação da função estar associada à confirmação da relação que existe entre a estrutura axiomática da teoria e a estrutura de preferências do decisor.

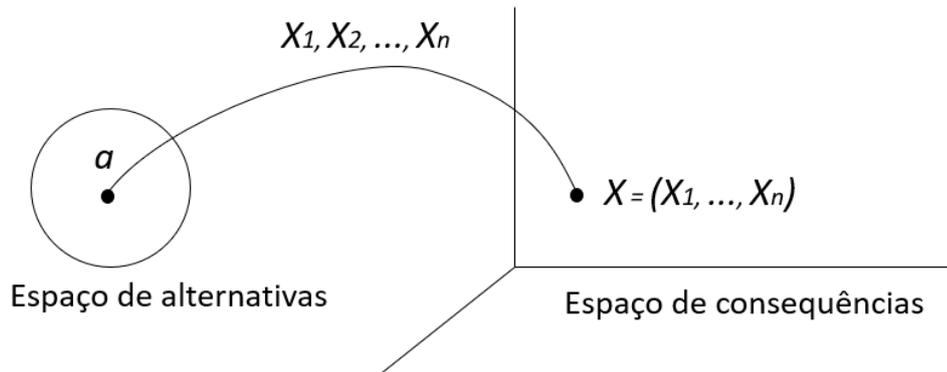
De acordo com Gomes e Gomes (2019), a aplicação dessa teoria inclui um processo de entrevista entre o analista de decisão e o decisor de forma a auxiliar no levantamento das preferências do decisor em relação aos atributos do problema. Ainda, a função utilidade deve representar as atitudes do decisor em relação ao risco e a situações de incerteza, portanto, a entrevista deve possibilitar que o decisor expresse suas preferências da forma mais real possível.

Na utilização da MAUT, não há a existência de incomparabilidade de alternativa, haja vista que as preferências modeladas na função de utilidade multiatributo são sempre completas, ou seja, em cada par de alternativas, uma delas é estritamente preferível à outra ou são indiferentes (GOMES, 2007).

De acordo com Miranda e Almeida (2004), a MAUT agrega vários pontos de vista, que são relacionados aos critérios, e considera uma única função síntese, ou seja, resume-se em um critério único de síntese. Nesse sentido, o objetivo é definir a forma da função utilidade multiatributo que representa as preferências do decisor conforme os pontos de vista considerados.

Keeney e Raiffa (1975) entendem que o problema do decisor consiste em escolher uma alternativa a , que está contida no espaço de alternativas existente que resulte na maior satisfação com o resultado $x_i(a)$, ..., $x_n(a)$, no qual x_i representa os atributos de avaliação, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16 - Relação entre alternativas e consequências



Fonte: Keeney e Raiffa (1975). Adaptado pelo autor.

Portanto, deve-se obter uma função de utilidade u , a qual é definida em um espaço de consequências e que atenda as propriedades da MAUT (MARSARO, 2013). Gomes (2007) afirma que um pressuposto básico da aplicação da MAUT consiste na existência de uma função de utilidade específica de cada um dos atributos das alternativas. A função utilidade de u é usada na MAUT para comparar indiretamente vários níveis dos diferentes atributos a partir dos efeitos que as magnitudes x_i exercem em u (GOMES e GOMES, 2019).

A seguir é apresentada a função utilidade u que agrega as funções utilidade de cada atributo.

$$u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)]$$

Em que:

- u_i = função utilidade relacionada ao atributo x_i ;
- x_i = *atributo*.

A função utilidade aditiva ocorre quando a escolha de alternativas envolve mais de um atributo, portanto, a função que resulta o valor global da alternativa considerando multiatributos é apresentada a seguir.

$$U(a) = \sum_{i=1}^n k_i u_i(a)$$

Em que:

- $U(a)$ = valor ou pontuação global da alternativa a ;
- k_i = peso do critério i .
- $u_i(a)$ = desempenho da alternativa a frente ao critério i .

Segundo Keeney e Raiffa (1993) *apud* Brasil (2016), não é possível estabelecer um procedimento passo-a-passo que resulte em um conjunto de objetivos e atributos a serem utilizados na MAUT, em razão desse processo fazer parte de uma natureza criativa, que varia de caso a caso. Com base no exposto, os autores diferenciam os objetivos, atributos e metas, conforme a descrição a seguir:

- Os objetivos geralmente indicam a “direção” na qual se deve exercer maior esforço;
- Os atributos são a unidade de medida na qual são medidos os objetivos a atingir;
- As metas identificam claramente o nível a atingir (Keeney e Raiffa, 1993 *apud* Brasil, 2016 , pág. 48).

Uma das etapas da MAUT consiste na análise de sensibilidade, que segundo Gomes, Araya e Carignano (2011) *apud* Pressi (2017), é utilizada para avaliar a influência da alteração dos pesos relativos aos critérios sobre os valores globais determinados para cada alternativa. Dessa forma, a análise de sensibilidade pode restringir a quantidade de critérios, sendo selecionados aqueles que possuem um peso maior para o decisor.

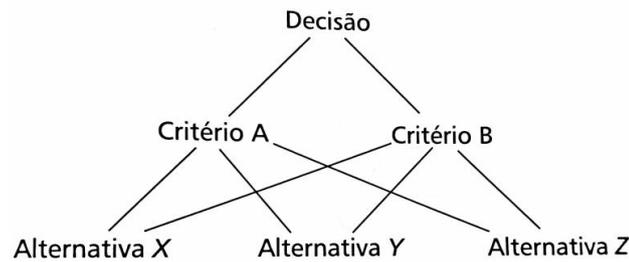
De forma resumida, a MAUT possibilita obter a melhor solução para um problema decisório complexo, em que são identificados os conjuntos das melhores soluções para o esse problema, as quais são ordenadas da melhor para a pior delas. Portanto, a sua utilização fornece uma prescrição ao tomador de decisão (GOMES e GOMES, 2019).

2.3.1.2 Método de Análise Hierárquica (AHP)

Segundo Casarotto Filho e Kopittke (2020), o método AHP foi criado por Saaty e é baseado em três princípios, a saber: decomposição, julgamentos comparativos e síntese das prioridades. Uma das principais características desse método é que os critérios podem ser quantitativos ou qualitativos e, além disso, não há necessidade de haver uma escala numérica em razão de que as comparações são feitas de forma relativa entre as alternativas.

A etapa de decomposição é feita com o auxílio de uma árvore, conforme o exemplo apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de árvore de decomposição utilizada no método AHP



Fonte: Casarotto Filho e Kopittke (2020).

O método utiliza, segundo Gomes e Gomes (2019), a escala da razão. Como exemplo, para os critérios c_1 , c_2 e c_3 , considerando $c_1 > c_2 > c_3$, analisa-se em pares o quanto o critério c_1 é superior ao c_2 , o quanto o c_1 é superior ao c_3 e o quanto o c_2 é superior ao c_3 . Portanto, observa-se que o número de comparações é definido pela fórmula apresentada a seguir.

$$N = [n \times (n - 1)] \times 2]$$

Em que:

- N = número de comparações;
- n = número de critérios.

Ressalta-se que, de acordo com Gomes e Gomes (2019), o AHP só pode ser utilizado quando os critérios têm sua importância atribuída por meio de uma escala de quociente ou razão.

2.3.1.3 Método de Organização de Classificação de Preferência para Avaliações de Enriquecimento (PROMETHEE)

O método Promethee consiste, segundo Gomes (2007), na definição de graus de preferência representados por um número real, o qual deve estar entre 0 (indiferença) e 1 (preferência forte).

De acordo com Casarotto Filho e Kopittke (2020), o Promethee é adequado a situações em que os critérios possam ser representados em forma de valores. Dessa forma, a relação de preferência é representada da seguinte forma:

$$P(a, b) = \begin{cases} 0 & \leftrightarrow f(a) \leq f(b) \\ p[f(a), f(b)] & \leftrightarrow f(a) > f(b) \end{cases}$$

Em que:

- $P(a, b)$ = é a preferência de **a** sobre **b**, variando entre 0 e 1;
- $f(a)$ = desempenho da alternativa **a**;
- $f(b)$ = desempenho da alternativa **b**.

A hierarquia $H(d)$ é definida como:

$$H(d) = \begin{cases} P(a, b), & d \geq 0 \\ P(b, a), & d \leq 0 \end{cases}$$

Em que:

- $d = f(a) - f(b)$;
- $P(a, b)$ = é a preferência de **a** sobre **b**, variando entre 0 e 1;
- $P(b, a)$ = é a preferência de **b** sobre **a**, variando entre 0 e 1.

De acordo com Silva, Scharamm e Carvalho (2013) há seis métodos do Promethee que são encontrados na literatura, além do Promethee Gaia que se caracteriza por ser uma extensão dos resultados dos outros métodos.

2.3.1.4 Análise Comparativa dos Métodos

Dentre os fatores relacionados com a escolha do método multicritério, Gomes e Gomes (2019) destacam: as características do problema analisado, o contexto considerado, a estrutura de preferências do decisor e as características da problemática. Almeida e Costa (2003) *apud* Gomes e Gomes (2019) ressaltam que a preferência do analista por um método em particular acontece frequentemente e pode caracterizar uma distorção.

Guglielmetti, Marins e Salomon (2003) afirmam que o ideal seria que o método apresentasse resultados que atendessem plenamente às necessidades do tomador de decisão, sem necessariamente atribuir um valor numérico às alternativas. Contudo, cada método possui vantagens e desvantagens específicas, frequentemente métodos distintos podem apresentar soluções diferentes, às vezes o método não é aplicado corretamente e, ainda, pode ser que o método escolhido não seja adequado para a decisão a ser tomada.

Na Tabela 6 é apresentado um comparativo entre os métodos multicritério de apoio à decisão selecionados.

Tabela 6 - Comparativo entre métodos multicritério de apoio à decisão selecionados

	MAUT	AHP	PROMETHEE
Escola	Americana	Americana	Europeia
Definição	Teoria que incorpora à teoria da utilidade aspectos do tratamento de problemas com múltiplos objetivos	Método que consiste em um sistema de decisão hierarquicamente complexo em diversos níveis, definidos por afinidade	Método que estabelece uma estrutura de preferência entre as alternativas discretas, tendo uma função de preferência entre as alternativas para cada critério
Comparação entre alternativas	Todas as alternativas simultaneamente	Todas as alternativas simultaneamente	Comparação em pares
Expressão comparativa	Função de utilidade	Comparação quantitativa dois a dois entre atributos	Função de preferência entre as alternativas para cada critério
Análise de sensibilidade	Facilmente obtida	Facilmente obtida	Difícil obtenção

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da aplicação da MAUT, teoria da escola americana, é fornecida uma ordem de preferência completa de todas as alternativas simultaneamente. O impacto de mudanças nos valores pode ser estudado por meio de análise de sensibilidade (WANG, LING e LO, 2010). As funções utilidades dos diferentes atributos são agrupadas a partir da função utilidade aditiva.

Também relacionado à escola americana, o método AHP fornece uma ordem de preferência completa de todas as alternativas simultaneamente. Porém, a análise de importância dos atributos é realizada a partir de uma comparação quantitativa em pares.

Enquanto que o método PROMETHEE, que faz parte da escola europeia, define a preferência das alternativas obtidas por meio da comparação em pares. O impacto da alteração do valor dos critérios não é obtido facilmente (WANG, LING e LO, 2010).

Para o presente estudo foi adotado a MAUT, por conta de ser possível a avaliação das alternativas simultaneamente, não precisando de comparações par a par. Além disso, a facilidade na obtenção de uma análise de sensibilidade foi considerada como relevante para o estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

De acordo com Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015), a revisão sistemática da literatura pode ser definida como:

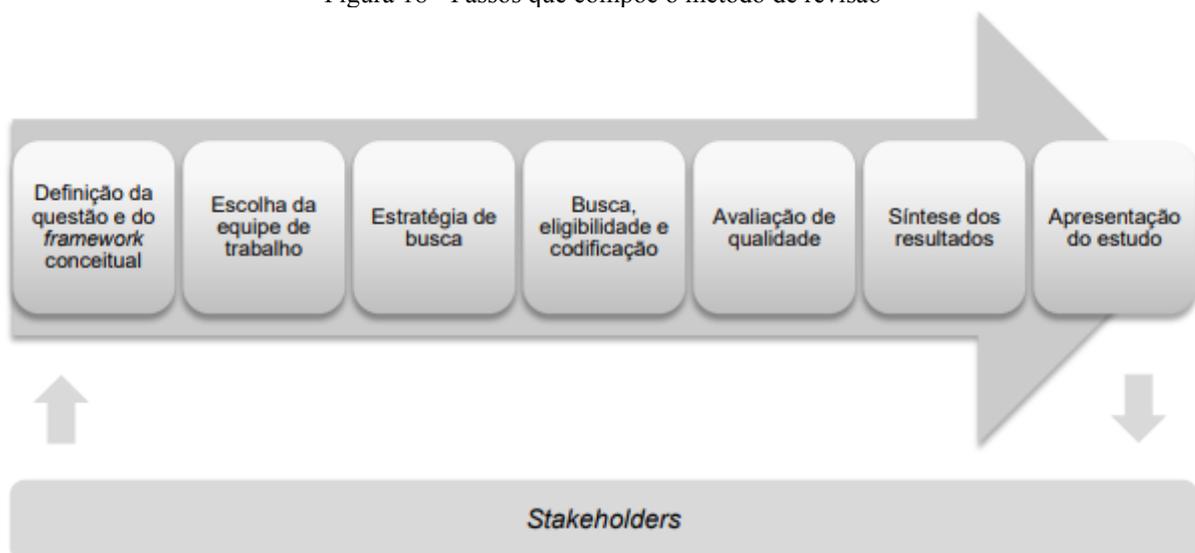
[...] estudos secundários utilizados para mapear, encontrar, avaliar criticamente, consolidar e agregar os resultados de estudos primários relevantes acerca de uma questão ou tópico de pesquisa específico, bem como identificar lacunas a serem preenchidas, resultando em um relatório coerente ou em uma síntese (DRESCH, LACERDA E ANTUNES JÚNIOR, 2015, página 142).

A revisão sistemática, segundo o Grupo Ânima Educação (2014), difere da revisão narrativa em vários aspectos como o tipo de questão, fonte, seleção e avaliação dos dados, síntese de conhecimento produzido e os efeitos que produzem na prática clínica. Além disso, pelo fato da revisão sistemática utilizar rigor metodológico, além de obter dados de literatura sobre um tema definido, são considerados trabalhos originais (ROTHER, 2007).

Há diversos métodos propostos para o desenvolvimento de uma revisão sistemática, como os apresentados por Khan et al. (2003), Cooper, Hedges e Valentine (2009), Smith et al. (2011) e Gough, Oliver e Thomas (2012).

Para o presente estudo utilizou-se o método de revisão sistemática desenvolvido por Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015), o qual está esquematizado na Figura 18.

Figura 18 - Passos que compõe o método de revisão



Fonte: Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015).

Com base no método escolhido, as etapas da revisão sistemática da literatura do presente trabalho são apresentadas nas seções a seguir.

3.1 DEFINIÇÃO DA QUESTÃO E DO FRAMEWORK CONCEITUAL

Inicialmente, para conduzir a revisão sistemática é necessário a definição do tema central a ser investigado, que para esse estudo consiste na consulta de métodos, metodologias ou procedimentos que estão relacionados à definição de trens-tipo ferroviários. Ressalta-se que durante a pesquisa verificou-se que o tema costuma ser abordado academicamente como formação de trens ao invés de definição de trens-tipo ferroviários.

Tendo sido definida a questão de pesquisa, na Figura 19 é apresentado o framework conceitual aplicado na busca dos estudos. Ressalta-se que são utilizados os passos apresentados na metodologia proposta por Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015) com a alteração da nomenclatura de algumas etapas para melhor entendimento e também foi realizada a inclusão da etapa de *Considerações finais da revisão bibliográfica sistemática*.

Figura 19 - Framework conceitual da revisão sistemática do presente estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A seguir é apresentada a etapa da escolha da equipe de trabalho.

3.2 ESCOLHA DA EQUIPE DE TRABALHO

A equipe de trabalho é composta pelo autor do presente trabalho, sob supervisão do orientador, e o produto será analisado pela banca do exame de qualificação deste trabalho acadêmico que poderá trazer contribuições, dentre as quais Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015) cita a definição de fontes e critérios de busca e de elegibilidade, processo de codificação e também na síntese dos resultados.

3.3 ESTRATÉGIA DE BUSCA DOS ESTUDOS

A estratégia de busca dos estudos que compõe a revisão sistemática desse estudo consiste na pesquisa em bases de dados eletrônicas a partir de termos de busca, conforme apresentado nas seções a seguir.

3.3.1 Termos de busca

Conforme abordado no item 3.1, academicamente, o objeto desse estudo tem sido mais abordado como formação de trens ao invés de definição de trens-tipo ferroviários. Com base no exposto, os termos foram buscados na língua portuguesa e inglesa, conforme apresentado a seguir:

- Formação “e” Trens
- Train “and” Formation

Foram realizados testes de busca filtrando os estudos que os referidos termos estivessem contidos no assunto ou no resumo, porém a quantidade de estudos obtida foi superior a 60 mil. Portanto, optou-se por realizar a pesquisa filtrando pelos títulos que contém esses termos nas plataformas de busca, visando reduzir para um número de resultados factível para serem analisados.

3.3.2 Fontes de busca

As fontes de buscas utilizadas pelo autor na revisão sistemática são as seguintes bases de dados:

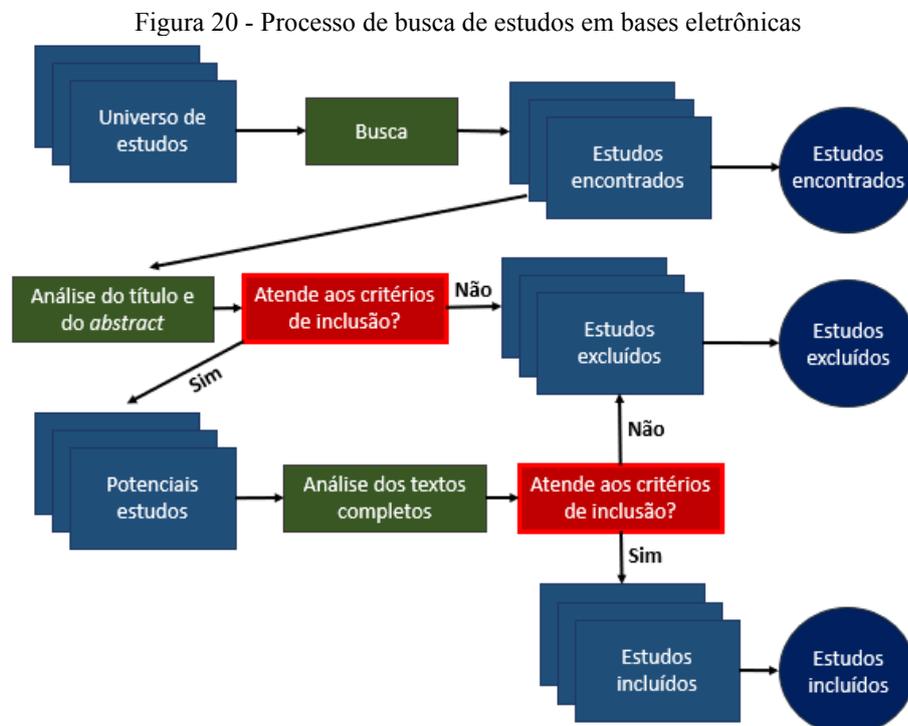
- Anais da ANPET
- Revista Transportes
- *Web of Science*
- Periódicos CAPES
- *TRID Online*

3.3.3 Critérios de inclusão e exclusão de estudos

Como critérios de inclusão dos estudos, são adotados aqueles que se encaixam no escopo da revisão, apresentado na seção 3.1. Além disso, foram selecionados apenas os estudos em que foi possível obter o seu texto integral. Citações de estudos em que não foi possível obter o texto integral e publicações anteriores ao ano de 1999 foram excluídas.

3.4 BUSCA DE ESTUDOS EM BASES ELETRÔNICAS

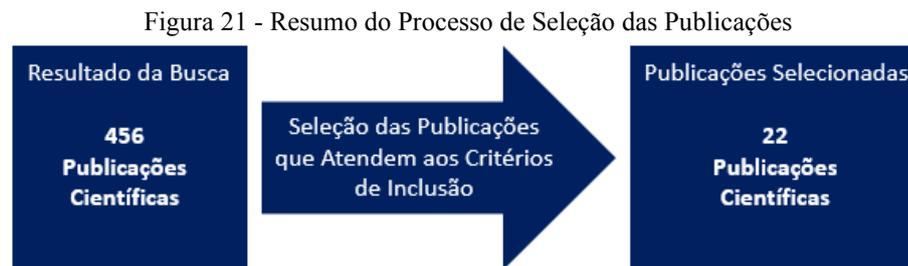
A busca dos estudos primários foi operacionalizada conforme a Figura 20.



Fonte: Dresch, Lacerda e Antunes Junior (2015). Adaptado pelo autor.

3.5 AVALIAÇÃO DOS ESTUDOS ENCONTRADOS

A pesquisa inicial nas bases de eletrônicas resultou em 456 publicações científicas. O conteúdo dos estudos foi avaliado considerando a aderência ao tema central investigado e aos critérios de inclusão. Após isso, a quantidade de estudos selecionados resultou em 22 publicações científica, conforme apresentado na Figura 21.



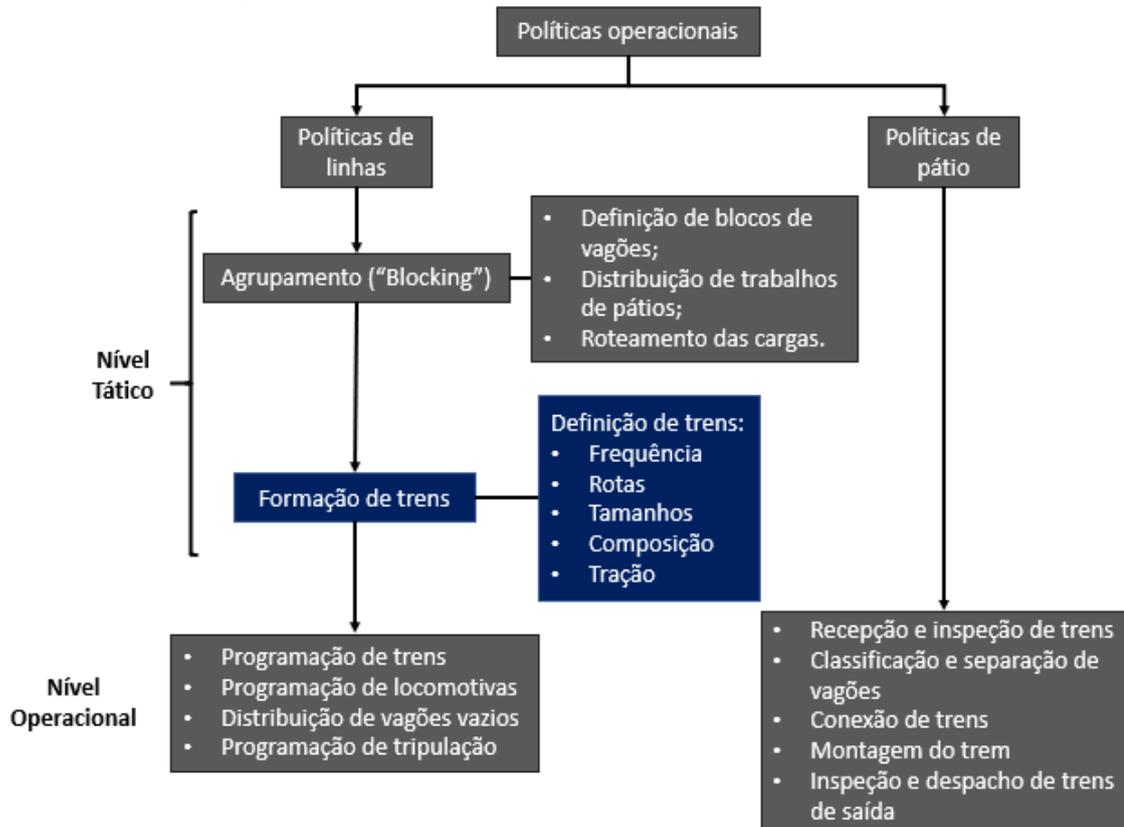
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.6 APRESENTAÇÃO DOS ESTUDOS SELECIONADOS

A formação de trens é considerado um planejamento operacional do nível tático e consiste na tomada de decisão de diferentes definições, como a frequência, rotas, tamanhos, composição e tração, conforme apresentado na Figura 22.

Os estudos selecionados utilizam diferentes abordagens metodológicas para a problemática, como a distribuição de vagões vazios (Louzada et al, 2018), definição de itinerário (Murgel e Gualda, 1999; Shafia, Sadjadi e Jamili, 2009; Wang Pen e Zhang, 2009; Lan et al, 2019; Lin et al, 2021; Yaghini, Momeni e Sarmadi, 2012b; Yaghini, Momeni e Sarmadi, 2012a; Yaghini, Momeni e Sarmadi, 2015), definição de grade de horários (Lazarev e Musatova, 2013; Shafia, Sadjadi e Jamili, 2009), definição de plano de operação (Lin et al, 2019; Lin et al 2021), distribuição de locomotivas (Nascimento e Rosa, 2019), operação de pátios de triagem com rampa (Bohlin et al, 2016), operação de pátios de triagem planos (Kozachenko et al, 2020), formação de trens em terminais (Lin e Zhao, 2019), formação de trens unitários (Chen, Dollevoet e Zhao, 2018), formação de trens com dois blocos (Xiao e Lin, 2016; Xiao, Lin e Wang, 2018), Formação de trens com múltiplos grupos de vagões (Zhao e Lin, 2019), formação de trens que transportam produtos perigosos (Lavrukhin et al, 2018) e formação de trens de passageiros (Deng et al, 2013; Xia, Deng e Wen, 2018).

Figura 22 - A formação de trens na estrutura clássica das decisões



Fonte: Murgel e Gualda (1999). Adaptado pelo autor.

Louzada et al (2018) propõe em seu estudo, por meio da utilização de programação inteira, a utilização da folga de tração dos trens formados de vagões carregados para transportar vagões vazios. O modelo matemático utilizado se baseia numa rede espaço-tempo para distribuição de vagões vazios, onde cada nó é representado por um par ordenado, composto por pátio e tempo.

As variáveis de decisão definidas por Louzada et al (2018) são o número de vagões vazios que serão acoplados em um trem e o número de vagões vazios estacionados no nó. A função objetivo visa minimizar o custo total de distribuição dos vagões vazios. O modelo foi aplicado em um estudo de caso na Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) e reduziu em 46,2% os seus custos.

Murgel e Gualda (1999) desenvolveram um modelo analítico que define o itinerário dos trens, sua frequência, tamanho e perfis de carga e tração. Algumas especificidades como o material rodante heterogêneo, a escassez de recursos, a possibilidade de existirem diferentes bitolas na malha e o fluxo de vagões vazios foram consideradas nesse modelo.

O modelo apresentado por Murgel e Gualda (1999), por incorporar as questões supracitadas e, portanto, aumentar a sua complexidade, induziu a adoção de uma heurística. A formação de trens considerada nesse estudo é definida inicialmente com uma solução de trens diretos e depois é aplicada uma combinação de trens para minimizar a movimentação de vagões vazios.

Outra abordagem relacionada à formação de trens é a distribuição de locomotivas, a qual foi abordada por Nascimento e Rosa (2019), que desenvolveram um modelo matemático que objetiva a diminuição do custo operacional. O estudo considera o desbalanceamento entre a oferta e a demanda de locomotivas para atender a formação de trens em um pátio ferroviário.

O modelo desenvolvido por Nascimento e Rosa (2019) foi aplicado em dados reais fornecidos pela EFVM e verificou-se ganhos com a utilização desse modelo em termos de redução de demanda não atendida e de custos. Também constatou-se que, às vezes, é necessário deslocar locomotivas sem vagões acoplados para atender à demanda, mesmo que isso resulte em custos adicionais.

Com relação à abordagem voltada mais especificamente à operação da formação de trens em pátios ferroviários, Bohlin et al (2016) desenvolveu dois modelos de otimização, na qual foram formulados com programação inteira com a finalidade de minimizar a quantidade de vagões que são movimentados do pátio de classificação para o pátio de chegada, com o objetivo de serem reclassificados, operação identificada com o número 3 na Figura 23.

Figura 23 - Exemplo de formação de trens em pátios de triagem com rampa

(a) Os vagões são empurrados em uma sequência arbitrária. As linhas de formação de trens foram destinadas às composições A, B e C, enquanto que os vagões das composições D e E devem ser agrupados juntos na linha de formação mista.

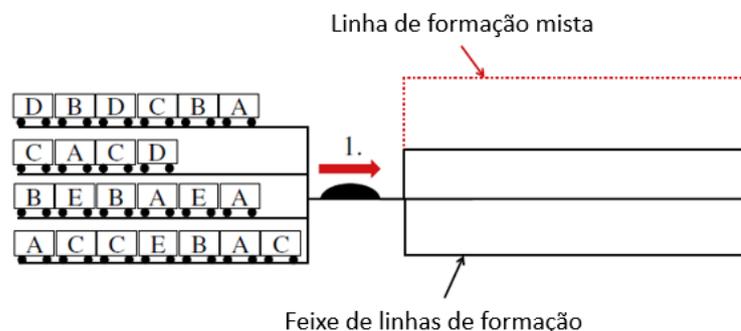
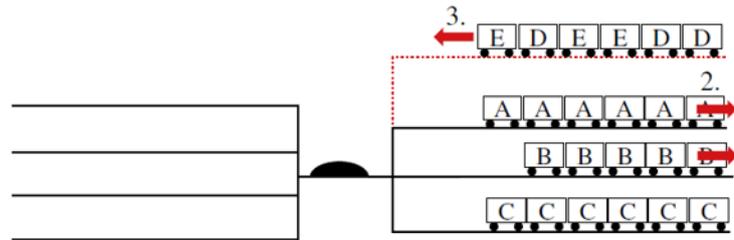
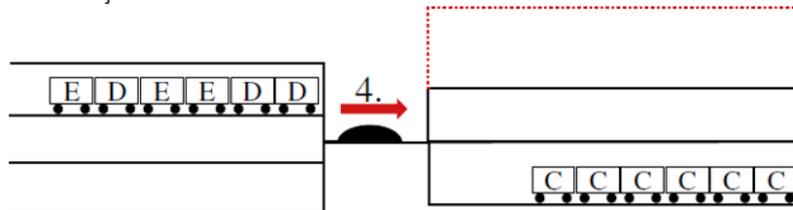


Figura 24 - Exemplo de formação de trens em pátios de triagem com rampa (continuação)

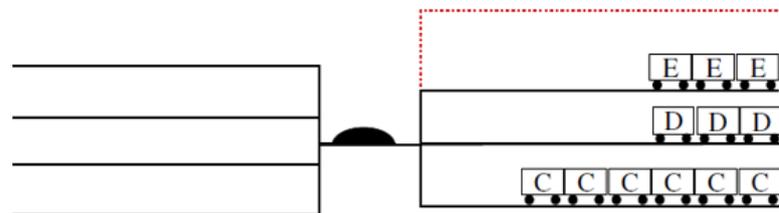
(b) A e B são despachados, liberando as linhas de formação para as composições D e E. Os vagões da linha de formação mista são empurrados de volta para o pátio de recepção.



(c) Os vagões da composição mista são empurrados pela segunda vez para classificação.



(d) Formação final das composições C, D e E.



Fonte: Bohlin et al (2016). Adaptado pelo autor.

As técnicas de solução empregadas nos modelos desenvolvidos por Bohlin et al (2016) foram Geração de Colunas para Programação Inteira e *Arc-Indexed Integer Programming*. Os modelos foram aplicados em um estudo de caso em um pátio de triagem com rampa na Suécia e, como resultado, ambos os modelos foram capazes de gerar soluções com resultados satisfatórios para serem aplicados em casos reais.

Kozachenko et al (2020) abordou a formação de trens com blocos de vagões com múltiplos destinos e que devem ser ordenados na composição de acordo com a necessidade. Diferente de Bohlin et al (2016), que analisou a formação de trens em pátios de triagem em rampa, Kozachenko et al (2020) desenvolveu seu modelo aplicado a pátios ferroviários planos.

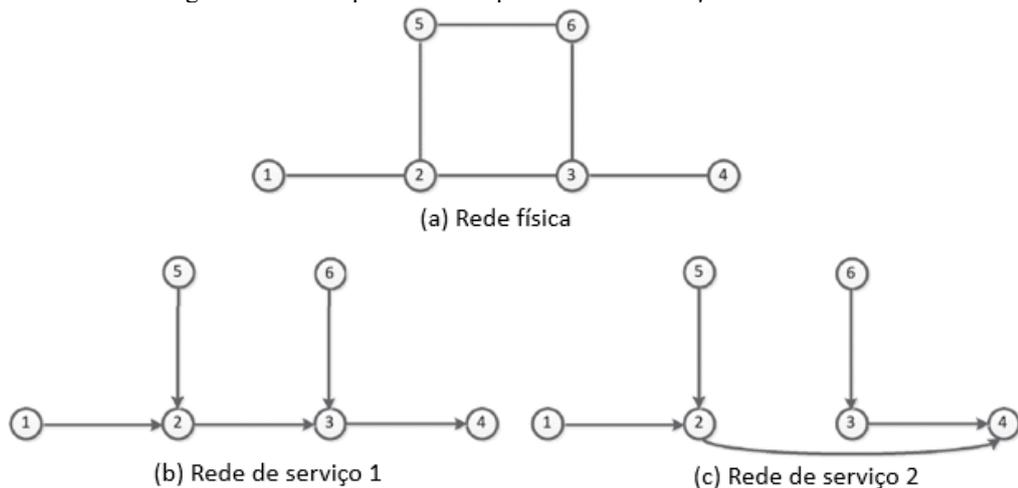
O modelo desenvolvido por Kozachenko et al (2020) foi formulado como um problema de otimização, o qual visa minimizar o tempo dispendido em manobras, e a técnica de solução adotada foi a teoria de grafos. Como resultado, o método proposto reduziu o tempo das manobras no pátio ferroviário em 8,1%, se comparado com outros métodos existentes.

A publicação de Lin e Zhao (2019) apresenta uma formulação para o problema de formação de trens em terminais ferroviários referente a operação de trens diretos que transportam um ou mais tipos de commodities e para aqueles trens que tem formação em pátios de reclassificação. Utilizou-se um modelo de programação não linear com o objetivo de minimizar o custo total das operações de carregamento, descarregamento e reclassificação da composição, o qual foi aplicado em uma malha hipotética de forma a validar o modelo e a sua eficácia.

Chen, Dollevoet e Zhao (2018) desenvolveram um modelo de formação de trens aplicado a trens unitários, que, segundo os autores, é o modelo operacional predominante na China. São adotadas duas regras no modelo: regra unitária e a *intree rule*. A regra unitária considera que todos os vagões de uma demanda devem seguir uma mesma trajetória e serem alocados a um mesmo trem direto, enquanto que a *intree rule* define que os vagões com o mesmo destino devem ser operados da mesma forma e classificados no mesmo pátio de triagem.

A aplicação das duas regras pode ser inferida na Figura 24, onde cada nó é um pátio ferroviário.

Figura 24 - Exemplo de rede e possíveis combinações de trens



Fonte: Chen, Dollevoet e Zhao (2018). Adaptado pelo autor.

Considerando que as demandas de 1 a 4 e de 5 a 4 se encontram no pátio 2, segundo a regra *intree rule*, o trem formado deve seguir de 2 a 4, passando direto por 3. Somente no caso de indisponibilidade do trem de 2 a 4, considera-se uma reclassificação em 3. A regra unitária

é descumprida se o caminho das demandas de 1 a 4 e de 5 a 4 fosse $\{1, 2, 5, 6, 3, 4\}$ e $\{5, 2, 3, 4\}$, respectivamente.

A formulação do modelo de Chen, Dollevoet e Zhao (2018) foi construída adotando a Programação Inteira para pequenas e médias escalas de rede, enquanto que para grandes escalas utilizou-se um modelo baseado em uma árvore de decomposição. A formulação foi aplicada a dados reais do Sistema Ferroviário Chinês e obteve resultados, em média, 48,05% melhores do que aqueles alcançados por programas comerciais.

No âmbito do transporte ferroviário de passageiros, Deng et al (2013) analisou a relação entre a formação de trens interidades e a frequência do serviço. O Planejamento de Trens de Passageiros consiste na definição da quantidade de carros, frequência, trem-tipo e horário de parada. O comprimento do trem e a frequência determinam a capacidade de transporte e a qualidade do serviço, o que implica na escolha do passageiro.

Com base no exposto, Deng et al (2013) desenvolveram um modelo de otimização que minimiza o custo de viagem do passageiro e maximiza o lucro do operador. Como resultado, verificou-se que trens mais curtos e com alta frequência influenciam positivamente na qualidade do serviço, enquanto que trens mais longos e com menor frequência são uma solução ótima para serviços de longa distância.

Em outro estudo relacionado ao transporte ferroviário de passageiros, Xia, Ding e Wen (2018) analisaram diferentes formações de trens por meio de um modelo de otimização que tem como objetivo a minimização do custo do passageiro e da operação. Como restrições, o modelo considerou a frequência da operação e a demanda de passageiros.

O modelo proposto por Xia, Ding e Wen (2018) foi aplicado em um estudo de caso onde pode reduzir entre 4,43% e 9,24% os custos utilizando a formação de múltiplas composições ao invés da operação de composições com quantidade fixa de carros.

No estudo de Shafia, Sadjadi e Jamili (2009) foi proposto um planejamento de formação de trens, o qual define a blocagem, roteamento e grade de horários, a partir de uma formulação inteira não linear, porém devido às incertezas dos dados de entrada, utilizou-se uma Otimização Robusta. O modelo adota três funções objetivo: minimização do custo de formação do trem, minimização do custo de classificação dos vagões e minimização do custo relacionado ao tempo ocioso de vagões esperando por trens no pátio de triagem.

Para a resolução do problema adotou-se um método heurístico, o qual foi dividido em três partes: roteamento do conjunto de vagões, alocação dos conjuntos de vagões nos trens e

alocação exata de cada vagão nos trens. O modelo foi aplicado em um estudo de caso de uma ferrovia iraniana.

Wang, Pen e Zhang (2009) desenvolveram um modelo de otimização que relaciona a roteirização do fluxo de vagões e o planejamento da formação de trens. Inicialmente o método seleciona as K rotas mais curtas de cada fluxo de vagões, depois são selecionados os pátios de triagem de cada fluxo de vagões, considerando a restrição de capacidade do pátio. Também é considerado como restrição a capacidade de cada seção. Dessa forma, são gerados vários esquemas com a combinação de rotas dos fluxos de vagões de toda a rede, o que resulta em um valor global consumido de vagões-hora.

A formulação do modelo de Wang, Pen e Zhang (2009) é um problema de Programação Não Linear e adotou-se um algoritmo genético e recozimento simulado, este último é caracterizado por ser uma técnica de busca local probabilística, e se fundamenta numa analogia com a termodinâmica. A função objetivo visa a minimização do consumo de vagões-horas.

Segundo Lan et al (2019), costuma-se otimizar de forma sequencial a distribuição de vagões, formação de trens e o roteamento dos trens, dessa forma os autores propõe um modelo que visa integrar essa otimização. O objetivo do modelo consiste na minimização do custo total de transporte, de atraso e de classificação dos vagões. Em outro estudo similar, Lin et al (2021) propõe otimizar de forma simultânea a formação de trens e itinerário, visando também a minimização de custos. Neste caso, o modelo foi aplicado em uma rede ferroviária real com 11 pátios e 9.356 vagões, alcançando a otimização em um tempo considerado razoável, demonstrando a aplicabilidade do método.

Yaghini, Momeni e Sarmadi (2012a, 2012b e 2015) publicaram três estudos no qual propõe um modelo de plano de formação de trens que define a rota, frequência e a atribuição da demanda aos trens, sendo que a função objetivo está relacionada com a minimização de custos. Cada um dos estudos foi desenvolvido com uma abordagem diferente, sendo utilizado o recozimento simulado na publicação de 2012b, programação inteira mista em 2012a e método de ramificação local e relaxamento induzido de busca em vizinhança na publicação de 2015. Em ambos os artigos, os métodos foram aplicados em casos reais da malha ferroviária do Irã e obtiveram ganhos de tempo e custo, o que contribui para o planejamento eficiente das ferrovias.

Um dos estudos que considerou o tempo como atributo a ser minimizado na função objetivo foi Lazarev e Musatova (2013). De forma detalhada, o estudo consistiu na definição da formação das composições, suas rotas e grade de horários, minimizando o tempo de chegada

ao destino, sendo considerado como atraso, a diferença entre o horário de chegada da composição e o prazo de entrega do produto.

Lazarev e Musatova (2013) desenvolveram o modelo considerando duas situações, sendo que em uma delas há restrição no número de locomotivas e na outra não. Na publicação não há informações se o mesmo foi aplicado em uma situação real ou fictícia.

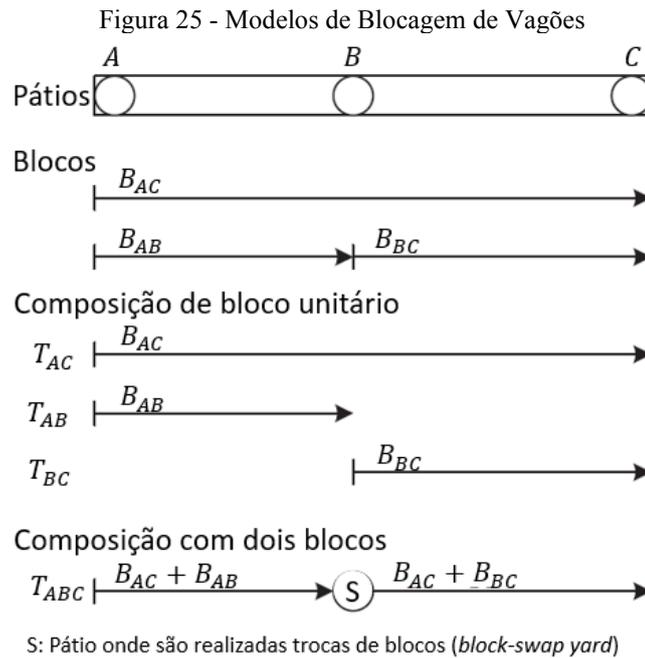
De acordo com Lin et al (2019), a operação de trens inteiros pode reduzir o tempo de classificação dos embarques e os custos da operação ferroviária, porém, há casos em que o volume do embarque não é suficiente para formar um trem inteiro com a frequência necessária, o que pode aumentar a estocagem e seus respectivos custos. Nesse sentido, os autores propõem um modelo que visa minimizar o custo total de estocagem dos fornecedores e clientes, assim como os custos de operação de um trem inteiro.

Diferente dos modelos que consideram a minimização de estoques, no modelo de Lin et al (2019) foi necessário considerar um estoque necessário para o ciclo de entregas, relacionado à operação de um trem inteiro com frequência de operação reduzida. Realizou-se a aplicação do modelo em um caso real que incluiu três fornecedores e um cliente, sendo que de acordo com os resultados, demonstrou-se viável essa operação para dois fornecedores.

Por sua vez, o trabalho de Xiao e Lin (2016) criou um modelo de otimização baseado na formação de trens com blocos unitários e trens com dois blocos simultaneamente, o que difere do método mais tradicional de otimização da formação de trens em várias etapas em que primeiro é formulado o planejamento de trens com blocos unitários e, depois, alguns desses blocos são combinados para formar trens com dois blocos. Entende-se como um bloco o conjunto de vagões que não sofre classificações até chegar ao seu destino final. Ressalta-se que o bloco tem um par Origem e Destino (OD) fixo, porém os vagões individuais podem pares ODs diferentes.

Na Figura 25 são apresentadas as duas formas de blocagens abordadas no estudo de Xiao e Lin (2016). O exemplo é composto de três pátios (A, B e C) e três blocos (B_{AC} , B_{AB} , B_{BC}) que são dispostos de duas formas, em composições com blocos unitários (*One-block train*) e composições com dois blocos (*Two-block train*).

A troca de blocos, identificada na Figura 25 como S , acontece quando um bloco é desconectado de um trem, e é ligado a outra composição num ponto intermédio da sua rota, ou seja, a troca de blocos permite atribuir um bloco a mais de uma composição enquanto percorre o seu roteiro.



Fonte: Xiao e Lin (2016). Adaptado pelo autor.

O modelo de Xiao e Lin (2016) é dividido em três partes: roteirização de vagões, alocação de vagões em blocos e alocação de blocos em trens. A função objetivo visa minimizar o consumo de horas-vagão, considerando as restrições de capacidade. A abordagem aplicada para resolução do problema é a otimização heurística baseada no Sistema de Colônia de Formigas.

Xiao e Lin (2016) aplicaram o modelo na malha ferroviária do Noroeste da China e os resultados indicaram a redução de 15,9% no total de vagões-hora consumidos em comparação com a formação trens apenas com blocos unitários.

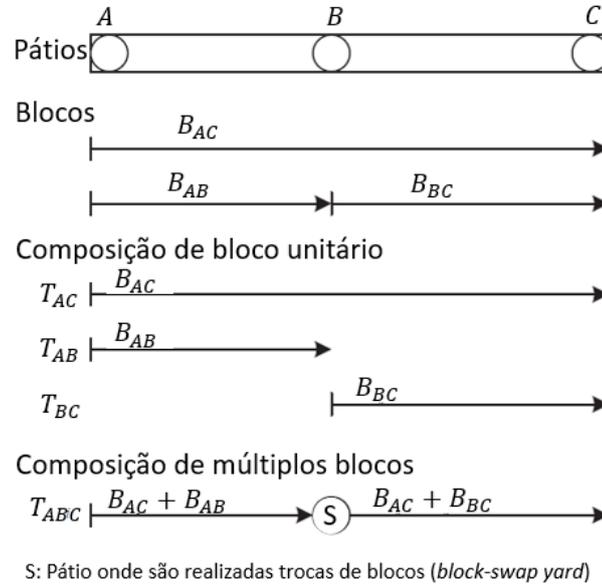
Problema similar, envolvendo trens de blocos unitários e trens com dois blocos, foi abordado por Xiao, Lin e Wang (2018). O modelo inicial precisa ser abastecido com a demanda de embarques, capacidade de classificação e quantidade de linhas nos pátios. Com base nisso, o método substitui alguns trens de blocos unitários por trens com dois blocos a partir da minimização do consumo de horas-vagão de todos os pátios. A técnica de solução adotada foi o Algoritmo Genético e a Pesquisa Tabu.

Os autores adotam uma classificação diferente de acordo com o método de formação dos blocos, denominando de união e ligação.

A união para a formação de composição com dois blocos, apresentada na Figura 26, ocorre quando são combinadas três composições de blocos unitários. No exemplo, as

composições de blocos unitários T_{AC} , T_{AB} e T_{BC} são combinados formando a composição com múltiplos blocos T_{ABC} .

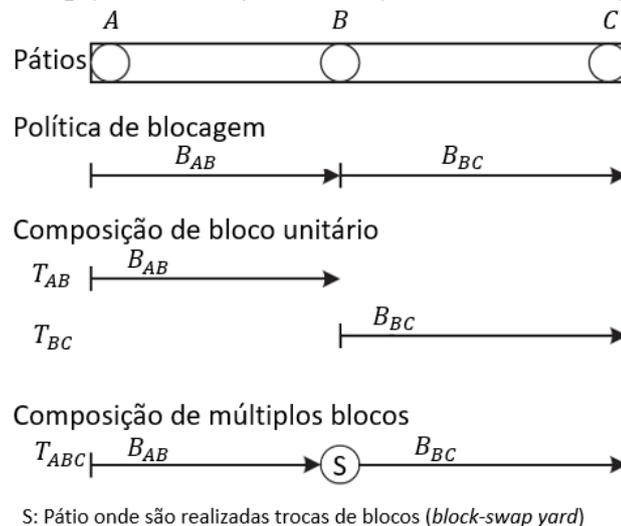
Figura 26 - União de blocos para a formação de trem com múltiplos blocos



Fonte: Xiao, Lin e Wang (2018). Adaptado pelo autor.

A ligação para a formação de composição com dois blocos, apresentada na Figura 27, ocorre quando apenas dois blocos (B_{AB} e B_{BC}) são constituídos e arranjados para constituir a composição T_{ABC} . Nesse caso, a demanda com origem no pátio A e destino no pátio C está alocada nos blocos B_{AB} e B_{BC} , ao invés de estar alocada no bloco direto B_{AC} . Além disso, uma reclassificação dos vagões é necessária no pátio B.

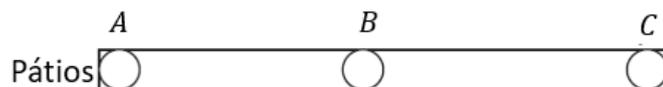
Figura 27 - Ligação de blocos para a formação de trem com múltiplos blocos



Fonte: Xiao, Lin e Wang (2018). Adaptado pelo autor.

Quando a demanda ao longo do percurso aumenta ao ponto de ser necessário no pátio *B* gerar uma composição unitária para atender o excesso de vagões, a composição com dois blocos é classificada como *Variable Basic-Complementary Weight Ratio* (VRTT), conforme pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - *Variable Basic-Complementary Weight Ratio* (VRTT)



VRTT



Composição extra de bloco unitário

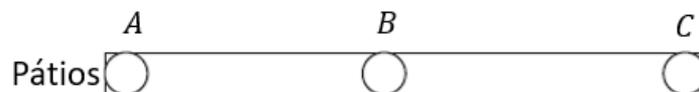


S: Pátio onde são realizadas trocas de blocos (*block-swap yard*)

Fonte: Xiao, Lin e Wang (2018). Adaptado pelo autor.

Por outro lado, quando a demanda ao longo do percurso diminui e, por questões de capacidade, é necessário gerar um trem unitário no pátio *A* para atender a demanda de excesso de vagões, o trem com dois blocos é classificado como *Fixed Basic-Complementary Weight Ratio* (FRTT), conforme pode ser observado no exemplo da Figura 29.

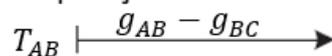
Figura 29 - *Fixed Basic-Complementary Weight Ratio* (FRTT)



FRTT



Composição extra de bloco unitário



S: Pátio onde são realizadas trocas de blocos (*block-swap yard*)

Fonte: Xiao, Lin e Wang (2018). Adaptado pelo autor.

Os referidos métodos de organização na formação de trens têm suas peculiaridades que impactam no tempo em que os vagões ficam em cada pátio ferroviário e dessa forma, afetam a solução ótima. O modelo foi aplicado em uma rede com 19 pátios ferroviários na China e obteve-se uma redução de 6,5% no consumo de horas-vagão se comparado com a adoção de, somente, trens com blocos unitários na rede ferroviária.

Zhao e Lin (2019) desenvolveram um estudo relacionado à otimização da formação de trens com múltiplos embarques, que define qual a estratégia a ser adotada, considerando a minimização de atrasos relacionados aos processos de embarque em todos os pátios de origem das mercadorias. Nesse caso utilizou-se um modelo de programação inteira e o modelo foi validado em um estudo de caso fictício de pequena escala e, também, com dados do sistema ferroviário chinês foi realizado um estudo de caso real, sendo que os resultados indicam a eficiência do método desenvolvido.

O transporte de produtos perigosos em ferrovias exige procedimentos específicos para garantir a segurança, Lavrukhin et al (2018) desenvolveram um modelo de formação de trens que considera o risco associado a essas operações a partir de dados estatísticos. O modelo pode servir de base para uma tecnologia de automatização para definir de forma racional as composições de trens que transportam produtos perigosos. Além da abordagem com relação aos riscos, o modelo considera a minimização de custos.

3.7 SÍNTESE DOS ESTUDOS SELECIONADOS

A síntese dos resultados é apresentada na Tabela 7, na qual são elencados os estudos selecionados.

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm	Lin et al	Applied Mathematical Modelling	2021	China	Proposição de modelo para a definição de um plano de formação de trens e itinerário, considerando as limitações físicas de capacidade da via.	Definição de plano de formação de trens e itinerário	Recozimento simulado e programação binária não linear	Custos
An optimization method of the multi-group train formation at flat yards	Kozachenko et al	International Journal of Rail Transportation	2020	Ucrânia	Proposição de modelo para a definição da formação de trens, simulando o funcionamento de um pátio plano e selecionando o caminho mais curto para as composições percorrerem.	Operação de pátios de triagem planos	Teoria de Grafos	Tempo
Optimizing Train Formation Problem With Car Flow Routing and Train Routing by Benders-and-Price Approach	Lan et al	IEEE Access	2019	China	Proposição de modelo que busca otimizar de forma integrada a formação de trens, distribuição de vagões e roteamento dos trens.	Definição da formação de trens, distribuição de vagões e roteamento dos trens	Programação inteira baseada em arco e modelagem baseada em caminho	Custos

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
Formation of a model for the rational placement of cars with dangerous goods in a freight train	Lavrukhin et al	Procedia Computer Science	2019	Ucrânia	Proposição de modelo para a definição de composições ferroviários que transportam produtos perigosos, que considera os custos envolvidos com a composição dos trens, gastos adicionais com o rearranjo e, também, os possíveis riscos do tráfego de trens com produtos perigosos sob determinadas condições.	Definição de composições ferroviários que transportam produtos perigosos	Algoritmo genético	Custos
The Systematic Optimization of Train Formation in Loading Stations	Lin e Zhao	Symmetry	2019	China	Proposição de modelo para a definição de composições ferroviárias em terminais para situações em que a composição é direta e transporta apenas um tipo de commodity, em que a composição é direta e transporta várias commodities, também, em que a composição é direta e os trens tem formação em pátios de reclassificação.	Definição de composições ferroviárias em terminais	Programação Não Linear	Custos

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
An Optimization Approach to the Low-Frequency Entire Train Formation at the Loading Area	Lin et al	Sustainability	2019	China	Proposição de modelo para a definição de um plano de operação dos trens aplicado a locais com baixa demanda, onde a frequência de formação de trens é baixa	Definição de plano de operação dos trens	Progração inteira	Custos
Mathematical model for planning the distribution of locomotives to meet the demand for making up trains	Nascimento e Rosa	Gestão & Produção	2019	Brasil	Proposição de modelo para o planejamento da distribuição de locomotivas com o intuito de minimizar os custos de distribuição e considera o desbalanceamento entre oferta e demanda de locomotivas.	Distribuição de locomotivas	Programação Inteira	Custos
The Multi-Shipments Train Formation Optimization Problem Along the Ordered Rail Stations Based on Collection Delay	Zhao e Lin	IEEE Access	2019	China	Proposição de modelo de plano de formação de trens que considera restrições como o tamanho dos trens, capacidade dos pátios, condições de exclusividade, coleta, operação e lógica das variáveis de decisão.	Formação de trens aplicada a composições com múltiplos embarques	Programação Inteira Não Linear	Tempo

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm	Chen, Dollevoet e Zhao	Transportation Research	2018	China	Proposição de um modelo para a formação de trens com bloco unitário, visando definir quais os pátios ferroviários que serão atendidos por cada composição e qual a demanda será alocada em cada bloco, considerando a minimização de custos.	Formação de trens unitários	Programação Linear Binária	Custos
Estratégia de utilização da folga de tração de trens para planejamento da distribuição de vagões vazios	Louzada et al	Revista Transportes	2018	Brasil	Proposição de modelo para o planejamento da distribuição de vagões vazios, onde são transportados utilizando a folga na capacidade de tração dos trens que circulam com os vagões carregados.	Distribuição de vagões vazios	Programação Inteira	Custos
Optimization study on multiple train formation scheme of urban rail transit	Xia, Ding e Wen	AIP Publishing	2018	China	Proposição de modelo que define a quantidade de carros e o número ótimo de diferentes formações de composições de trens de passageiros.	Formação de trens de passageiros	Programação Linear	Custos

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
Solving the train formation plan network problem of the singleblock train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search	Xiao, Lin e Wang	Transportation Research	2018	China	Proposição de modelo que otimiza a formação de composições de bloco unitário e com dois blocos em etapas, visando a minimização do consumo de hora-vagão em todos os pátios.	Formação de trens com dois blocos	Algoritmo genético e pesquisa tabu	Hora-vagão
Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation	Bohlin et al	Transportation Science	2016	Suécia	Proposição de modelo para otimização da formação de trens em pátios de triagem com rampa, permitindo o armazenamento temporário de vagões de carga em uma linha dedicada ao uso misto.	Operação de pátios de triagem com rampa	Programação Inteira	Número de operações
Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan	Xiao e Lin	Journal of Rail Transport Planning & Management	2016	China	Proposição de modelo que otimiza a formação de composições de bloco unitário e com dois blocos simultaneamente, visando a minimização do consumo de hora-vagão em todos os pátios, satisfazendo também as limitações de capacidade.	Formação de trens com dois blocos	Otimização heurística baseada no sistema colônia de formigas	Hora-vagão

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
A hybrid solution method for fuzzy train formation planning	Yaghini, Momeni e Sarmadi	Applied Soft Computing	2015	Irã	Proposição de modelo de plano de formação de trens, que considera os cenários otimista, normal e pessimista. O modelo foi testado realizando testes com o número de pátios, distância entre pátios, quantidade máxima de vagões que podem ser trocados de composição, custos fixos e variáveis e demanda.	Definição da rota, frequência e atribuição da demanda aos trens	Método de ramificação local e relaxamento induzido de busca em vizinhança	Custos
How To Balance The Relationship Between Train Formation And Service Frequency	Deng et al	International Conference on Transportation Engineering	2013	China	Proposição de um modelo de otimização que minimiza o custo de viagem do passageiro e maximiza o lucro do operador, relacionando a formação de trens intercity e a frequência do serviço.	Formação de trens de passageiros	Método analítico	Custos
The Problem of Trains Formation and Scheduling: Integer Statements	Lazarev e Musatova	Automation and Remote Control	2013	Rússia	Apresentação de formulações para a definição de composições ferroviárias e grade de horários, considerando casos com e sem a restrição do número de locomotivas.	Definição de composição ferroviária e grade de horários	Programação Inteira	Tempo

Tabela 7 - Síntese dos artigos selecionados (continuação)

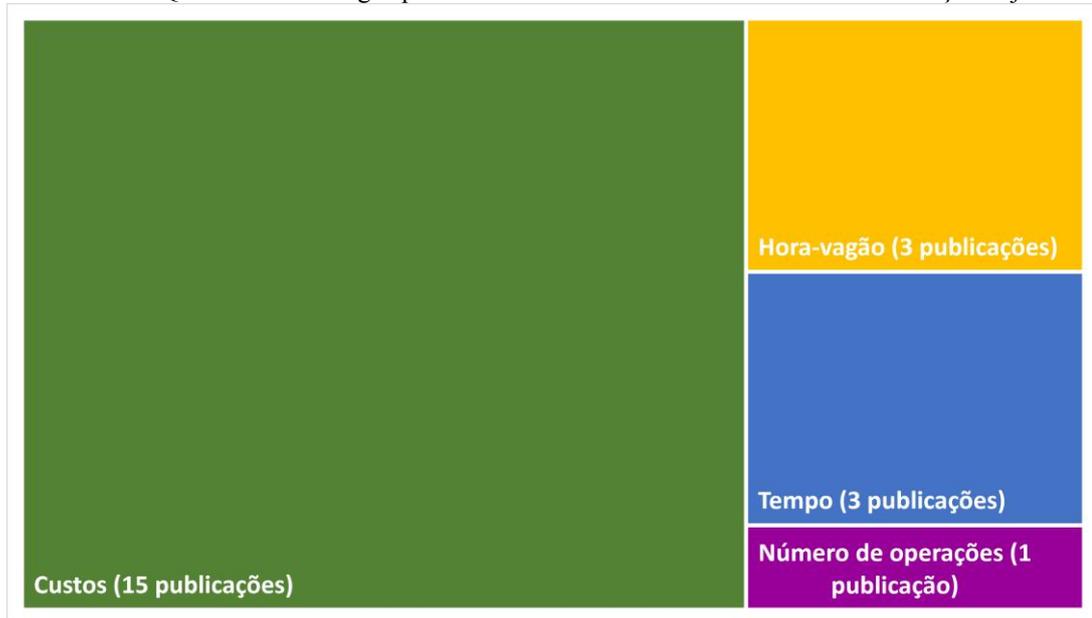
Título	Autores	Publicação	Ano	Local	Resumo	Abordagem Metodológica	Técnica de Solução	Atributos Minimizados ou Maximizados
An improved local branching approach for train formation planning	Yaghini, Momeni e Sarmadi	Applied Mathematical Modelling	2013	Irã	Proposição de modelo de plano de formação de trens. Utilizou-se para a definição do valor dos parâmetros um método de realização de experimentos.	Definição da rota, frequência e atribuição da demanda aos trens	Programação Inteira Mista	Custos
Solving train formation problem using simulated annealing algorithm in a simplex framework	Yaghini, Momeni e Sarmadi	Journal of Advanced Transportation	2012	Irã	Proposição de modelo de plano de formação de trens. O modelo foi aplicado em um estudo de caso para o sistema ferroviário iraniano.	Definição da rota, frequência e atribuição da demanda aos trens	Recozimento simulado	Custos
Robust train formation planning	Shafia, Sadjadi e Jamili	Journal of Rail and Rapid Transit	2009	Irã	Proposição de um modelo de planejamento da formação de trens, o qual consiste na definição da blocagem, roteamento e grade de horários.	Definição de itinerário	Programação Inteira Mista	Custos
A Network Method Of Synthetic Optimization Of Car Flow Route And Train Formation Plan	Wang Pen e Zhang	International Conference on Transportation Engineering	2009	China	Proposição de um modelo de otimização que relaciona a roteirização do fluxo de vagões e o planejamento da formação de trens.	Definição de itinerário	Programação Não Linear	Hora-vagão
Modelo para a Formação de Composições Ferroviárias	Murgel e Gualda	Revista Transportes	1999	Brasil	Proposição de modelo analítico para resolver o problema da formação de trens a fim de atender à demanda no período estipulado e sujeito às restrições.	Definição de itinerário	Programação Inteira	Custos

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Com base nos artigos selecionados, observa-se que o problema da Formação de Trens é abordado a partir da utilização de Modelos de Otimização. No Gráfico 1 são apresentados os atributos que foram selecionados nos artigos para serem maximizados ou minimizados de acordo com a formulação adotada na função objetivo.

Gráfico 1 - Quantidade de artigos por atributos maximizados ou minimizados na função objetivo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

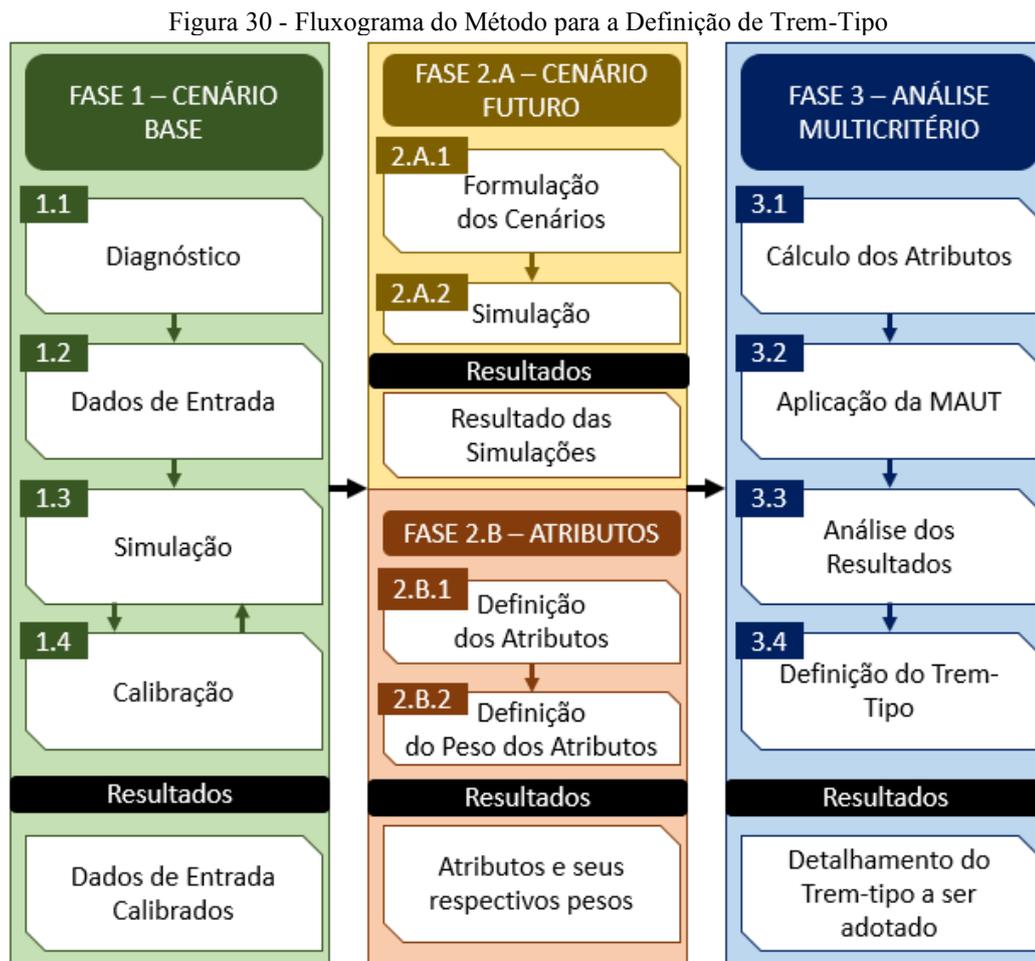
Verifica-se que mais da metade dos artigos, 68%, adotaram a minimização de custos na função objetivo. O atributo de horas-vagão está presente nas publicações de artigos chineses, sendo que nos mesmos justifica-se que devido ao fato que a demanda ferroviária tem crescido em descompasso com o aumento da oferta de infraestrutura na China, os atributos relacionados com a eficiência da operação, como as horas-vagão, têm sido mais utilizados que o custo.

Os modelos propostos pelos artigos estão relacionados com a realidade dos locais onde foram aplicados e à disponibilidade de informações obtidas, dessa forma não é possível realizar uma comparação de custos dos modelos. Também não foram observados nos estudos selecionados a aplicação de métodos de apoio multicritério à decisão, o que pode ser citado como um diferencial do método proposto no presente estudo.

4 PROPOSIÇÃO DE MÉTODO PARA A DEFINIÇÃO DE TREM-TIPO

O método proposto para a definição de trem-tipo ferroviários utiliza a simulação de marcha para a obtenção de atributos para diferentes cenários e métodos de apoio para a tomada de decisão para a escolha da melhor solução. Conforme apresentado na seção 2.3.1.4, para a análise multicritério, foi adotado a MAUT, por conta de ser possível a avaliação das alternativas simultaneamente, não precisando de comparações par a par e, também, pela sua facilidade na obtenção de uma análise de sensibilidade.

O método divide-se em três fases, as quais são subdivididas em 12 etapas. Na Figura 30 é apresentado o fluxograma do método proposto para a definição de trem-tipo. Ressalta-se que a FASE 2 é dividida em FASE 2.A - CENÁRIO FUTURO e FASE 2.B - ATRIBUTOS, as quais são independentes entre si e podem ser realizadas simultaneamente.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.1 FASE 1 - CENÁRIO BASE

A primeira fase do método consiste na modelagem do cenário base com a finalidade de comparar os resultados da simulação com dados reais para, se necessário, realizar ajustes nos dados de entrada de forma a melhor representar a realidade. Para aplicação dessa etapa em estudos operacionais de ferrovias existentes, deve-se adotar os dados da própria operadora ferroviária. Para o caso de novas ferrovias, em que não há base de dados reais sobre a sua operação, sugere-se adotar dados de ferrovias com operação similar, quando couber.

Essa fase divide-se em quatro etapas (Etapa 1.1 - Diagnóstico, Etapa 1.2 - Dados de Entrada, Etapa 1.3 - Simulação e Etapa 1.4 - Calibração). O resultado da fase são os dados de entrada calibrados.

4.1.1 Etapa 1.1 - Diagnóstico

A etapa de diagnóstico consiste na caracterização dos trechos, demanda, terminais, fluxos e demais aspectos operacionais da ferrovia em estudo. Deve-se nesse momento analisar o histórico da ferrovia e adotar o ano base como sendo o último ano típico de operação da mesma, para o caso de ferrovias existentes. Ressalta-se que objetiva-se evitar distorções na modelagem da simulação.

4.1.2 Etapa 1.2 - Dados de Entrada

Para essa etapa devem ser obtidos os dados de entrada necessários para a modelagem da ferrovia, a saber:

- Levantamento planialtimétrico do traçado da Ferrovia com a identificação dos pontos notáveis:
 - Ponto de Interseção Vertical (PIV).
 - Tangente-Espiral (TE).
 - Espiral-Circular (EC).
 - Circular-Espiral (CE).
 - Espiral-Tangente (ET).
 - Ponto de Curva (PC).

- Ponto de Tangente (PT).
- Dados relativos aos pátios e terminais ferroviários:
 - Localização.
 - Comprimento Total.
 - Comprimento Útil.
 - Tempo de licenciamento.
 - Tempo de manobra.
 - Tempo de carga e descarga.
 - Tempo de inspeção.
 - Tempo de recomposição e formação.
 - Tempo de posicionamento para carregamento.
 - Taxa de carregamento e sua eficiência.
- Velocidade Máxima Autorizada (VMA) por trecho.
- Trens-tipo adotados no ano base:
 - Número de locomotivas e sua posição na composição.
 - Número de vagões.
 - Origem e destino.
 - Produto transportado.
- Informações sobre a(s) locomotiva(s), incluindo *helpers*:
 - Modelo e fabricante.
 - Comprimento.
 - Peso bruto.
 - Velocidade mínima contínua.
 - Esforço trator máximo.
 - Potência.
 - Curva de consumo.
- Informações sobre o(s) vagão(s):
 - Tipo do vagão.
 - Comprimento do vagão.
 - Tara do vagão.
 - Peso da carga.

Ressalta-se que mais dados podem ser necessários a depender da especificidade da ferrovia em estudo.

4.1.3 Etapa 1.3 - Simulação

Os dados levantados na Etapa 1.2 devem ser inseridos em um *software* de simulação disponível no mercado. Contudo deve-se observar os formatos e unidades aceitas pelo software, pois pode ser necessário o tratamento dos dados, como por exemplo, o cálculo do grau de curvatura, conforme apresentado na seção 2.1.1.1.

Depois devem ser realizadas simulações de marcha de forma a obter os dados de saída como os tempos entre pátios e o consumo de combustível por trem-tipo, os quais devem ser tabulados.

4.1.4 Etapa 1.4 - Calibração

Os resultados tabulados de tempo e consumo de combustível obtidos na Etapa 1.3 devem ser validados pelo decisor, a partir de sua experiência e conhecimento na operação dos fluxos em estudo e, de preferência, os resultados devem ser comparados com os dados históricos da ferrovia. Caso os dados não sejam validados pelo decisor ou sejam observadas distorções entre os valores simulados e os históricos, deve-se revisar os dados de entrada e realizar ajustes, caso couber.

Caso sejam necessários ajustes nos dados de entrada, deve-se retornar à Etapa 1.2, senão pode-se prosseguir para a FASE 2.A e FASE 2.B.

4.2 FASE 2.A - CENÁRIO FUTURO

A parte A da segunda fase do método consiste na definição dos cenários futuros, que são compostos por diversas composições de trens-tipo. Depois é feita a simulação dos mesmos, de forma a obter o consumo de combustível e o tempo entre os pátios. Esses resultados são utilizados na FASE 3 para calcular os atributos.

Essa fase divide-se em duas etapas (Etapa 2.A.1 - Formulação dos Cenários e Etapa 2.A.2 - Simulação). O resultado da fase são os dados resultantes das simulações, dentre eles os valores de consumo de combustível e tempo entre os pátios, para cada trem-tipo.

4.2.1 Etapa 2.A.1 - Formulação dos Cenários

A formulação dos cenários consiste em definir as variáveis relacionadas ao trem-tipo ferroviário e à operação da ferrovia que serão analisadas. Dentre as variáveis a serem estudadas, pode-se elencar o modelo das locomotivas, o modelo dos vagões, o modelo de operação da ferrovia, lastreamento das locomotivas, ampliação da extensão de pátios ferroviários e utilização de locomotivas *helper*.

De acordo com Amicis (2018), as concessionárias ferroviárias dimensionam o trem-tipo a partir de métodos internos desenvolvidos ao longo de anos de operação. Contudo, frequentemente a definição do trem-tipo não é feita com a utilização de simuladores e, quando são utilizados, não são empregados critérios claros que orientem na escolha do melhor trem-tipo pelo tomador de decisão.

4.2.2 Etapa 2.A.2 - Simulação

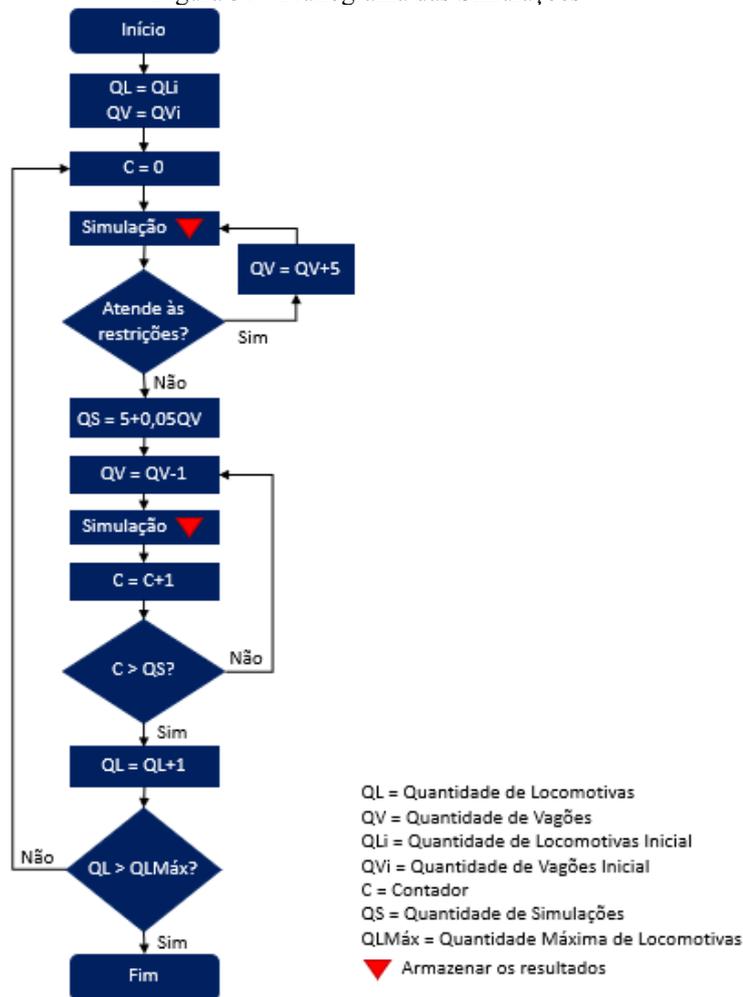
Os dados levantados na Etapa 1.2, que foram calibrados, devem ser utilizados no *software* de simulação. Depois, para cada cenário definido na Etapa 2.A.1, deve-se aplicar o fluxograma apresentado na Figura 31, que consiste na alteração da quantidade de vagões e locomotivas de forma a obter os tempos entre pátios e o consumo de combustível por trem-tipo, considerando as limitações da locomotiva quanto a sua operação em velocidade mínima contínua.

De forma mais detalhada, deve ser definida por primeiro a quantidade inicial de locomotivas (QL_i) que serão rodadas as simulações, sugere-se adotar uma locomotiva. Além disso, deve-se definir a quantidade inicial de vagões (QV_i) a serem simulados, número esse que será arbitrado e pode variar bastante a depender da infraestrutura e demanda disponível, sugere-se adotar um valor no intervalo entre 5 e 50. Esse intervalo foi adotado considerando um valor aproximado do menor número de vagões apresentado pelas concessionárias na Declaração de Rede de 2022 (ANTT, [2022]b), na qual são publicadas anualmente informações sobre as condições técnico-operacionais da infraestrutura ferroviária concedida.

Tendo sido adotada a quantidade de locomotivas e vagões inicial, realiza-se a primeira simulação, verificando se o trem-tipo atende às restrições da via (comprimento útil dos desvios), da locomotiva (velocidade mínima contínua e esforço trator máximo) ou demais restrições que

possam afetar a operação do trem-tipo. Sendo atendidas as restrições, serão adicionados cinco vagões ao trem-tipo e novas simulações são realizadas até que seja simulado um trem-tipo que não atenda às restrições.

Figura 31 - Fluxograma das Simulações



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Como o incremento na quantidade de vagões a cada simulação foi de cinco, depois é feito um refinamento variando apenas um vagão a cada simulação. Delimita-se a quantidade de simulações em QS, que é composta por uma parcela fixa de 5 simulações, o que representa uma quantidade mínima e por uma parcela variável que corresponde à 5% da quantidade de vagões (QV) que foi simulada e não atendeu às restrições. Se o valor de QS resultar em número decimal, o mesmo deve ser arredondado para cima.

Depois de realizadas as simulações variando a quantidade de vagões para a quantidade de locomotivas inicial (QL_i), deve-se refazer o processo supracitado, adicionando uma

locomotiva por vez até atingir a quantidade máxima de locomotivas (QLMáx) que for definida. Sugere-se adotar QLMáx entre dois e quatro.

Os resultados de todas as simulações devem ser armazenados e os valores de tempo percorrido entre os pátios e de consumo de combustível devem ser tabulados.

4.3 FASE 2.B - ATRIBUTOS

A parte B da segunda fase do método consiste na definição dos atributos a serem utilizados no modelo e os seus respectivos pesos. Essa fase divide-se em duas etapas (Etapa 2.B.1 - Definição dos Atributos e Etapa 2.B.2 - Definição de Peso dos Atributos). O resultado dessa fase são a definição dos atributos e seus respectivos pesos.

4.3.1 Etapa 2.B.1 - Definição dos Atributos

Para a definição dos atributos a serem considerados no método, sugere-se que seja feita a aplicação de entrevista com pelo menos três especialistas em planejamento de transportes e/ou operação de ferrovias de forma a definir os atributos que são importantes na estratégia da operadora ferroviária.

Podem ser considerados atributos como custo, eficiência energética, tempo de ciclo, emissão de gases poluentes e capacidade de transporte.

4.3.2 Etapa 2.B.2 - Definição de Peso dos Atributos

Tendo sido definidos os atributos, o próximo passo é a determinação dos seus pesos, a qual será feita por meio de entrevista, conforme foi apresentado na seção 2.3.1.1 por sugestão de Gomes e Gomes (2019), entre o analista da decisão e o decisor.

4.4 FASE 3 - ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A terceira fase do método consiste na integração dos produtos gerados na FASE 2.A e na FASE 2.B para a geração dos resultados, a sua análise e definição do trem-tipo final. Essa fase divide-se em quatro etapas (Etapa 3.1 - Cálculo dos Atributos, Etapa 3.2 - Aplicação da

Teoria da Utilidade Multiatributo, Etapa 3.3 - Análise dos Resultados e Etapa 3.4 - Definição do Trem-Tipo). O resultado dessa fase é o detalhamento do trem-tipo a ser adotado.

4.4.1 Etapa 3.1 - Cálculo dos Atributos

Tendo sido realizadas todas as simulações (Etapa 2.A.2) e definidos os atributos (Etapa 2.B.1), procede-se com o cálculo dos atributos. Dessa forma serão utilizadas formulações matemáticas que, a partir dos resultados obtidos nas simulações, determinem o valor dos atributos que forem adotados.

4.4.2 Etapa 3.2 - Aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo

A Etapa 3.2 do método correlaciona os resultados do cálculo dos atributos, obtidos na Etapa 3.1, com o peso dos atributos, definido na Etapa 2.B.2, e aplica na formulação da Teoria da Utilidade Multiatributo, MAUT, conforme apresentado na seção 2.3.1.1. Os valores resultantes devem ser tabulados e elencados em ordem decrescente.

4.4.3 Etapa 3.3 - Análise dos Resultados

A análise dos resultados será feita a partir de uma análise de sensibilidade, na qual serão feitas alterações no peso de cada atributo, mantendo a proporção original entre os demais atributos. O objetivo é verificar o impacto na alteração dos pesos dados a cada atributo para a definição das alternativas a serem escolhidas.

4.4.4 Etapa 3.4 - Definição do Trem-Tipo

A partir da realização da análise dos resultados deve-se definir o trem-tipo. A composição com maior pontuação encontrada será a de maior tendência a ser a escolhida. Contudo sugere-se realizar uma reunião entre o analista da decisão e o decisor, para que o último possa realizar suas considerações quanto aos resultados alcançados. O trem-tipo definido deve ser detalhado para que o mesmo possa servir de base para as demais etapas do Estudo Operacional e de outros estudos que forem necessários.

5 DEMONSTRAÇÃO DA APLICABILIDADE DO MÉTODO PROPOSTO

Para fins de verificação da aplicabilidade do método de determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudos operacionais, será utilizada como malha ferroviária de estudo a Ferrovia Tereza Cristina (FTC), em específico a sua operação de carvão mineral.

As três fases do método foram aplicadas para os fluxos de transporte de carvão mineral da referida ferrovia, simulando a definição do trem-tipo ferroviário a ser utilizado posteriormente em estudos operacionais. A Fase 1, Cenário Base, e a Fase 2.A, Cenário Futuro, utilizaram o apoio da ferramenta de simulação *Rail Traffic Controller* (RTC), uso disponibilizado pela *Berkeley Simulation Software* (BSS).

Conforme apresentado na seção 2.2.1.4, adotou-se o RTC devido sua aplicação ser mais adequada às ferrovias brasileiras, em razão de que as mesmas tem operação similar das ferrovias dos Estados Unidos, para as quais o *software* foi desenvolvido. Ressalta-se que o método não restringe a utilização de outros simuladores.

Referente às demais etapas do método, foram definidos os atributos e os seus respectivos pesos na Fase 2.B e, por fim, foram definidos os trens-tipo com base no cálculo dos atributos e aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (Fase 3).

5.1 FASE 1 - CENÁRIO BASE

Para a elaboração do cenário base foram coletadas informações com a concessionária detentora dos direitos de exploração dos trechos ferroviários em estudo, a FTC. Além disso, foram utilizados dados públicos disponibilizados por meio Anuário do Setor Ferroviário e da Declaração de Rede, os quais são publicados pela ANTT, que é o órgão de regulação, supervisão e fiscalização atividades de prestação de serviços e de exploração da infraestrutura de transportes, exercidas por terceiros, no qual estão inclusas as concessionárias ferroviárias.

5.1.1 Etapa 1.1 - Diagnóstico

A FTC dispõe de uma malha ferroviária de 164 km de extensão na região sul de Santa Catarina, abrangendo 14 municípios, conectando o Porto de Imbituba, o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, o Terminal Intermodal Sul (TIS) e os terminais de carregamento de carvão (FTC, [2020]). Sua operação, sob o modelo de concessão, teve início em 1997 com

duração de 30 anos, podendo ser prorrogável (ANTT, [2022]c). Na Figura 32 é apresentada a localização da ferrovia.

Figura 32 - Malha Ferroviária da FTC



Fonte: BRASIL (2018).

Nos pátios identificados como Rio Fiorita, Sangão, Mina Novo Horizonte e Urussanga estão localizados os terminais de carga de carvão mineral. O produto é transportado por meio da ferrovia até o Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, no pátio denominado Capivari.

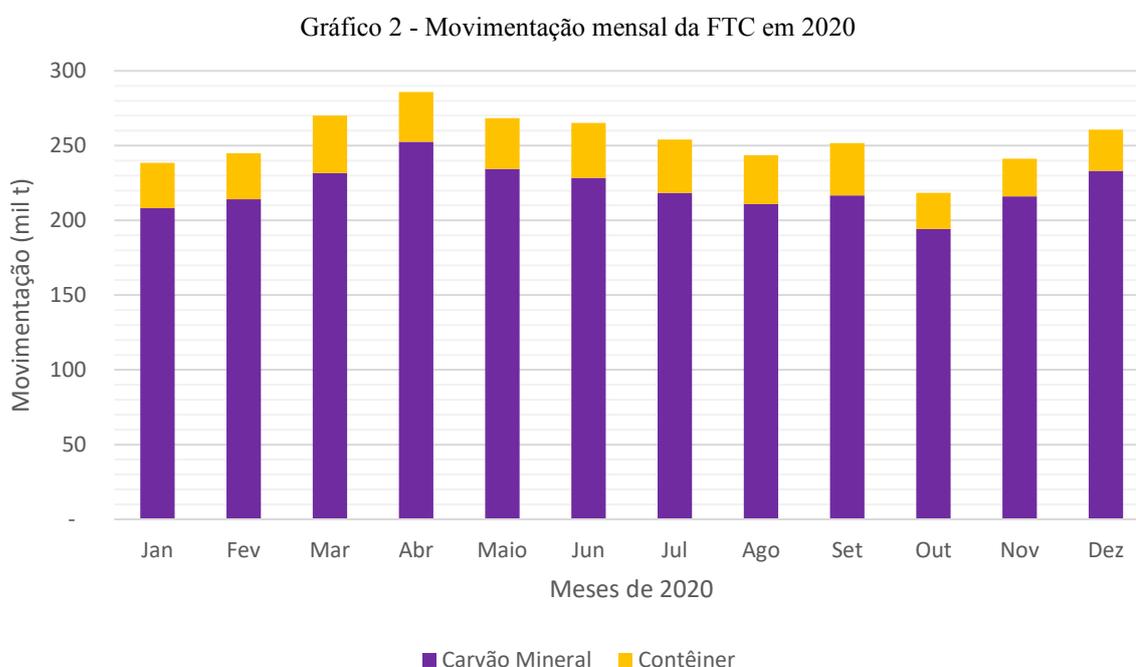
Outra operação também realizada pela FTC é a de contêineres entre o pátio de Engenheiro Paz Ferreira, onde está localizado o TIS, e o Porto de Imbituba.

A malha ferroviária é composta por uma Linha Principal, entre os pátios de Imbituba e Paz Ferreira, com uma extensão de 106,70 km. O Ramal de Urussanga é interligado com a Linha Principal no pátio de Esplanada e possui uma extensão de 25,60 km, ligando até o pátio de Urussanga. O Ramal de Sangão é interligado com a Linha Principal no pátio de Paz Ferreira e possui uma extensão de 9,10 km, ligando até o pátio de Sangão. O Ramal de Rio Fiorita é interligado com a Linha Principal no pátio de Paz Ferreira e possui uma extensão de 17,92 km, ligando até o pátio de Rio Fiorita.

Em toda a extensão da malha ferroviária a linha é singela e possui bitola métrica. O tipo de dormente predominante – 66% da malha – é de madeira e nesses trechos a fixação utilizada é a rígida, porém há também trechos – 34% da malha – com dormente de concreto, sendo utilizada a fixação do tipo flexível.

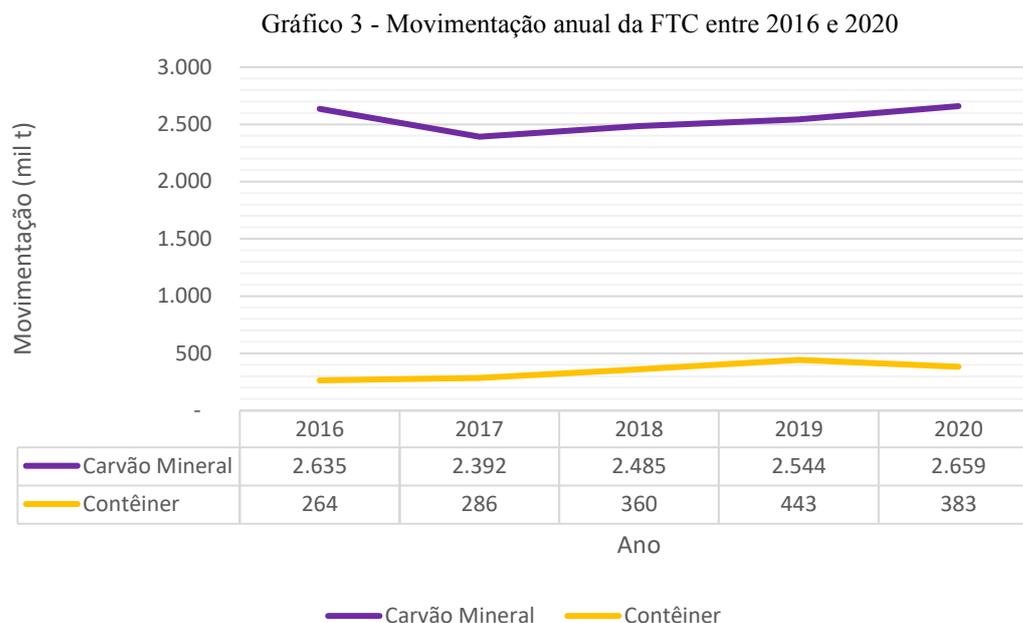
Quanto à Velocidade Máxima Autorizada (VMA), está definida na linha principal como sendo de 40 km/h e 30 km/h para composições vazias e carregadas, respectivamente. Nos ramais, a VMA é de 30 km/h e 25 km/h para composições vazias e carregadas, respectivamente.

Como iniciou-se a elaboração da etapa de diagnóstico durante o ano de 2021, o último ano com os dados completos foi 2020 e por esse motivo foi adotado como ano base do cenário atual. No Gráfico 2 é apresentada a movimentação mensal da FTC por produtos no ano base.



Fonte: ANTT ([2022]a).

Com base nos dados apresentados, verificou-se uma média de movimentação mensal de 254 mil toneladas movimentadas na ferrovia, sendo que o carvão mineral corresponde a 87% das cargas transportadas. No Gráfico 3 é apresentada a movimentação anual do período de 5 anos, entre 2016 e 2020, da FTC.



Fonte: ANTT ([2022]a).

Nos últimos cinco anos de operação, o pico de movimentação ocorreu em 2020, que representa um volume 14% maior se comparado com o ano de 2017. Durante esse período não houveram movimentações de outros produtos além de carvão mineral e contêiner.

A estrutura operacional da FTC conta com 11 locomotivas, 444 vagões e 483 colaboradores. O transporte de contêineres geralmente ocorre com uma composição formada por uma locomotiva e 20 vagões ou duas locomotivas e 40 vagões.

A FTC utiliza duas configurações de trens-tipo para o transporte de carvão mineral, que assim definidas de acordo com as restrições de tracionamento da locomotiva, em razão de sua potência e aderência, além de considerar a demanda das minas de carvão. As configurações de trens-tipo utilizadas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Trens-tipo em operação na FTC para o transporte de carvão

Classificação	Quantidade de Locomotivas	Quantidade de Vagões
Composição simple	1	19
Composição dupla	2	38

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O carvão mineral originado dos terminais de Rio Fiorita e Sangão são transportados em composições simples com destino no pátio de Paz Ferreira, onde são associados para formarem composições duplas com destino a Capivari. Também costumam ser utilizadas composições simples para transportar o carvão mineral do terminal de Novo Horizonte com

destino a Capivari, porém podem ser acopladas com composições simples provenientes de Paz Ferreira, formando composições duplas com destino a Capivari. Enquanto que o transporte de carvão de Urussanga costuma ser transportado em composições duplas até Capivari.

Ressalta-se que em razão da demanda, nos percursos em que costuma-se utilizar trens-tipos duplos, pode-se utilizar composições simples. Além disso, frequentemente ao invés das composições carregadas serem direcionadas diretamente ao pátio de Capivari, opta-se por destiná-las ao pátio de Tubarão, em razão da disponibilidade de espaço do terminal de Capivari, que pode ocasionar filas de descarga e pode ser afetada também pela retenção de lotes por solicitação dos clientes ou do Complexo Termelétrico.

5.1.2 Etapa 1.2 - Dados de Entrada

Os dados de entrada, elencados no item 4.1.2, foram informados pela FTC. Os pontos notáveis do levantamento planialtimétrico foram analisados e tabulados, de forma a possibilitar a sua inserção no RTC. A malha da FTC é composta por 16 pátios, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Pátios ferroviários em operação na malha da FTC

Pátio	Sigla	km inicial	km final	Comprimento Total (m)	Comprimento Útil (m)
Imbituba	MIM	00+200	01+000	800	450
Barbacena	MBA	24+060	25+113	1.053	935
Capivari	MCP	44+500	46+540	2.040	1.170
Tubarão	MTB	50+100	51+290	1.190	960
Retiro	MDR	70+540	71+555	1.015	930
Esplanada	MEX	84+550	85+400	850	750
Novo Horizonte	MNH	101+400	102+115	715	600
CTI	MCT	103+000	103+400	400	310
Paz Ferreira	MPF	105+860	106+900	1.040	870
Sangão	MSA	113+580	114+250	670	530
Henrique Lage	MHL	00+700	02+780	2.080	1.300
Oficina Central	MPO	04+250	04+600	350	-
Urussanga (Carregamento)	MUR	23+350	23+850	500	420
Urussanga (Estação)	MUR	24+460	25+000	540	200
Rio Fiorita	MRF	16+260	16+700	440	346
Rio Fiorita (Final)	MRF	17+120	17+443	323	298

Fonte: FTC (2021).

Referente aos terminais de carga e descarga, a extensão aproximada das linhas destinadas a essa operação é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Terminais ferroviários em operação na malha da FTC

Pátio	Sigla	Extensão linha carga/descarga (m)
Imbituba	MIM	450
Capivari	MCP	1.170
Novo Horizonte	MNH	600
CTI	MCT	310
Sangão	MSA	1.424
Urussanga	MUR	619
Rio Fiorita	MRF	1.434

Fonte: FTC (2021).

Os dados relativos aos tempos de operação e taxas de carregamento dos pátios e terminais ferroviários são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Informações operacionais referentes aos pátios e terminais ferroviários

Informação operacional	Valor informado	Valor médio
Tempo de licenciamento	Entre 1 e 2 min	1:30 min
Tempo de manobra	Entre 15 e 35 min	25 min
Tempo de carga e descarga	Entre 1:00 hs e 2:10 hs	1:35 h
Tempo de inspeção	Entre 10 e 15 min	12:30 min
Tempo de recomposição e formação	Entre 20 e 50 min	35 min
Tempo de posicionamento para carregamento	Até 15 min	15 min
Taxa de carregamento do carvão mineral ¹	Entre 300 t/h e 570 t/h	435 t/h
Taxa de carregamento do contêiner ²	25 TEUs / h	25 TEUs/h
Taxa de descarregamento do carvão mineral	600 t/h	600 t/h

¹ Dependendo do cliente e da qualidade do carvão

² Considerando troca de contêineres

Fonte: FTC (2021).

As locomotivas utilizadas pela FTC são fabricadas pela *General Motors* (GM) e passaram por uma modernização que incluiu, entre outras alterações, o aumento da potência, lastreamento e ampliação da capacidade do tanque de combustível. Os modelos das locomotivas e suas respectivas características são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Modelos de locomotivas utilizadas pela FTC e suas características

Característica	Modelo das locomotivas		
	G8	G22U	G12
Quantidade	1	1	9
Comprimento (m)	14,375	14,375	17,12
Peso bruto (t)	73	80	75
Velocidade mínima contínua (km/h)	18	18	18
Esforço trator máximo (kgf)	15.480	16.500	15.500
Potência (HP)	950	1.425	1.425

Fonte: FTC (2021).

A curva de consumo de combustível das locomotivas da FTC, por ponto, está apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Curva de consumo de combustível das locomotivas da FTC

Ponto	Consumo de combustível (l/h)
1	15,7
2	46,4
3	86,7
4	131,5
5	175,4
6	222,0
7	267,6
8	304,3
Ponto Morto	7,2

Fonte: FTC (2021).

Os vagões utilizados pela FTC e suas respectivas características são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Modelos de vagões utilizados pela FTC e suas características

Característica	Modelo dos vagões	
	GHD	PDD
Produto transportado	Carvão Mineral	Contêiner
Comprimento (m)	15	15
Tara (t)	20	14
Capacidade de carga (t)	60	66

Fonte: FTC (2021).

5.1.3 Etapa 1.3 - Simulação

Nessa etapa realizou-se a inserção dos pontos notáveis do perfil planialtimétrico no RTC, foram cadastradas as VMAs por trecho e, também, os dados relativos às locomotivas e vagões. Os trens-tipos foram inseridos conforme a descrição das operações feita na Etapa 1.2.

Optou-se, como uma simplificação, por realizar as simulações utilizando apenas a locomotiva G12, haja vista que é a mais representativa da frota de material rodante da FTC.

Para fins de simplificação, a partir desse ponto adotou-se como convenção na apresentação de tabelas e gráficos a abreviação de L para locomotivas e V para vagões.

Na Tabela 15 são apresentados os resultados das simulações entre Rio Fiorita e Paz Ferreira.

Tabela 15 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Rio Fiorita e Paz Ferreira

Trem simulado	Origem	Destino	Tempo de percurso sem paradas (hh:mm:ss)	Consumo de Combustível (l)
1L + 19V Carregado	Rio Fiorita	Paz Ferreira	0:46:50	22,74
1L + 19V Vazio	Paz Ferreira	Rio Fiorita	0:37:50	15,5
Total			1:24:40	38,24

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das simulações entre Sangão e Paz Ferreira.

Tabela 16 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Sangão e Paz Ferreira

Trem simulado	Origem	Destino	Tempo de percurso sem paradas (hh:mm:ss)	Consumo de Combustível (l)
1L + 19V Carregado	Sangão	Paz Ferreira	0:22:56	6,55
1L + 19V Vazio	Paz Ferreira	Sangão	0:19:02	3,21
Total			0:41:58	9,76

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das simulações entre Paz Ferreira e Capivari.

Tabela 17 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Paz Ferreira e Capivari

Trem simulado	Origem	Destino	Tempo de percurso sem paradas (hh:mm:ss)	Consumo de Combustível (l)
1L + 38V Carregado	Paz Ferreira	Capivari	2:09:22	67,1
1L + 38V Vazio	Capivari	Paz Ferreira	1:38:05	41,04
Total			3:47:27	108,14

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 16 são apresentados os resultados das simulações entre Novo Horizonte e Capivari.

Tabela 18 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Novo Horizonte e Capivari

Trem simulado	Origem	Destino	Tempo de percurso sem paradas (hh:mm:ss)	Consumo de Combustível (l)
1L + 19V Carregado	Novo Horizonte	Capivari	1:59:09	32,14
1L + 19V Vazio	Capivari	Novo Horizonte	1:29:30	19,76
Total			3:28:39	51,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 19 são apresentados os resultados das simulações entre Urussanga e Capivari.

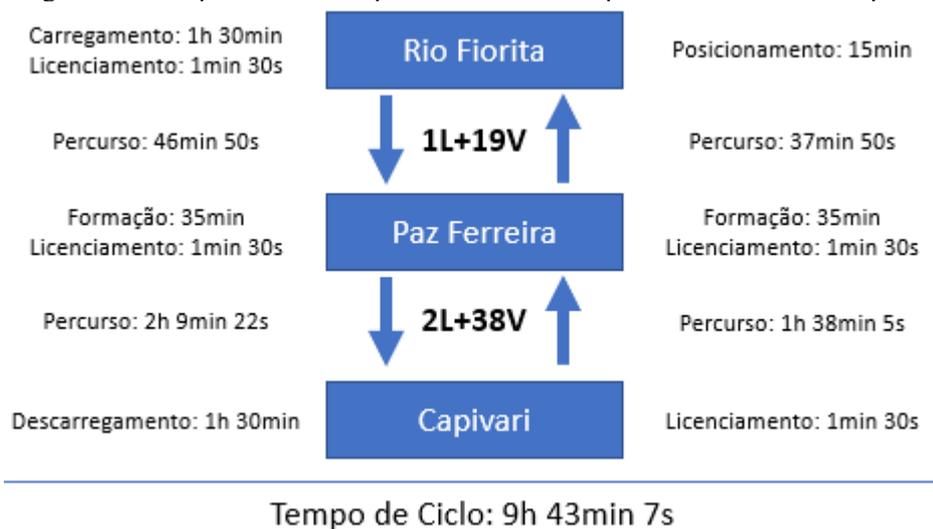
Tabela 19 - Simulação do trem-tipo do cenário base entre Urussanga e Capivari

Trem simulado	Origem	Destino	Tempo de percurso sem paradas (hh:mm:ss)	Consumo de Combustível (l)
2L + 38V Carregado	Urussanga	Capivari	2:22:41	77,07
2L + 38V Vazio	Capivari	Urussanga	1:51:04	43,62
Total			4:13:45	120,69

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O tempo de ciclo do trem-tipo com origem em Rio Fiorita e destino em Capivari foi determinado considerando o esquema apresentado na Figura 33.

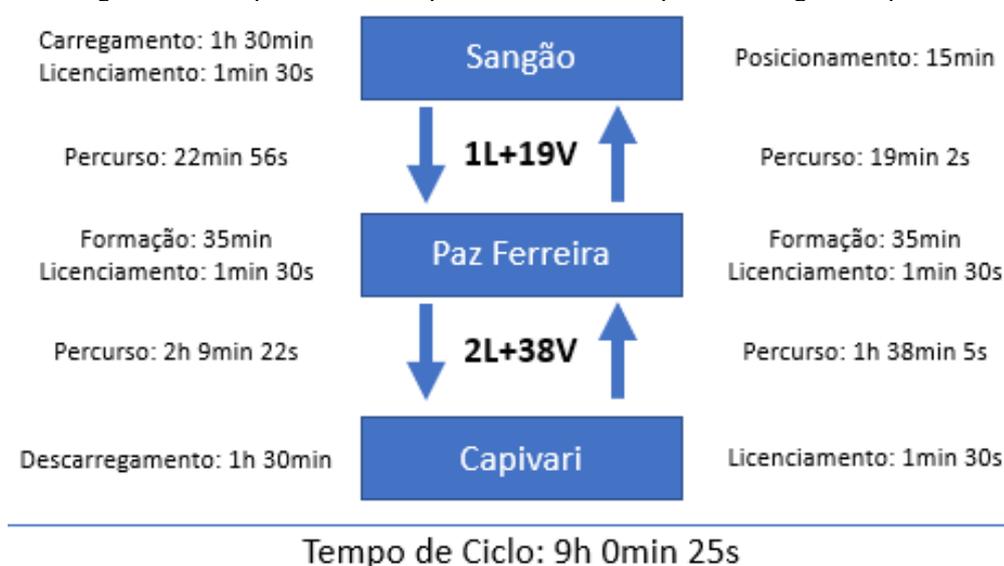
Figura 33 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Rio Fiorita e Capivari



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O tempo de ciclo do trem-tipo com origem em Sangão e destino em Capivari foi determinado considerando o esquema apresentado na Figura 34.

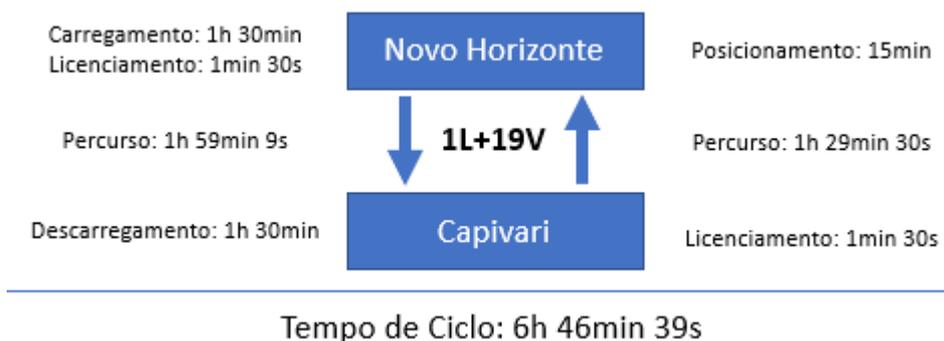
Figura 34 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Sangão e Capivari



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O tempo de ciclo do trem-tipo com origem em Novo Horizonte e destino em Capivari foi determinado considerando o esquema apresentado na Figura 35.

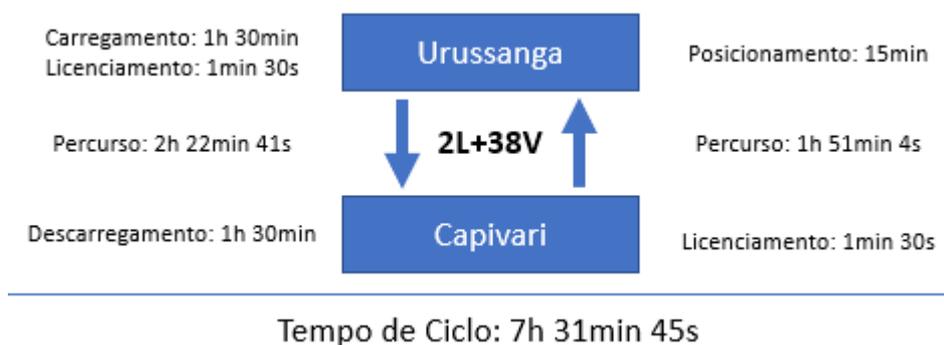
Figura 35 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Novo Horizonte e Capivari



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O tempo de ciclo do trem-tipo com origem em Urussanga e destino em Capivari foi determinado considerando o esquema apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Componentes do tempo de ciclo do trem-tipo entre Urussanga e Capivari



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Referente ao consumo de combustível, o resumo por fluxo de transporte é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Consumo de combustível por fluxo de transporte

Origem	Destino	TU/Trem	Consumo (l)	Consumo (l/100t)
Rio Fiorita	Capivari	1.140	92,31	8,10
Sangão	Capivari	1.140	63,83	5,60
Novo Horizonte	Capivari	1.140	51,90	4,55
Urussanga	Capivari	2.280	120,69	5,29

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.1.4 Etapa 1.4 - Calibração

Os resultados das simulações realizadas na seção 5.1.3 foram analisados e validados pela FTC, sendo que os tempos de ciclo apresentados contemplam ajustes sugeridos pela operadora.

5.2 FASE 2.A - CENÁRIO FUTURO

Nessa fase foram formulados os cenários futuros (Etapa 2.A.1) e realizadas as simulações (Etapa 2.A.2).

5.2.1 Etapa 2.A.1 - Formulação dos Cenários

Para fins de aplicação do método proposto, foram definidos dois cenários:

Cenário Futuro 1: Adoção do modelo de locomotiva G12 e implantação de trens diretos em todos os fluxos, o que inclui os trajetos entre Sangão e Paz Ferreira e entre Rio Fiorita e Paz Ferreira. Neste modelo de operação não é necessário realizar o acoplamento de trens no pátio de Paz Ferreira.

Simulou-se trens-tipos simples e duplos na operação entre Urussanga e Capivari e entre Sangão e Capivari, enquanto que entre Novo Horizonte e Capivari e entre Rio Fiorita e Capivari foram simulados apenas trens simples.

Com relação ao modelo de locomotiva G12, segundo estudos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2006), avaliou-se do desempenho de tração na FTC na qual demonstrou-se que a locomotiva G12 não consegue tracionar 21 vagões e a experiência na operação da FTC limita a operação em 19 vagões por locomotiva. Dessa forma considerou-se como restrição o tracionamento de 19 vagões por locomotiva.

Cenário Futuro 2: Substituição dos modelos de locomotivas existentes pelo modelo Dash-9. Optou-se por esse modelo de locomotiva no cenário 2 por ser uma das mais representativas da frota de locomotivas utilizadas no transporte de minérios no Brasil, com destaque nas operações em bitola métrica. As especificações do modelo Dash-9 são apresentadas a seguir:

- Comprimento: 23,08 metros
- Peso bruto: 175,24 toneladas
- Velocidade mínima contínua: 21 km/h
- Potência: 3.990 HP

Com relação à curva de consumo da locomotiva Dash-9, adotou-se os valores apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Curva de consumo de combustível da locomotiva Dash-9

Ponto	Consumo de combustível (l/h)
1	43,5
2	101,1
3	205,9
4	295,8
5	411,9
6	527,3
7	638,3
8	786,5
Ponto Morto	15,9

Fonte: PEREIRA (2009).

Neste cenário foram consideradas todas as operações com trens diretos até o terminal de Capivari.

5.2.2 Etapa 2.A.2 – Simulação

As simulações foram realizadas de acordo com cada cenário proposto na Etapa 2.A.1.

5.2.2.1 Cenário Futuro 1

No cenário futuro 1 foram realizadas as simulações adotando o modelo de locomotiva G12, por ser o modelo mais representativo de locomotivas, que corresponde a 82% da frota da FTC. Foram adotados os procedimentos do fluxograma de simulação da Figura 31. Dessa forma, foram adotadas as seguintes premissas:

- $QL_i = 1$ locomotiva;
- $QV_i = 5$ vagões;

- QLMáx = 1 locomotiva (Novo Horizonte e Rio Fiorita);
- QLMáx = 2 locomotivas (Urussanga e Sangão).

Ainda, foram adotadas as seguintes restrições:

- Comprimento útil dos desvios ferroviários;
- Velocidade mínima contínua das locomotivas.
- Tração das locomotivas;

Para o fluxo entre Urussanga e Capivari, as simulações com uma locomotiva foram realizadas considerando 5, 10 e 15 vagões que atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 20 vagões o critério de tração das locomotivas não foi atendido. Segundo estudos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2006) realizados para a avaliação do desempenho de tração na FTC demonstram que a locomotiva G12 não consegue tracionar 21 vagões e a experiência na operação da FTC limita a operação em 19 vagões por locomotiva. Dessa forma, para uma locomotiva limitou-se a tração em 19 vagões.

Em sequência foi calculada a quantidade de simulações para refinar os resultados, conforme apresentado a seguir:

$$QS = 5 + 0,05 \times QV$$

$$QS = 5 + 0,05 \times 20$$

$$QS = 6 \text{ simulações}$$

Considerando o valor calculado, foram realizadas simulações com 19, 18, 17, 16, 15 e 14 vagões. Em cada uma dessas simulações analisou-se se o trem-tipo simulado atende às restrições.

Depois foram realizadas simulações com duas locomotivas para o mesmo fluxo. Assim como nos trens-tipo com apenas uma locomotiva, as composições com 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 vagões atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 40 vagões o critério de tração das locomotivas não foi atendido, haja vista que limitou-se a tração em 19 vagões para cada locomotiva.

Em sequência foi calculada a quantidade de simulações para refinar os resultados, conforme apresentado a seguir:

$$QS = 5 + 0,05 \times QV$$

$$QS = 5 + 0,05 \times 40$$

$$QS = 7 \text{ simulações}$$

Considerando o valor calculado, foram realizadas simulações com 39, 38, 37, 36, 35, 34 e 33 vagões. Em cada uma dessas simulações analisou-se se o trem-tipo simulado atende às restrições. O resultado das simulações para o fluxo entre Urussanga e Capivari, referente ao cenário Futuro 1, é apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados da simulação Urussanga-Capivari para o Cenário Futuro 1

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	92	02:21:24	01:50:00	23,32	16,70	Sim
1L+10V	600	167	02:21:10	01:50:10	29,47	18,48	Sim
1L+14V	840	227	02:21:24	01:50:14	34,78	20,14	Sim
1L+15V	900	242	02:21:26	01:50:16	36,01	20,53	Sim
1L+16V	960	257	02:21:36	01:50:13	36,98	20,97	Sim
1L+17V	1.020	272	02:21:36	01:50:15	38,23	21,37	Sim
1L+18V	1.080	287	02:21:36	01:50:20	39,68	21,92	Sim
1L+19V	1.140	302	02:21:40	01:50:24	40,86	22,40	Sim
1L+20V	1.200	317	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	109	02:21:56	01:50:13	42,19	34,80	Sim
2L+10V	600	184	02:21:42	01:50:13	46,38	33,18	Sim
2L+15V	900	259	02:21:32	01:50:24	51,66	34,87	Sim
2L+20V	1.200	334	02:21:33	01:50:36	57,46	36,67	Sim
2L+25V	1.500	409	02:22:01	01:50:41	63,16	38,47	Sim
2L+30V	1.800	484	02:22:17	01:50:49	68,53	40,36	Sim
2L+33V	1.980	529	02:22:21	01:50:51	71,77	41,40	Sim
2L+34V	2.040	544	02:22:25	01:50:57	72,74	41,83	Sim
2L+35V	2.100	559	02:22:33	01:51:00	73,83	42,26	Sim
2L+36V	2.160	574	02:22:35	01:51:00	75,11	42,67	Sim
2L+37V	2.220	589	02:22:36	01:51:02	76,35	43,18	Sim
2L+38V	2.280	604	02:22:41	01:51:04	77,07	43,62	Sim
2L+39V	2.340	619	-	-	-	-	Não*
2L+40V	2.400	634	-	-	-	-	Não*

* Quantidade de vagões maior que a capacidade de tracionamento da locomotiva, que é de 19 vagões por locomotiva.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Referente ao fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, as simulações com uma locomotiva foram realizadas considerando 5, 10 e 15 vagões que atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 20 vagões o critério de tração das locomotivas não foi atendido, haja vista que limitou-se a tração em 19 vagões para cada locomotiva.

Em sequência foi calculada a quantidade de simulações para refinar os resultados, conforme apresentado a seguir:

$$QS = 5 + 0,05 \times QV$$

$$QS = 5 + 0,05 \times 20$$

$$QS = 6 \text{ simulações}$$

Considerando o valor calculado, foram realizadas simulações com 19, 18, 17, 16, 15 e 14 vagões. Em cada uma dessas simulações analisou-se se o trem-tipo simulado atende às restrições.

O resultado das simulações para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, para o cenário Futuro 1, é apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados da simulação Novo Horizonte-Capivari para o Cenário Futuro 1

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	92	01:58:49	01:29:24	19,14	13,69	Sim
1L+10V	600	167	01:58:44	01:29:13	23,37	15,61	Sim
1L+14V	840	227	01:58:55	01:29:19	27,23	17,37	Sim
1L+15V	900	242	01:58:57	01:29:21	28,23	17,77	Sim
1L+16V	960	257	01:58:59	01:29:26	29,13	18,27	Sim
1L+17V	1.020	272	01:59:02	01:29:24	30,12	18,67	Sim
1L+18V	1.080	287	01:59:04	01:29:27	31,32	19,29	Sim
1L+19V	1.140	302	01:59:09	01:29:30	32,14	19,76	Sim
1L+20V	1.200	317	-	-	-	-	Não*

* Quantidade de vagões maior que a capacidade de tracionamento da locomotiva, que é de 19 vagões por locomotiva.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o fluxo entre Sangão e Capivari foram realizadas simulações para trens simples e trens duplos, sem realizar o acoplamento para a formação de trens maiores no pátio Paz Ferreira.

O resultado das simulações para o fluxo entre Sangão e Capivari, para o cenário Futuro 1, é apresentado na Tabela 24.

Tabela 24 - Resultados da simulação Sangão-Capivari para o Cenário Futuro 1

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	92	02:26:09	01:50:37	23,35	16,79	Sim
1L+10V	600	167	02:25:53	01:50:37	28,48	18,71	Sim
1L+14V	840	227	02:26:05	01:50:44	33,24	20,52	Sim
1L+15V	900	242	02:26:08	01:50:47	34,41	20,94	Sim
1L+16V	960	257	02:26:11	01:50:46	35,71	21,46	Sim
1L+17V	1.020	272	02:26:13	01:50:44	36,94	21,90	Sim
1L+18V	1.080	287	02:26:12	01:50:50	38,19	22,50	Sim
1L+19V	1.140	302	02:26:17	01:50:50	39,35	23,00	Sim
1L+20V	1.200	317	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	109	02:26:34	01:50:49	42,54	32,19	Sim
2L+10V	600	184	02:26:19	01:50:51	46,51	33,39	Sim
2L+15V	900	259	02:26:12	01:50:54	51,27	34,96	Sim
2L+20V	1.200	334	02:26:14	01:51:04	56,12	36,87	Sim
2L+25V	1.500	409	02:26:46	01:51:11	61,14	38,98	Sim
2L+30V	1.800	484	02:26:56	01:51:20	66,38	41,17	Sim
2L+33V	1.980	529	02:27:01	01:51:21	69,72	42,52	Sim
2L+34V	2.040	544	02:27:04	01:51:27	70,57	42,90	Sim
2L+35V	2.100	559	02:27:06	01:51:27	71,64	43,44	Sim
2L+36V	2.160	574	02:27:06	01:51:34	72,56	43,85	Sim
2L+37V	2.220	589	02:27:10	01:51:32	73,76	44,43	Sim
2L+38V	2.280	604	02:27:14	01:51:35	74,52	45,02	Sim
2L+39V	2.340	619	-	-	-	-	Não*
2L+40V	2.400	634	-	-	-	-	Não*

* Quantidade de vagões maior que a capacidade de tracionamento da locomotiva, que é de 19 vagões por locomotiva.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari foram realizadas simulações considerando apenas trens simples, sem realizar o acoplamento para a formação de trens maiores no pátio Paz Ferreira.

O resultado das simulações para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari, para o cenário Futuro 1, é apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Resultados da simulação Rio Fiorita-Capivari para o Cenário Futuro 1

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	92	02:49:35	02:09:35	29,58	20,84	Sim
1L+10V	600	167	02:49:40	02:09:33	38,26	24,87	Sim
1L+14V	840	227	02:49:59	02:09:37	45,66	29,35	Sim
1L+15V	900	242	02:50:01	02:09:38	47,57	30,43	Sim
1L+16V	960	257	02:50:03	02:09:35	49,61	31,60	Sim
1L+17V	1.020	272	02:50:09	02:09:37	51,49	32,70	Sim
1L+18V	1.080	287	02:50:10	02:09:42	53,37	33,99	Sim
1L+19V	1.140	302	02:50:14	02:09:39	55,39	35,21	Sim
1L+20V	1.200	317	-	-	-	-	Não*

* Quantidade de vagões maior que a capacidade de tracionamento da locomotiva, que é de 19 vagões por locomotiva.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2.2.2 Cenário Futuro 2

No Cenário Futuro 2 foram simulados trens-tipo utilizando locomotivas do modelo Dash-9 e seguindo os procedimentos do fluxograma de simulação da Figura 31. Dessa forma, foram adotadas as seguintes premissas:

- $QL_i = 1$ locomotiva;
- $QV_i = 5$ vagões;
- $QL_{Máx} = 2$ locomotivas;

Ainda, foram adotadas as seguintes restrições:

- Comprimento útil dos desvios ferroviários;
- Velocidade mínima contínua das locomotivas.
- Tração das locomotivas;

Para o fluxo entre Urussanga e Capivari, as simulações com uma locomotiva foram realizadas considerando 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 vagões que atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 40 vagões o critério de comprimento útil do terminal

ferroviário de Urussanga não foi atendido, haja vista que o comprimento do trem-tipo é de 623m e o comprimento útil do terminal de Urussanga é de 619m.

Em sequência foi calculada a quantidade de simulações para refinar os resultados, conforme apresentado a seguir:

$$QS = 5 + 0,05 \times QV$$

$$QS = 5 + 0,05 \times 40$$

$$QS = 7 \text{ simulações}$$

Considerando o valor calculado, foram realizadas simulações com 39, 38, 37, 36, 35, 34 e 33 vagões. Em cada uma dessas simulações analisou-se se o trem-tipo simulado atende às restrições.

Depois foram realizadas simulações com duas locomotivas para o mesmo fluxo. Assim como nos trens-tipo com apenas uma locomotiva, as composições com 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 vagões atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 40 vagões o critério de comprimento útil do terminal ferroviário de Urussanga não foi atendido, haja vista que o comprimento do trem-tipo é de 623m e o comprimento útil do terminal de Urussanga é de 619m.

O cálculo para a definição do QS também resultou em 7 simulações. Dessa forma, foram realizadas simulações com 39, 38, 37, 36, 35, 34 e 33 vagões.

O resultado das simulações para o fluxo entre Urussanga e Capivari, para o cenário Futuro 2, é apresentado na Tabela 26.

Tabela 26 - Resultados da simulação Urussanga-Capivari para o Cenário Futuro 2

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	98	02:21:25	01:50:01	52,31	44,21	Sim
1L+10V	600	173	02:21:17	01:50:05	65,11	49,23	Sim
1L+15V	900	248	02:21:33	01:50:17	79,02	55,20	Sim
1L+20V	1.200	323	02:21:43	01:50:16	94,60	61,55	Sim
1L+25V	1.500	398	02:22:32	01:50:29	109,32	68,05	Sim
1L+30V	1.800	473	02:23:00	01:50:38	125,99	74,69	Sim
1L+33V	1.980	518	02:23:17	01:50:44	136,01	78,91	Sim
1L+34V	2.040	533	02:23:21	01:50:43	139,80	80,35	Sim
1L+35V	2.100	548	02:23:35	01:50:48	144,69	81,70	Sim

Tabela 26 - Resultados da simulação Urussanga-Capivari para o Cenário Futuro 2 (continuação)

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+36V	2.160	563	02:23:46	01:50:49	147,99	83,14	Sim
1L+37V	2.220	578	02:23:50	01:50:49	151,34	84,76	Sim
1L+38V	2.280	593	02:24:01	01:50:53	153,87	86,31	Sim
1L+39V	2.340	608	02:24:13	01:50:56	157,47	87,68	Sim
1L+40V	2.400	623	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	121	01:50:01	01:50:04	94,86	82,84	Sim
2L+10V	600	196	01:50:05	01:50:17	103,48	87,26	Sim
2L+15V	900	271	01:50:17	01:50:23	113,54	92,09	Sim
2L+20V	1.200	346	01:50:16	01:50:31	125,55	96,87	Sim
2L+25V	1.500	421	01:50:29	01:50:42	137,21	101,81	Sim
2L+30V	1.800	496	01:50:38	01:50:54	148,94	107,37	Sim
2L+33V	1.980	541	01:50:44	01:51:01	156,14	110,67	Sim
2L+34V	2.040	556	01:50:43	01:51:00	159,13	111,78	Sim
2L+35V	2.100	571	01:50:48	01:51:05	161,41	113,15	Sim
2L+36V	2.160	586	01:50:49	01:51:08	163,79	114,22	Sim
2L+37V	2.220	601	01:50:49	01:51:07	166,18	115,23	Sim
2L+38V	2.280	616	-	-	-	-	Não*
2L+39V	2.340	631	-	-	-	-	Não*
2L+40V	2.400	646	-	-	-	-	Não*

* Trem-tipo maior que o comprimento útil da linha de carregamento do terminal de Urussanga, que é de 619m.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Referente ao fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, as simulações com uma locomotiva foram realizadas considerando 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 vagões que atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 40 vagões o critério de comprimento útil do terminal de origem não foi atendido, haja vista que o comprimento do trem-tipo é de 623m e o comprimento útil do terminal ferroviário de Novo Horizonte é de 600m.

Em sequência foi calculada a quantidade de simulações para refinar os resultados, conforme apresentado a seguir:

$$QS = 5 + 0,05 \times QV$$

$$QS = 5 + 0,05 \times 40$$

$$QS = 7 \text{ simulações}$$

Considerando o valor calculado, foram realizadas simulações com 39, 38, 37, 36, 35, 34 e 33 vagões. Em cada uma dessas simulações analisou-se se o trem-tipo simulado atende às restrições.

Depois foram realizadas simulações com duas locomotivas para o mesmo fluxo. Assim como nos trens-tipo com apenas uma locomotiva, as composições com 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 35 vagões atenderam às restrições. Ao realizar a simulação com uma locomotiva e 40 vagões o critério de comprimento útil do terminal de origem não foi atendido, haja vista que o comprimento do trem-tipo é de 646m e o comprimento útil do terminal ferroviário de Novo Horizonte é de 600m.

O cálculo para a definição do QS também resultou em 7 simulações. Dessa forma, foram realizadas simulações com 39, 38, 37, 36, 35, 34 e 33 vagões.

O resultado das simulações para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, para o cenário Futuro 2, é apresentado na Tabela 27.

Tabela 27 - Resultados da simulação Novo Horizonte-Capivari para o Cenário Futuro 2

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	98	01:58:42	01:29:00	44,10	37,21	Sim
1L+10V	600	173	01:58:52	01:29:12	53,84	42,23	Sim
1L+15V	900	248	01:58:56	01:29:25	65,50	48,60	Sim
1L+20V	1.200	323	01:59:06	01:29:26	77,72	55,29	Sim
1L+25V	1.500	398	02:00:00	01:29:38	89,54	62,28	Sim
1L+30V	1.800	473	02:00:24	01:29:50	103,33	69,20	Sim
1L+33V	1.980	518	02:00:49	01:29:55	112,68	73,56	Sim
1L+34V	2.040	533	02:00:55	01:29:56	116,09	75,11	Sim
1L+35V	2.100	548	02:01:09	01:30:00	120,33	76,49	Sim
1L+36V	2.160	563	02:01:23	01:30:02	125,22	78,00	Sim
1L+37V	2.220	578	02:01:32	01:30:02	129,03	79,54	Sim
1L+38V	2.280	593	02:01:40	01:30:06	131,54	80,89	Sim
1L+39V	2.340	608	-	-	-	-	Não*
1L+40V	2.400	623	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	121	01:59:05	01:29:08	80,29	68,74	Sim
2L+10V	600	196	01:58:52	01:29:12	87,55	73,18	Sim
2L+15V	900	271	01:58:57	01:29:26	95,59	78,18	Sim
2L+20V	1.200	346	01:59:14	01:29:38	105,77	83,03	Sim
2L+25V	1.500	421	01:59:37	01:29:45	115,81	88,59	Sim

Tabela 27 - Resultados da simulação Novo Horizonte-Capivari para o Cenário Futuro 2 (continuação)

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
2L+30V	1.800	496	01:59:49	01:29:58	124,28	94,46	Sim
2L+33V	1.980	541	01:59:54	01:30:03	125,71	97,78	Sim
2L+34V	2.040	556	01:59:59	01:30:09	131,55	99,21	Sim
2L+35V	2.100	571	02:00:02	01:30:11	134,03	100,54	Sim
2L+36V	2.160	586	02:00:04	01:30:14	136,25	101,83	Sim
2L+37V	2.220	601	-	-	-	-	Não*
2L+38V	2.280	616	-	-	-	-	Não*
2L+39V	2.340	631	-	-	-	-	Não*
2L+40V	2.400	646	-	-	-	-	Não*

* Trem-tipo maior que o comprimento útil da linha de carregamento do terminal de Novo Horizonte, que é de 600m.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o fluxo entre Sangão e Capivari, o fator limitante observado nas simulações se refere ao comprimento útil do desvio ferroviário de Esplanada, assim como no fluxo entre Urussanga e Capivari. Dessa forma, foram simulados os mesmos trens-tipo que do fluxo entre Urussanga e Capivari.

O resultado das simulações para o fluxo entre Sangão e Capivari, para o cenário Futuro 2, é apresentado na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados da simulação Sangão-Capivari para o Cenário Futuro 2

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	98	02:49:22	01:50:28	65,80	44,42	Sim
1L+10V	600	173	02:49:54	01:50:33	85,78	49,52	Sim
1L+15V	900	248	02:50:03	01:50:43	109,14	55,96	Sim
1L+20V	1.200	323	02:50:12	01:50:46	134,36	62,91	Sim
1L+25V	1.500	398	02:52:12	01:50:58	161,34	70,04	Sim
1L+30V	1.800	473	02:51:48	01:51:12	189,35	77,22	Sim
1L+35V	2.100	548	02:54:10	01:51:20	222,45	84,65	Sim
1L+40V	2.400	623	02:54:11	01:51:31	252,70	92,44	Sim
1L+42V	2.520	653	02:54:45	01:51:37	260,15	95,37	Sim
1L+43V	2.580	668	02:54:52	01:51:38	264,99	96,93	Sim

Tabela 28 - Resultados da simulação Sangão-Capivari para o Cenário Futuro 2 (continuação)

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+44V	2.640	683	02:54:38	01:51:39	270,99	98,64	Sim
1L+45V	2.700	698	02:54:39	01:51:45	276,06	100,07	Sim
1L+46V	2.760	713	02:54:55	01:51:44	281,82	101,69	Sim
1L+47V	2.820	728	02:55:21	01:51:45	287,19	103,07	Sim
1L+48V	2.880	743	02:55:47	01:51:47	293,34	104,63	Sim
1L+49V	2.940	758	-	-	-	-	Não*
1L+50V	3.000	773	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	121	02:26:21	01:50:40	99,95	83,12	Sim
2L+10V	600	196	02:26:06	01:50:44	108,76	87,45	Sim
2L+15V	900	271	02:26:09	01:50:52	118,84	92,40	Sim
2L+20V	1.200	346	02:26:23	01:50:58	131,41	97,36	Sim
2L+25V	1.500	421	02:26:46	01:51:10	143,68	102,84	Sim
2L+30V	1.800	496	02:26:58	01:51:20	156,06	108,67	Sim
2L+35V	2.100	571	02:27:10	01:51:32	168,56	115,06	Sim
2L+40V	2.400	646	02:27:22	01:51:36	181,31	121,40	Sim
2L+42V	2.520	676	02:27:27	01:51:40	186,82	123,91	Sim
2L+43V	2.580	691	02:27:30	01:51:42	189,18	125,24	Sim
2L+44V	2.640	706	02:27:35	01:51:46	191,90	126,25	Sim
2L+45V	2.700	721	02:27:37	01:51:46	195,50	127,72	Sim
2L+46V	2.760	736	02:27:43	01:51:49	197,17	128,69	Sim
2L+47V	2.820	751	-	-	-	-	Não*
2L+48V	2.880	766	-	-	-	-	Não*
2L+49V	2.940	781	-	-	-	-	Não*
2L+50V	3.000	796	-	-	-	-	Não*

* Trem-tipo maior que o comprimento útil do desvio do pátio Esplanada, que é de 750m.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Assim como no fluxo entre Urussanga e Capivari e, também, no fluxo entre Sangão e Capivari, é observado como fator limitante das simulações o comprimento útil do desvio ferroviário de Esplanada para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari. Dessa forma, foram simulados os mesmos trens-tipo que do fluxo entre Urussanga e Capivari e, também, do fluxo entre Sangão e Capivari.

O resultado das simulações para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari, para o cenário Futuro 2, é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados da simulação Rio Fiorita-Capivari para o Cenário Futuro 2

Trem-tipo	TU/Trem	Comprimento (m)	Tempo de percurso (hh:mm:ss)		Consumo de combustível (l)		Atende às restrições?
			Ida	Volta	Ida	Volta	
1L+5V	300	98	02:49:22	02:09:24	65,80	59,24	Sim
1L+10V	600	173	02:49:54	02:09:23	85,78	70,73	Sim
1L+15V	900	248	02:50:03	02:09:35	109,14	84,42	Sim
1L+20V	1.200	323	02:50:12	02:09:36	134,36	100,88	Sim
1L+25V	1.500	398	02:52:12	02:09:47	161,34	118,29	Sim
1L+30V	1.800	473	02:51:48	02:09:58	189,35	135,53	Sim
1L+35V	2.100	548	02:54:10	02:10:06	222,45	152,79	Sim
1L+40V	2.400	623	02:54:11	02:10:18	252,70	171,22	Sim
1L+42V	2.520	653	02:54:45	02:10:21	260,15	178,44	Sim
1L+43V	2.580	668	02:54:52	02:10:24	264,99	182,11	Sim
1L+44V	2.640	683	02:54:38	02:10:26	270,99	186,21	Sim
1L+45V	2.700	698	02:54:39	02:10:30	276,06	189,84	Sim
1L+46V	2.760	713	02:54:55	02:10:31	281,82	193,94	Sim
1L+47V	2.820	728	02:55:21	02:10:32	287,19	197,71	Sim
1L+48V	2.880	743	02:55:47	02:10:34	293,34	201,57	Sim
1L+49V	2.940	758	-	-	-	-	Não*
1L+50V	3.000	773	-	-	-	-	Não*
2L+5V	300	121	02:49:50	02:09:33	116,26	107,27	Sim
2L+10V	600	196	02:49:37	02:09:40	130,09	116,77	Sim
2L+15V	900	271	02:49:40	02:09:42	145,39	127,95	Sim
2L+20V	1.200	346	02:50:17	02:09:53	166,34	138,92	Sim
2L+25V	1.500	421	02:50:56	02:09:56	185,88	150,78	Sim
2L+30V	1.800	496	02:51:14	02:10:11	205,67	163,86	Sim
2L+35V	2.100	571	02:51:29	02:10:23	227,00	178,41	Sim
2L+40V	2.400	646	02:51:39	02:10:25	247,49	194,29	Sim
2L+42V	2.520	676	02:51:45	02:10:29	255,77	200,61	Sim
2L+43V	2.580	691	02:51:51	02:10:28	259,26	203,89	Sim
2L+44V	2.640	706	02:51:54	02:10:33	262,97	206,89	Sim
2L+45V	2.700	721	02:51:55	02:10:37	268,64	210,18	Sim
2L+46V	2.760	736	02:51:57	02:10:40	272,32	213,04	Sim
2L+47V	2.820	751	-	-	-	-	Não*
2L+48V	2.880	766	-	-	-	-	Não*
2L+49V	2.940	781	-	-	-	-	Não*
2L+50V	3.000	796	-	-	-	-	Não*

* Trem-tipo maior que o comprimento útil do desvio do pátio Esplanada, que é de 750m.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.3 FASE 2.B - ATRIBUTOS

Nessa fase foi realizada a definição dos atributos (Etapa 2.B.1) e do respectivo peso dos atributos (Etapa 2.B.2).

5.3.1 Etapa 2.B.1 - Definição dos Atributos

De forma a definir os atributos a serem utilizados nesta aplicação do método, realizaram-se entrevistas com três especialistas da área, os quais atuam como Gerente de Transportes da FTC, Diretor de Operações da FTC e Gerente de Estudos e Projetos de Obras Ferroviárias da Secretaria de Estado da Infraestrutura e Mobilidade (SIE) de Santa Catarina.

Na Tabela 30 é apresentada a relação de atributos escolhidos.

Tabela 30 – Atributos definidos para o presente estudo

Grupo de atributos	Atributos
Tempo	Tempo de ciclo
Eficiência energética	Consumo de combustível
Capacidade	Capacidade de transporte

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O tempo de ciclo foi elencado como atributo relevante na definição do trem-tipo por estar relacionado com a quantidade de material rodante e mão-de-obra necessária à operação, além do fato de tempos de ciclos menores reduzirem a influência de fatores climáticos na carga transportada.

Quanto ao consumo de combustível entende-se como relevante por corresponder a aproximadamente 30% dos custos operacionais da FTC, além de estar relacionado com a emissão de gases poluentes.

A capacidade de transporte dos trens, assim como o tempo de ciclo se relaciona com a quantidade de material rodante e mão-de-obra necessária à operação.

5.3.2 Etapa 2.B.2 - Definição de Peso dos Atributos

A definição dos pesos dos atributos foi feita com a utilização da técnica *Swing Weighting*. Essa técnica consiste em considerar, inicialmente, uma situação hipotética na qual é definida a alternativa que possui a menor pontuação, de acordo com o decisor, de todos os

critérios envolvidos no processo de decisão, essa situação é denominada de *benchmark*. Depois, o decisor atribui 100 pontos ao atributo que ele considera o melhor, dentre os que compõe o conjunto, e esse atributo é então eliminado do processo (GOMES e GOMES, 2019).

Em sequência, o decisor consulta os atributos restantes e escolhe aquele que gostaria de elevar e atribui a ele um valor inferior a 100 pontos, sendo então o atributo eliminado do processo. Deve ser continuado o processo sucessivamente até todos os atributos serem avaliados (GOMES e GOMES, 2019). Por fim, o peso de cada atributo é calculado a partir da divisão da pontuação obtida pelo atributo correspondente pelo total de pontos de todos os atributos avaliados (GOMES et al, 2011).

Para ilustrar o processo, na Tabela 31, é apresentada uma decisão hipotética envolvendo dois atributos. Nesse caso o pior cenário é representado pelo *benchmark*, o melhor cenário considerado em relação ao *benchmark* é representado pelo atributo 1 e uma alternativa hipotética superior ao *benchmark* é representado pelo atributo 2.

Tabela 31 – Ilustração da aplicação da técnica *Swing Weighting*

Atributos	Ranking	Nota	Peso
<i>Benchmark</i>	3	0	-
Atributo 1	1	100	0,58823
Atributo 2	2	70	0,41176

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No presente estudo, considerou-se o Gerente de Transportes da FTC como decisor. Dessa forma, a partir das reuniões realizadas foram definidos os pesos dos atributos, conforme apresentado na Tabela 32.

Tabela 32 – Notas e pesos dos atributos

Atributos	Ranking	Nota	Peso
<i>Benchmark</i>	4	0	-
Tempo de ciclo	1	100	0,4761
Consumo de combustível	2	60	0,2857
Capacidade de transporte	3	50	0,2380

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4 FASE 3 - ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Nessa fase foi realizado o cálculo dos atributos (Etapa 3.1), aplicada a Teoria da Utilidade Multiatributo (Etapa 3.2), análise dos resultados (Etapa 3.3) e definição do trem-tipo (Etapa 3.4).

5.4.1 Etapa 3.1 - Cálculo dos Atributos

Para cada atributo definido na etapa 2.B.1 é apresentada a seguir a formulação adotada. Os cálculos utilizam os resultados das simulações realizadas na etapa 2.A.2.

5.4.1.1 Tempo de Ciclo

O tempo de ciclo, definido na seção 2.1.7 como tempo gasto entre dois carregamentos sucessivos e, portanto, nesta etapa realizou-se o somatório de tempos consumidos entre dois carregamentos sucessivos. Os tempos de percurso considerados foram obtidos na Etapa 2.A.2 – Simulação, e os demais tempos foram coletados na Etapa 1.2 – Dados de Entrada.

$$TC = t_c + t_{li} + t_{pi} + t_d + t_{lv} + t_{pv} + t_{po}$$

Em que:

- TC = tempo de ciclo
- t_c = tempo de carregamento
- t_{li} = tempo de licenciamento na ida
- t_{pi} = tempo de percurso na ida
- t_d = tempo de descarregamento
- t_{lv} = tempo de licenciamento na volta
- t_{pv} = tempo de percurso na volta
- t_{po} = tempo de posicionamento dos vagões

Na Tabela 33 são apresentados os tempos de ciclo obtidos para o fluxo entre Urussanga e Capivari.

Tabela 33 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Urussanga e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Base	2L+38V	07:31:45	Futuro 2	1L+5V	07:29:26
Futuro 1	1L+5V	07:29:24	Futuro 2	1L+10V	07:29:22
Futuro 1	1L+10V	07:29:20	Futuro 2	1L+15V	07:29:50
Futuro 1	1L+14V	07:29:38	Futuro 2	1L+20V	07:29:59
Futuro 1	1L+15V	07:29:42	Futuro 2	1L+25V	07:31:01
Futuro 1	1L+16V	07:29:49	Futuro 2	1L+30V	07:31:38
Futuro 1	1L+17V	07:29:51	Futuro 2	1L+33V	07:32:01
Futuro 1	1L+18V	07:29:56	Futuro 2	1L+34V	07:32:04
Futuro 1	1L+19V	07:30:04	Futuro 2	1L+35V	07:32:23
Futuro 1	2L+5V	07:30:09	Futuro 2	1L+36V	07:32:35
Futuro 1	2L+10V	07:29:55	Futuro 2	1L+37V	07:32:39
Futuro 1	2L+15V	07:29:56	Futuro 2	1L+38V	07:32:54
Futuro 1	2L+20V	07:30:09	Futuro 2	1L+39V	07:33:09
Futuro 1	2L+25V	07:30:42	Futuro 2	2L+5V	07:29:46
Futuro 1	2L+30V	07:31:06	Futuro 2	2L+10V	07:29:51
Futuro 1	2L+33V	07:31:12	Futuro 2	2L+15V	07:29:53
Futuro 1	2L+34V	07:31:22	Futuro 2	2L+20V	07:30:09
Futuro 1	2L+35V	07:31:33	Futuro 2	2L+25V	07:30:51
Futuro 1	2L+36V	07:31:35	Futuro 2	2L+30V	07:31:12
Futuro 1	2L+37V	07:31:38	Futuro 2	2L+33V	07:31:30
Futuro 1	2L+38V	07:31:45	Futuro 2	2L+34V	07:31:33
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	07:31:40
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	07:31:48
-	-	-	Futuro 2	2L+37V	07:31:48

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 34 são apresentados os tempos de ciclo obtidos para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari.

Tabela 34 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Base	1L+19V	06:46:39	Futuro 2	1L+5V	06:45:42
Futuro 1	1L+5V	06:46:13	Futuro 2	1L+10V	06:46:04
Futuro 1	1L+10V	06:45:57	Futuro 2	1L+15V	06:46:21
Futuro 1	1L+14V	06:46:14	Futuro 2	1L+20V	06:46:32

Tabela 34 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Futuro 1	1L+15V	06:46:18	Futuro 2	1L+25V	06:47:38
Futuro 1	1L+16V	06:46:25	Futuro 2	1L+30V	06:48:14
Futuro 1	1L+17V	06:46:26	Futuro 2	1L+33V	06:48:44
Futuro 1	1L+18V	06:46:31	Futuro 2	1L+34V	06:48:51
Futuro 1	1L+19V	06:46:39	Futuro 2	1L+35V	06:49:09
-	-	-	Futuro 2	1L+36V	06:49:25
-	-	-	Futuro 2	1L+37V	06:49:34
-	-	-	Futuro 2	1L+38V	06:49:46
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	06:46:13
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	06:46:04
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	06:46:23
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	06:46:52
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	06:47:22
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	06:47:47
-	-	-	Futuro 2	2L+33V	06:47:57
-	-	-	Futuro 2	2L+34V	06:48:08
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	06:48:13
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	06:48:18

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 35 são apresentados os tempos de ciclo obtidos para o fluxo entre Sangão e Capivari.

Tabela 35 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Sangão e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Base	1L+19V	09:00:25	Futuro 2	1L+5V	07:57:50
Futuro 1	1L+5V	07:34:46	Futuro 2	1L+10V	07:58:27
Futuro 1	1L+10V	07:34:30	Futuro 2	1L+15V	07:58:46
Futuro 1	1L+14V	07:34:49	Futuro 2	1L+20V	07:58:58
Futuro 1	1L+15V	07:34:55	Futuro 2	1L+25V	08:01:10
Futuro 1	1L+16V	07:34:57	Futuro 2	1L+30V	08:01:00
Futuro 1	1L+17V	07:34:57	Futuro 2	1L+35V	08:03:30
Futuro 1	1L+18V	07:35:02	Futuro 2	1L+40V	08:03:42
Futuro 1	1L+19V	07:35:07	Futuro 2	1L+42V	08:04:22
Futuro 1	2L+5V	07:35:23	Futuro 2	1L+43V	08:04:30
Futuro 1	2L+10V	07:35:10	Futuro 2	1L+44V	08:04:17

Tabela 35 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Sangão e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Futuro 1	2L+15V	07:35:06	Futuro 2	1L+45V	08:04:24
Futuro 1	2L+20V	07:35:18	Futuro 2	1L+46V	08:04:39
Futuro 1	2L+25V	07:35:57	Futuro 2	1L+47V	08:05:06
Futuro 1	2L+30V	07:36:16	Futuro 2	1L+48V	08:05:34
Futuro 1	2L+33V	07:36:22	Futuro 2	2L+5V	07:35:01
Futuro 1	2L+34V	07:36:31	Futuro 2	2L+10V	07:34:50
Futuro 1	2L+35V	07:36:33	Futuro 2	2L+15V	07:35:01
Futuro 1	2L+36V	07:36:40	Futuro 2	2L+20V	07:35:21
Futuro 1	2L+37V	07:36:42	Futuro 2	2L+25V	07:35:56
Futuro 1	2L+38V	07:36:49	Futuro 2	2L+30V	07:36:18
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	07:36:42
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	07:36:58
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	07:37:07
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	07:37:12
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	07:37:21
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	07:37:23
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	07:37:32

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 36 são apresentados os tempos de ciclo obtidos para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.

Tabela 36 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
Base	1L+5V	09:43:07	Futuro 2	1L+5V	08:16:46
Futuro 1	1L+5V	08:17:10	Futuro 2	1L+10V	08:17:17
Futuro 1	1L+10V	08:17:13	Futuro 2	1L+15V	08:17:38
Futuro 1	1L+14V	08:17:36	Futuro 2	1L+20V	08:17:48
Futuro 1	1L+15V	08:17:39	Futuro 2	1L+25V	08:19:59
Futuro 1	1L+16V	08:17:38	Futuro 2	1L+30V	08:19:46
Futuro 1	1L+17V	08:17:46	Futuro 2	1L+35V	08:22:16
Futuro 1	1L+18V	08:17:52	Futuro 2	1L+40V	08:22:29
Futuro 1	1L+19V	08:17:53	Futuro 2	1L+42V	08:23:06
-	-	-	Futuro 2	1L+43V	08:23:16
-	-	-	Futuro 2	1L+44V	08:23:04
-	-	-	Futuro 2	1L+45V	08:23:09

Tabela 36 – Tempos de ciclo para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)	Cenário	Trem-tipo	Tempo de ciclo (HH:MM:SS)
-	-	-	Futuro 2	1L+46V	08:23:26
-	-	-	Futuro 2	1L+47V	08:23:53
-	-	-	Futuro 2	1L+48V	08:24:21
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	08:17:14
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	08:17:00
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	08:17:15
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	08:17:53
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	08:18:43
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	08:19:12
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	08:19:35
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	08:19:57
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	08:20:06
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	08:20:15
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	08:20:20
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	08:20:25
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	08:20:28

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4.1.2 Consumo de Combustível

Nessa seção foi calculado o consumo de combustível por ciclo e por vagão, dessa forma somou-se o consumo de combustível de ida e de volta para cada trem-tipo a partir dos resultados obtidos na Etapa 2.A.2 – Simulação e dividiu-se pelo número de vagões da composição.

$$C_{ciclo,vagão} = \frac{C_{ida} + C_{volta}}{N_v}$$

Em que:

- $C_{ciclo,vagão}$ = consumo de combustível por ciclo por vagão, em litros por vagão
- C_{ida} = consumo de combustível na ida, em litros
- C_{volta} = consumo de combustível na volta, em litros
- N_v = número de vagões

Na Tabela 37 são apresentados os consumos de combustível obtidos para o fluxo entre Urussanga e Capivari.

Tabela 37 – Consumo de combustível para o fluxo entre Urussanga e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Base	2L+38V	3,18	Futuro 2	1L+5V	19,30
Futuro 1	1L+5V	8,00	Futuro 2	1L+10V	11,43
Futuro 1	1L+10V	4,80	Futuro 2	1L+15V	8,95
Futuro 1	1L+14V	3,92	Futuro 2	1L+20V	7,81
Futuro 1	1L+15V	3,77	Futuro 2	1L+25V	7,09
Futuro 1	1L+16V	3,62	Futuro 2	1L+30V	6,69
Futuro 1	1L+17V	3,51	Futuro 2	1L+33V	6,51
Futuro 1	1L+18V	3,42	Futuro 2	1L+34V	6,48
Futuro 1	1L+19V	3,33	Futuro 2	1L+35V	6,47
Futuro 1	2L+5V	15,40	Futuro 2	1L+36V	6,42
Futuro 1	2L+10V	7,96	Futuro 2	1L+37V	6,38
Futuro 1	2L+15V	5,77	Futuro 2	1L+38V	6,32
Futuro 1	2L+20V	4,71	Futuro 2	1L+39V	6,29
Futuro 1	2L+25V	4,07	Futuro 2	2L+5V	35,54
Futuro 1	2L+30V	3,63	Futuro 2	2L+10V	19,07
Futuro 1	2L+33V	3,43	Futuro 2	2L+15V	13,71
Futuro 1	2L+34V	3,37	Futuro 2	2L+20V	11,12
Futuro 1	2L+35V	3,32	Futuro 2	2L+25V	9,56
Futuro 1	2L+36V	3,27	Futuro 2	2L+30V	8,54
Futuro 1	2L+37V	3,23	Futuro 2	2L+33V	8,09
Futuro 1	2L+38V	3,18	Futuro 2	2L+34V	7,97
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	7,84
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	7,72
-	-	-	Futuro 2	2L+37V	7,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 38 são apresentados os consumos de combustível obtidos para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari.

Tabela 38 – Consumo de combustível para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Base	1L+19V	2,73	Futuro 2	1L+5V	16,26
Futuro 1	1L+5V	6,57	Futuro 2	1L+10V	9,61
Futuro 1	1L+10V	3,90	Futuro 2	1L+15V	7,61

Tabela 38 – Consumo de combustível para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Futuro 1	1L+14V	3,19	Futuro 2	1L+20V	6,65
Futuro 1	1L+15V	3,07	Futuro 2	1L+25V	6,07
Futuro 1	1L+16V	2,96	Futuro 2	1L+30V	5,75
Futuro 1	1L+17V	2,87	Futuro 2	1L+33V	5,64
Futuro 1	1L+18V	2,81	Futuro 2	1L+34V	5,62
Futuro 1	1L+19V	2,73	Futuro 2	1L+35V	5,62
-	-	-	Futuro 2	1L+36V	5,65
-	-	-	Futuro 2	1L+37V	5,64
-	-	-	Futuro 2	1L+38V	5,59
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	29,81
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	16,07
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	11,58
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	9,44
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	8,18
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	7,29
-	-	-	Futuro 2	2L+33V	6,77
-	-	-	Futuro 2	2L+34V	6,79
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	6,70
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	6,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 39 são apresentados os consumos de combustível obtidos para o fluxo entre Sangão e Capivari.

Tabela 39 – Consumo de combustível para o fluxo entre Sangão e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Base	1L+19V	3,36	Futuro 2	1L+5V	22,04
Futuro 1	1L+5V	8,03	Futuro 2	1L+10V	13,53
Futuro 1	1L+10V	4,72	Futuro 2	1L+15V	11,01
Futuro 1	1L+14V	3,84	Futuro 2	1L+20V	9,86
Futuro 1	1L+15V	3,69	Futuro 2	1L+25V	9,26
Futuro 1	1L+16V	3,57	Futuro 2	1L+30V	8,89
Futuro 1	1L+17V	3,46	Futuro 2	1L+35V	8,77
Futuro 1	1L+18V	3,37	Futuro 2	1L+40V	8,63
Futuro 1	1L+19V	3,28	Futuro 2	1L+42V	8,46
Futuro 1	2L+5V	14,95	Futuro 2	1L+43V	8,42

Tabela 39 – Consumo de combustível para o fluxo entre Sangão e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Futuro 1	2L+10V	7,99	Futuro 2	1L+44V	8,40
Futuro 1	2L+15V	5,75	Futuro 2	1L+45V	8,36
Futuro 1	2L+20V	4,65	Futuro 2	1L+46V	8,34
Futuro 1	2L+25V	4,00	Futuro 2	1L+47V	8,30
Futuro 1	2L+30V	3,59	Futuro 2	1L+48V	8,29
Futuro 1	2L+33V	3,40	Futuro 2	2L+5V	36,61
Futuro 1	2L+34V	3,34	Futuro 2	2L+10V	19,62
Futuro 1	2L+35V	3,29	Futuro 2	2L+15V	14,08
Futuro 1	2L+36V	3,23	Futuro 2	2L+20V	11,44
Futuro 1	2L+37V	3,19	Futuro 2	2L+25V	9,86
Futuro 1	2L+38V	3,15	Futuro 2	2L+30V	8,82
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	8,10
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	7,57
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	7,40
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	7,31
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	7,23
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	7,18
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	7,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 40 são apresentados os consumos de combustível obtidos para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.

Tabela 40 – Consumo de combustível para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
Base	1L+19V	4,86	Futuro 2	1L+5V	25,01
Futuro 1	1L+5V	10,08	Futuro 2	1L+10V	15,65
Futuro 1	1L+10V	6,31	Futuro 2	1L+15V	12,90
Futuro 1	1L+14V	5,36	Futuro 2	1L+20V	11,76
Futuro 1	1L+15V	5,20	Futuro 2	1L+25V	11,19
Futuro 1	1L+16V	5,08	Futuro 2	1L+30V	10,83
Futuro 1	1L+17V	4,95	Futuro 2	1L+35V	10,72
Futuro 1	1L+18V	4,85	Futuro 2	1L+40V	10,60
Futuro 1	1L+19V	4,77	Futuro 2	1L+42V	10,44
-	-	-	Futuro 2	1L+43V	10,40
-	-	-	Futuro 2	1L+44V	10,39

Tabela 40 – Consumo de combustível para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)	Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível (l/vagão)
-	-	-	Futuro 2	1L+45V	10,35
-	-	-	Futuro 2	1L+46V	10,34
-	-	-	Futuro 2	1L+47V	10,32
-	-	-	Futuro 2	1L+48V	10,31
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	44,71
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	24,69
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	18,22
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	15,26
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	13,47
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	12,32
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	11,58
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	11,04
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	10,87
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	10,77
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	10,68
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	10,64
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	10,55

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4.1.3 Capacidade de Transporte

A capacidade de transporte é definida neste estudo como a multiplicação do número de vagões de uma composição pela tonelada útil (TU) do vagão, ou seja, é a capacidade de carga de cada trem, conforme a formulação apresentada a seguir.

$$C_t = N_v \times TU_v$$

Em que:

- C_t = Capacidade de transporte, em tonelada útil por trem
- N_v = número de vagões
- TU_v = tonelada útil por vagão

Na Tabela 41 são apresentados os valores de capacidade de transporte obtidos para o fluxo entre Urussanga e Capivari.

Tabela 41 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Urussanga e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Base	2L+38V	2.280	Futuro 2	1L+5V	300
Futuro 1	1L+5V	300	Futuro 2	1L+10V	600
Futuro 1	1L+10V	600	Futuro 2	1L+15V	900
Futuro 1	1L+14V	840	Futuro 2	1L+20V	1.200
Futuro 1	1L+15V	900	Futuro 2	1L+25V	1.500
Futuro 1	1L+16V	960	Futuro 2	1L+30V	1.800
Futuro 1	1L+17V	1.020	Futuro 2	1L+33V	1.980
Futuro 1	1L+18V	1.080	Futuro 2	1L+34V	2.040
Futuro 1	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+35V	2.100
Futuro 1	2L+5V	300	Futuro 2	1L+36V	2.160
Futuro 1	2L+10V	600	Futuro 2	1L+37V	2.220
Futuro 1	2L+15V	900	Futuro 2	1L+38V	2.280
Futuro 1	2L+20V	1.200	Futuro 2	1L+39V	2.340
Futuro 1	2L+25V	1.500	Futuro 2	2L+5V	300
Futuro 1	2L+30V	1.800	Futuro 2	2L+10V	600
Futuro 1	2L+33V	1.980	Futuro 2	2L+15V	900
Futuro 1	2L+34V	2.040	Futuro 2	2L+20V	1.200
Futuro 1	2L+35V	2.100	Futuro 2	2L+25V	1.500
Futuro 1	2L+36V	2.160	Futuro 2	2L+30V	1.800
Futuro 1	2L+37V	2.220	Futuro 2	2L+33V	1.980
Futuro 1	2L+38V	2.280	Futuro 2	2L+34V	2.040
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	2.100
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	2.160
-	-	-	Futuro 2	2L+37V	2.220

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 42 são apresentados os valores de capacidade de transporte obtidos para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari.

Tabela 42 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Base	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+5V	300
Futuro 1	1L+5V	300	Futuro 2	1L+10V	600
Futuro 1	1L+10V	600	Futuro 2	1L+15V	900

Tabela 42 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Futuro 1	1L+14V	840	Futuro 2	1L+20V	1.200
Futuro 1	1L+15V	900	Futuro 2	1L+25V	1.500
Futuro 1	1L+16V	960	Futuro 2	1L+30V	1.800
Futuro 1	1L+17V	1.020	Futuro 2	1L+33V	1.980
Futuro 1	1L+18V	1.080	Futuro 2	1L+34V	2.040
Futuro 1	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+35V	2.100
-	-	-	Futuro 2	1L+36V	2.160
-	-	-	Futuro 2	1L+37V	2.220
-	-	-	Futuro 2	1L+38V	2.280
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	300
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	600
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	900
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	1.200
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	1.500
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	1.800
-	-	-	Futuro 2	2L+33V	1.980
-	-	-	Futuro 2	2L+34V	2.040
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	2.100
-	-	-	Futuro 2	2L+36V	2.160

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 43 são apresentados os valores de capacidade de transporte obtidos para o fluxo entre Sangão e Capivari.

Tabela 43 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Sangão e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Base	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+5V	300
Futuro 1	1L+5V	300	Futuro 2	1L+10V	600
Futuro 1	1L+10V	600	Futuro 2	1L+15V	900
Futuro 1	1L+14V	840	Futuro 2	1L+20V	1.200
Futuro 1	1L+15V	900	Futuro 2	1L+25V	1.500
Futuro 1	1L+16V	960	Futuro 2	1L+30V	1.800
Futuro 1	1L+17V	1.020	Futuro 2	1L+35V	2.100
Futuro 1	1L+18V	1.080	Futuro 2	1L+40V	2.400

Tabela 43 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Sangão e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Futuro 1	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+42V	2.520
Futuro 1	2L+5V	300	Futuro 2	1L+43V	2.580
Futuro 1	2L+10V	600	Futuro 2	1L+44V	2.640
Futuro 1	2L+15V	900	Futuro 2	1L+45V	2.700
Futuro 1	2L+20V	1.200	Futuro 2	1L+46V	2.760
Futuro 1	2L+25V	1.500	Futuro 2	1L+47V	2.820
Futuro 1	2L+30V	1.800	Futuro 2	1L+48V	2.880
Futuro 1	2L+33V	1.980	Futuro 2	2L+5V	300
Futuro 1	2L+34V	2.040	Futuro 2	2L+10V	600
Futuro 1	2L+35V	2.100	Futuro 2	2L+15V	900
Futuro 1	2L+36V	2.160	Futuro 2	2L+20V	1.200
Futuro 1	2L+37V	2.220	Futuro 2	2L+25V	1.500
Futuro 1	2L+38V	2.280	Futuro 2	2L+30V	1.800
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	2.100
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	2.400
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	2.520
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	2.580
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	2.640
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	2.700
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	2.760

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 44 são apresentados os valores de capacidade de transporte obtidos para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.

Tabela 44 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Base	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+5V	300
Futuro 1	1L+5V	300	Futuro 2	1L+10V	600
Futuro 1	1L+10V	600	Futuro 2	1L+15V	900
Futuro 1	1L+14V	840	Futuro 2	1L+20V	1.200
Futuro 1	1L+15V	900	Futuro 2	1L+25V	1.500
Futuro 1	1L+16V	960	Futuro 2	1L+30V	1.800
Futuro 1	1L+17V	1.020	Futuro 2	1L+35V	2.100

Tabela 44 – Capacidade de transporte para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)	Cenário	Trem-tipo	Capacidade de Transporte (TU/Trem)
Futuro 1	1L+18V	1.080	Futuro 2	1L+40V	2.400
Futuro 1	1L+19V	1.140	Futuro 2	1L+42V	2.520
-	-	-	Futuro 2	1L+43V	2.580
-	-	-	Futuro 2	1L+44V	2.640
-	-	-	Futuro 2	1L+45V	2.700
-	-	-	Futuro 2	1L+46V	2.760
-	-	-	Futuro 2	1L+47V	2.820
-	-	-	Futuro 2	1L+48V	2.880
-	-	-	Futuro 2	2L+5V	300
-	-	-	Futuro 2	2L+10V	600
-	-	-	Futuro 2	2L+15V	900
-	-	-	Futuro 2	2L+20V	1.200
-	-	-	Futuro 2	2L+25V	1.500
-	-	-	Futuro 2	2L+30V	1.800
-	-	-	Futuro 2	2L+35V	2.100
-	-	-	Futuro 2	2L+40V	2.400
-	-	-	Futuro 2	2L+42V	2.520
-	-	-	Futuro 2	2L+43V	2.580
-	-	-	Futuro 2	2L+44V	2.640
-	-	-	Futuro 2	2L+45V	2.700
-	-	-	Futuro 2	2L+46V	2.760

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4.2 Etapa 3.2 - Aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo

A otimização na escolha do trem-tipo se baseou na adição das funções utilidade do sistema composto pelos seguintes objetivos:

- Maximizar a capacidade de transporte;
- Minimizar o tempo de ciclo;
- Minimizar o consumo de combustível;

Para maximizar o atributo capacidade de transporte definiu-se uma função utilidade que cresce à medida que crescem os valores de referência. Nesse sentido, é atribuída a utilidade 1 para o melhor resultado, o de maior valor. Dessa forma, a função utilidade desse atributo é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$U(a) = \frac{\text{Valor da alternativa}}{\text{Valor máximo}}$$

Nos outros dois objetivos buscam-se minimizar os atributos, dessa forma faz-se necessário uma função utilidade que decresce à medida que crescem os valores de referência. Dessa forma, a função utilidade de cada um dos atributos é calculada de acordo com a seguinte equação:

$$U(a) = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor da alternativa}}{\text{Valor máximo}}$$

E com base na função utilidade aditiva, explicada na seção 2.3.1.1, foram aplicados os pesos definidos na Etapa 2.B.2 nos resultados das funções utilidade e, por fim, os resultados foram somados, resultando na pontuação global da alternativa.

Na Tabela 45 são apresentados os resultados da função utilidade aplicada em cada atributo e o respectivo peso que compõe a pontuação global das alternativas, em ordem decrescente, para o fluxo entre Urussanga e Capivari.

Tabela 45 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Urussanga-Capivari

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível		Tempo de ciclo		Capacidade de Transporte		Pontuação Global
		Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	
Base	2L+38V	0,91	0,2857	0,003	0,4762	0,97	0,2381	0,494
Futuro 1	2L+38V	0,91	0,2857	0,003	0,4762	0,97	0,2381	0,494
Futuro 1	2L+37V	0,91	0,2857	0,003	0,4762	0,95	0,2381	0,487
Futuro 1	2L+36V	0,91	0,2857	0,003	0,4762	0,92	0,2381	0,481
Futuro 1	2L+35V	0,91	0,2857	0,004	0,4762	0,90	0,2381	0,474
Futuro 2	1L+39V	0,82	0,2857	-	0,4762	1,00	0,2381	0,473
Futuro 1	2L+34V	0,91	0,2857	0,004	0,4762	0,87	0,2381	0,468
Futuro 2	1L+38V	0,82	0,2857	0,001	0,4762	0,97	0,2381	0,467
Futuro 1	2L+33V	0,90	0,2857	0,004	0,4762	0,85	0,2381	0,462
Futuro 2	1L+37V	0,82	0,2857	0,001	0,4762	0,95	0,2381	0,461
Futuro 2	1L+36V	0,82	0,2857	0,001	0,4762	0,92	0,2381	0,454
Futuro 2	2L+37V	0,79	0,2857	0,003	0,4762	0,95	0,2381	0,452
Futuro 2	1L+35V	0,82	0,2857	0,002	0,4762	0,90	0,2381	0,448

Tabela 45 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Urussanga-Capivari (continuação)

Cenário	Trem-tipo	Consumo de combustível		Tempo de ciclo		Capacidade de Transporte		Pontuação Global
		Valor	Peso	Valor	Peso	Valor	Peso	
Futuro 2	2L+36V	0,78	0,2857	0,003	0,4762	0,92	0,2381	0,445
Futuro 2	1L+34V	0,82	0,2857	0,002	0,4762	0,87	0,2381	0,442
Futuro 1	2L+30V	0,90	0,2857	0,005	0,4762	0,77	0,2381	0,442
Futuro 2	2L+35V	0,78	0,2857	0,003	0,4762	0,90	0,2381	0,438
Futuro 2	1L+33V	0,82	0,2857	0,003	0,4762	0,85	0,2381	0,436
Futuro 2	2L+34V	0,78	0,2857	0,004	0,4762	0,87	0,2381	0,431
Futuro 2	2L+33V	0,77	0,2857	0,004	0,4762	0,85	0,2381	0,424
Futuro 2	1L+30V	0,81	0,2857	0,003	0,4762	0,77	0,2381	0,417
Futuro 1	2L+25V	0,89	0,2857	0,005	0,4762	0,64	0,2381	0,408
Futuro 2	2L+30V	0,76	0,2857	0,004	0,4762	0,77	0,2381	0,402
Futuro 2	1L+25V	0,80	0,2857	0,005	0,4762	0,64	0,2381	0,384
Futuro 1	1L+19V	0,91	0,2857	0,007	0,4762	0,49	0,2381	0,378
Futuro 1	2L+20V	0,87	0,2857	0,007	0,4762	0,51	0,2381	0,373
Futuro 1	1L+18V	0,90	0,2857	0,007	0,4762	0,46	0,2381	0,371
Futuro 1	1L+17V	0,90	0,2857	0,007	0,4762	0,44	0,2381	0,365
Futuro 2	2L+25V	0,73	0,2857	0,005	0,4762	0,64	0,2381	0,364
Futuro 1	1L+16V	0,90	0,2857	0,007	0,4762	0,41	0,2381	0,358
Futuro 1	1L+15V	0,89	0,2857	0,008	0,4762	0,38	0,2381	0,351
Futuro 2	1L+20V	0,78	0,2857	0,007	0,4762	0,51	0,2381	0,348
Futuro 1	1L+14V	0,89	0,2857	0,008	0,4762	0,36	0,2381	0,343
Futuro 1	2L+15V	0,84	0,2857	0,007	0,4762	0,38	0,2381	0,334
Futuro 2	2L+20V	0,69	0,2857	0,007	0,4762	0,51	0,2381	0,322
Futuro 1	1L+10V	0,87	0,2857	0,008	0,4762	0,26	0,2381	0,312
Futuro 2	1L+15V	0,75	0,2857	0,007	0,4762	0,38	0,2381	0,309
Futuro 1	2L+10V	0,78	0,2857	0,007	0,4762	0,26	0,2381	0,286
Futuro 2	2L+15V	0,61	0,2857	0,007	0,4762	0,38	0,2381	0,271
Futuro 2	1L+10V	0,68	0,2857	0,008	0,4762	0,26	0,2381	0,259
Futuro 1	1L+5V	0,77	0,2857	0,008	0,4762	0,13	0,2381	0,256
Futuro 2	2L+10V	0,46	0,2857	0,007	0,4762	0,26	0,2381	0,197
Futuro 1	2L+5V	0,57	0,2857	0,007	0,4762	0,13	0,2381	0,196
Futuro 2	1L+5V	0,46	0,2857	0,008	0,4762	0,13	0,2381	0,165
Futuro 2	2L+5V	-	0,2857	0,007	0,4762	0,13	0,2381	0,034

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 46 são apresentadas as pontuações globais das alternativas, em ordem decrescente, para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari.

Tabela 46 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Novo Horizonte-Capivari

Colocação	Cenário	Trem-tipo	Pontuação Global
1	Futuro 2	1L+38V	0,470
2	Futuro 2	1L+37V	0,464
3	Futuro 2	1L+36V	0,458
4	Futuro 2	1L+35V	0,452
5	Futuro 2	2L+36V	0,450
6	Futuro 2	1L+34V	0,446
7	Futuro 2	2L+35V	0,443
8	Futuro 2	1L+33V	0,440
9	Futuro 2	2L+34V	0,436
10	Futuro 2	2L+33V	0,430
11	Futuro 2	1L+30V	0,420
12	Futuro 2	2L+30V	0,406
13	Futuro 2	1L+25V	0,387
14	Base	1L+19V	0,382
15	Futuro 1	1L+19V	0,382
16	Futuro 1	1L+18V	0,375
17	Futuro 1	1L+17V	0,369
18	Futuro 2	2L+25V	0,367
19	Futuro 1	1L+16V	0,361
20	Futuro 1	1L+15V	0,354
21	Futuro 2	1L+20V	0,351
22	Futuro 1	1L+14V	0,347
23	Futuro 2	2L+20V	0,324
24	Futuro 1	1L+10V	0,315
25	Futuro 2	1L+15V	0,311
26	Futuro 2	2L+15V	0,273
27	Futuro 2	1L+10V	0,261
28	Futuro 1	1L+5V	0,258
29	Futuro 2	2L+10V	0,199
30	Futuro 2	1L+5V	0,166
31	Futuro 2	2L+5V	0,035

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 47 são apresentadas as pontuações globais das alternativas, em ordem decrescente, para o fluxo entre Sangão e Capivari.

Tabela 47 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Sangão-Capivari

Colocação	Cenário	Trem-tipo	Pontuação Global
1	Futuro 2	2L+46V	0,532
2	Futuro 2	2L+45V	0,526
3	Futuro 1	2L+38V	0,523
4	Futuro 2	2L+44V	0,521
5	Futuro 1	2L+37V	0,518
6	Futuro 2	2L+43V	0,515
7	Futuro 1	2L+36V	0,513
8	Futuro 2	2L+42V	0,510
9	Futuro 1	2L+35V	0,508
10	Futuro 2	1L+48V	0,507
11	Futuro 2	1L+47V	0,503
12	Futuro 1	2L+34V	0,502
13	Futuro 2	2L+40V	0,499
14	Futuro 2	1L+46V	0,498
15	Futuro 1	2L+33V	0,497
16	Futuro 2	1L+45V	0,493
17	Futuro 2	1L+44V	0,488
18	Futuro 2	1L+43V	0,483
19	Futuro 1	2L+30V	0,481
20	Futuro 2	1L+42V	0,477
21	Futuro 2	2L+35V	0,470
22	Futuro 2	1L+40V	0,467
23	Futuro 1	2L+25V	0,453
24	Futuro 2	1L+35V	0,441
25	Futuro 2	2L+30V	0,440
26	Futuro 1	1L+19V	0,430
27	Futuro 1	1L+18V	0,424
28	Futuro 1	2L+20V	0,424
29	Futuro 1	1L+17V	0,418
30	Futuro 2	1L+30V	0,418
31	Futuro 1	1L+16V	0,413
32	Futuro 2	2L+25V	0,407
33	Futuro 1	1L+15V	0,407
34	Futuro 1	1L+14V	0,401
35	Futuro 1	2L+15V	0,390

Tabela 47 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Sangão-Capivari (continuação)

Colocação	Cenário	Trem-tipo	Pontuação Global
36	Futuro 2	1L+25V	0,390
37	Futuro 1	1L+10V	0,374
38	Futuro 2	2L+20V	0,371
39	Futuro 2	1L+20V	0,362
40	Base	1L+19V	0,354
41	Futuro 1	2L+10V	0,348
42	Futuro 2	1L+15V	0,329
43	Futuro 2	2L+15V	0,325
44	Futuro 1	1L+5V	0,323
45	Futuro 2	1L+10V	0,284
46	Futuro 1	2L+5V	0,269
47	Futuro 2	2L+10V	0,258
48	Futuro 2	1L+5V	0,194
49	Futuro 2	2L+5V	0,100

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Na Tabela 48 são apresentadas as pontuações globais das alternativas, em ordem decrescente, para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari.

Tabela 48 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Rio Fiorita-Capivari

Colocação	Cenário	Trem-tipo	Pontuação Global
1	Futuro 2	1L+48V	0,522
2	Futuro 2	1L+47V	0,518
3	Futuro 2	2L+46V	0,514
4	Futuro 2	1L+46V	0,513
5	Futuro 2	2L+45V	0,508
6	Futuro 2	1L+45V	0,508
7	Futuro 2	2L+44V	0,503
8	Futuro 2	1L+44V	0,503
9	Futuro 2	2L+43V	0,498
10	Futuro 2	1L+43V	0,498
11	Futuro 2	1L+42V	0,493
12	Futuro 2	2L+42V	0,492
13	Futuro 2	1L+40V	0,482
14	Futuro 2	2L+40V	0,481
15	Futuro 2	1L+35V	0,457

Tabela 48 – Pontuações globais das alternativas para o fluxo Rio Fiorita-Capivari (continuação)

Colocação	Cenário	Trem-tipo	Pontuação Global
16	Futuro 2	2L+35V	0,454
17	Futuro 2	1L+30V	0,433
18	Futuro 2	2L+30V	0,424
19	Futuro 1	1L+19V	0,419
20	Futuro 1	1L+18V	0,414
21	Futuro 1	1L+17V	0,408
22	Futuro 2	1L+25V	0,406
23	Futuro 1	1L+16V	0,402
24	Futuro 1	1L+15V	0,397
25	Futuro 2	2L+25V	0,393
26	Futuro 1	1L+14V	0,391
27	Futuro 2	1L+20V	0,379
28	Futuro 1	1L+10V	0,365
29	Futuro 2	2L+20V	0,357
30	Base	1L+19V	0,349
31	Futuro 2	1L+15V	0,347
32	Futuro 1	1L+5V	0,316
33	Futuro 2	2L+15V	0,314
34	Futuro 2	1L+10V	0,305
35	Futuro 2	2L+10V	0,248
36	Futuro 2	1L+5V	0,221
37	Futuro 2	2L+5V	0,095

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4.3 Etapa 3.3 - Análise dos Resultados

Nesta etapa realizou-se a análise de sensibilidade, a qual permitiu verificar o impacto na alteração dos pesos dados a cada atributo para a definição das alternativas a serem escolhidas. Para cada um dos fluxos, observaram-se as alterações do trem-tipo de maior pontuação global a partir da modificação dos pesos dos atributos.

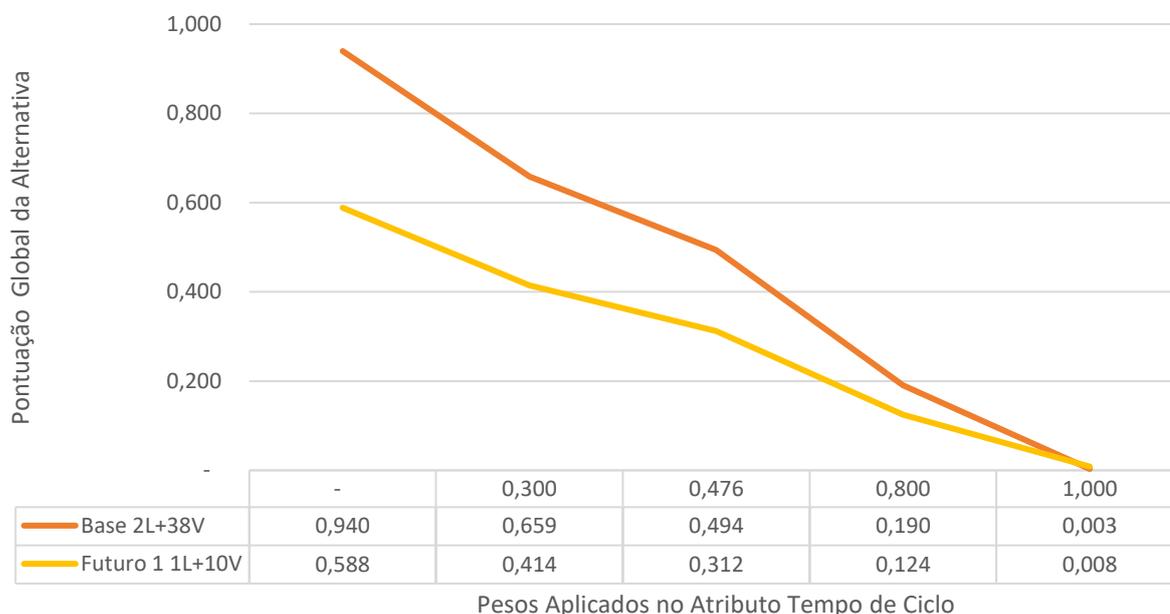
Ressalta-se que ao ser realizada a alteração do peso de cada atributo, manteve-se a proporção original atribuída aos outros dois atributos.

5.4.3.1 Fluxo entre Urussanga e Capivari

Conforme os resultados apresentados na etapa 3.2, dentre os trens-tipos e cenários analisados para o fluxo entre Urussanga e Capivari, o trem-tipo 2L+38V referente ao cenário base resultou na maior pontuação global, que corresponde ao valor de 0,494.

No Gráfico 4 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo tempo do ciclo para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 4 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do tempo de ciclo (Urussanga-Capivari)

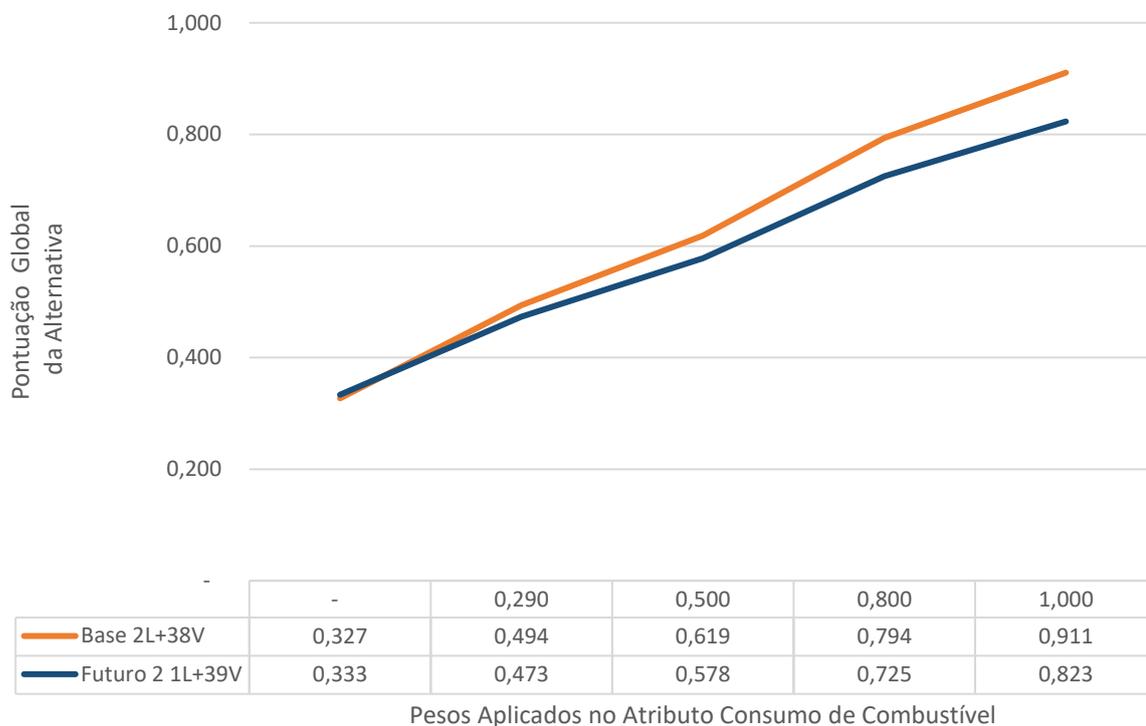


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que o trem-tipo do cenário base apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a um, que nesse caso o trem-tipo 1L+10V do cenário futuro 1 apresenta maior pontuação global.

No Gráfico 5 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo consumo de combustível para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 5 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do consumo de combustível (Urussanga-Capivari)

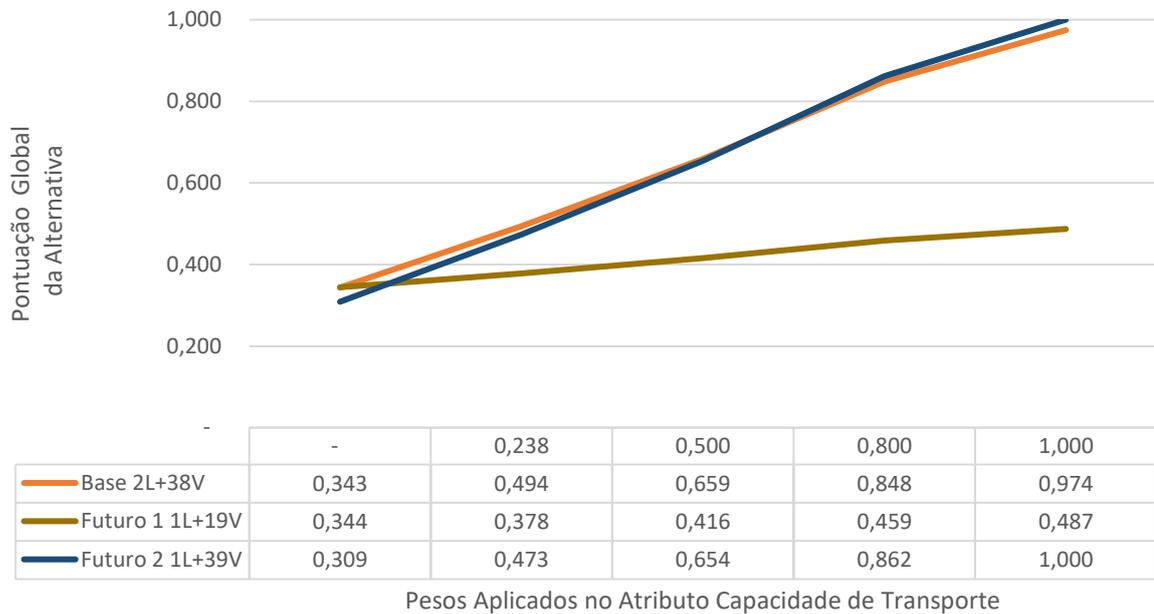


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da variação dos pesos aplicados ao atributo consumo de combustível, observa-se que o trem-tipo do cenário base apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a zero, que nesse caso o trem-tipo 1L+39V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global.

No Gráfico 6 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo capacidade de transporte para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 6 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso da capacidade de transporte (Urussanga-Capivari)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

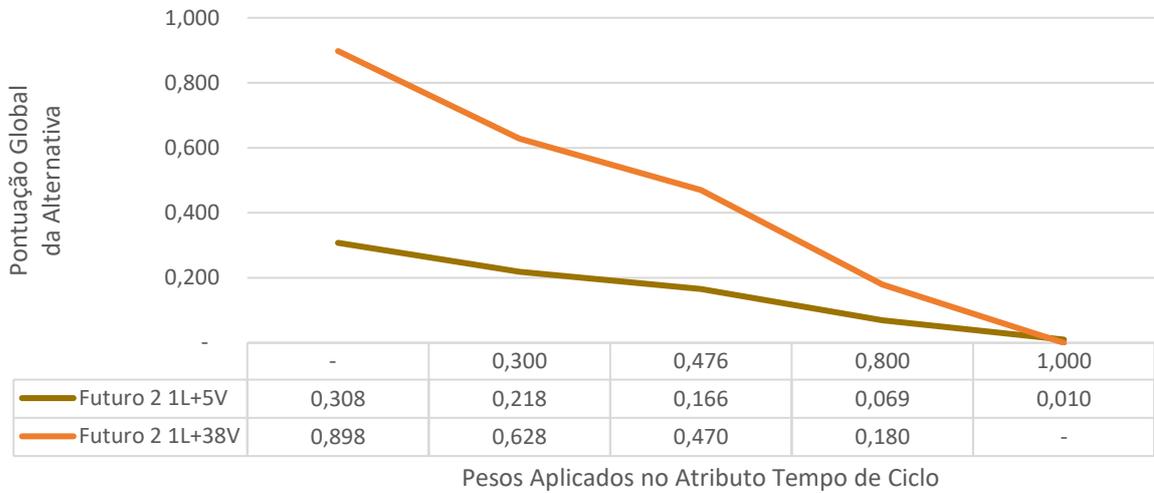
Referente ao atributo capacidade de transporte, observa-se que o trem-tipo do cenário base para pesos inferiores a 0,60 apresenta maior pontuação global, com exceção de valores muito próximos a zero, onde o trem-tipo 1L+19V do cenário futuro 1 se sobressai. Enquanto que para pesos superiores a 0,60 o trem-tipo de maior pontuação global é 1L+39V do cenário futuro 2.

5.4.3.2 Fluxo entre Novo Horizonte e Capivari

Conforme os resultados apresentados na etapa 3.2, dentre os trens-tipos e cenários analisados para o fluxo entre Novo Horizonte e Capivari, o trem-tipo 1L+38V referente ao cenário futuro 2 resultou na maior pontuação global, que corresponde ao valor de 0,470.

No Gráfico 7 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo tempo do ciclo para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 7 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do tempo de ciclo (Novo Horizonte-Capivari)

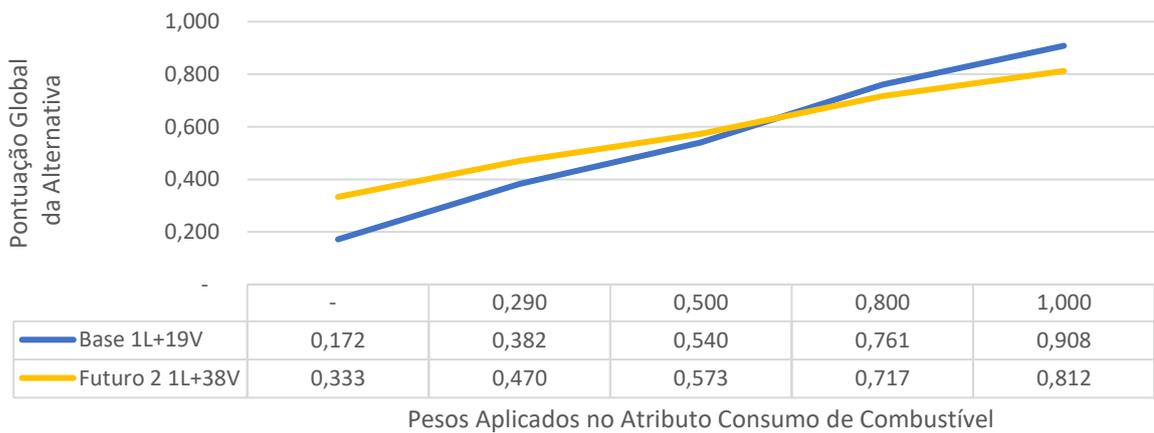


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que o trem-tipo 1L+38V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a um, que nesse caso o trem-tipo 1L+5V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global.

No Gráfico 8 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo consumo de combustível para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 8 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do consumo de combustível (Novo Horizonte-Capivari)

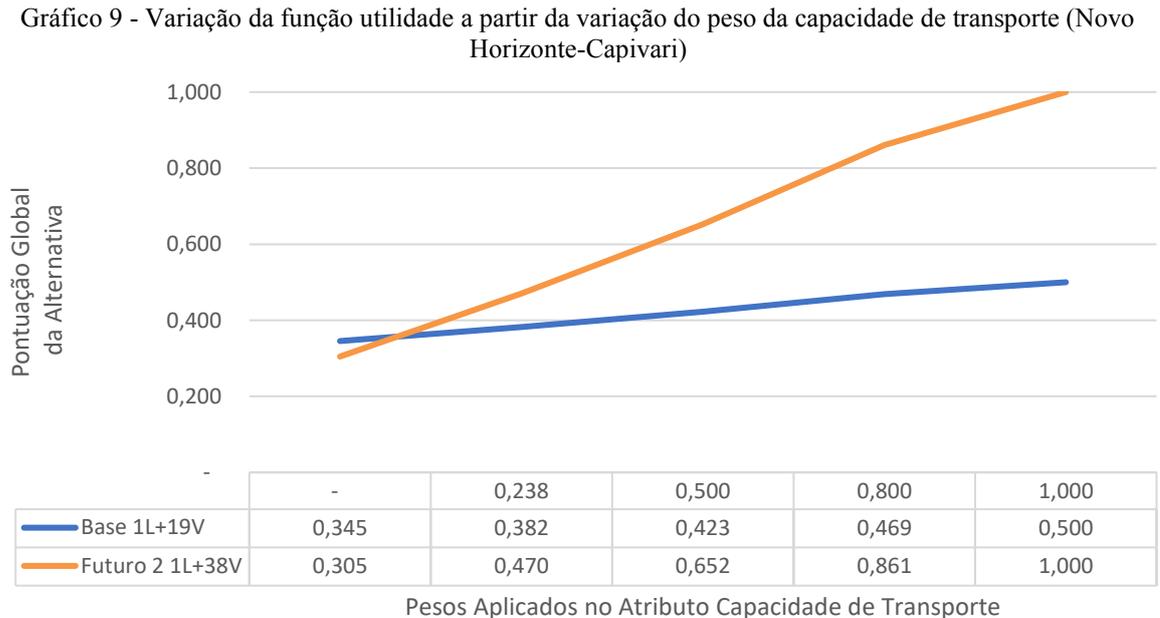


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da variação dos pesos aplicados ao atributo consumo de combustível, observa-se que o trem-tipo 1L+38V do cenário futuro 2 para pesos inferiores a 0,63 apresenta maior

pontuação global, enquanto que para pesos superiores a 0,63 o trem-tipo de maior pontuação global é o do cenário base.

No Gráfico 9 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo capacidade de transporte para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

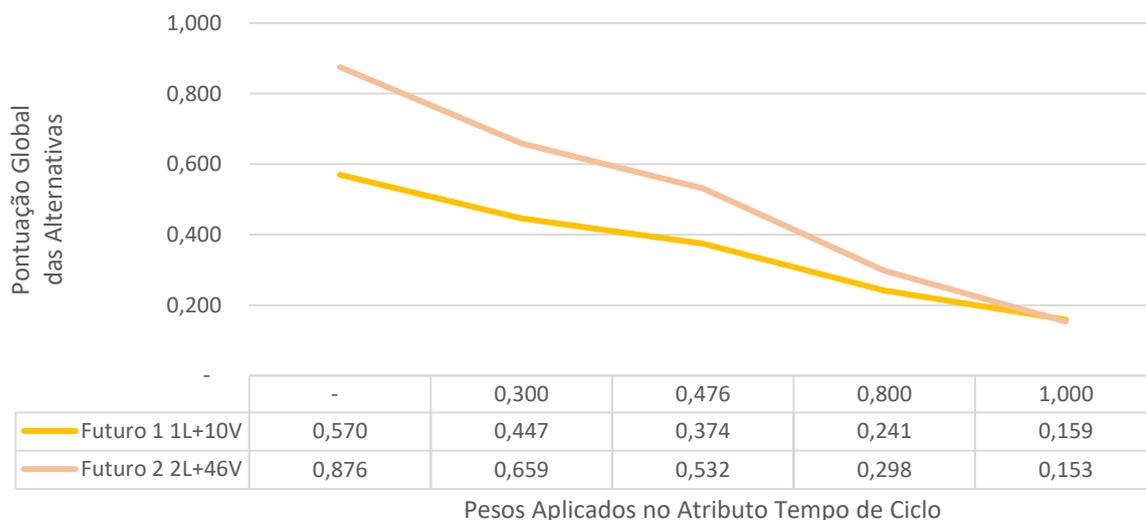
Referente ao atributo capacidade de transporte, observa-se que o trem-tipo 1L+38V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a zero, que nesse caso o trem-tipo do cenário base apresenta maior pontuação global.

5.4.3.3 Fluxo entre Sangão e Capivari

Conforme os resultados apresentados na etapa 3.2, dentre os trens-tipos e cenários analisados para o fluxo entre Sangão e Capivari, o trem-tipo 2L+46V referente ao cenário futuro 2 resultou na maior pontuação global, que corresponde ao valor de 0,532.

No Gráfico 10 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo tempo do ciclo para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 10 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do tempo de ciclo (Sangão-Capivari)

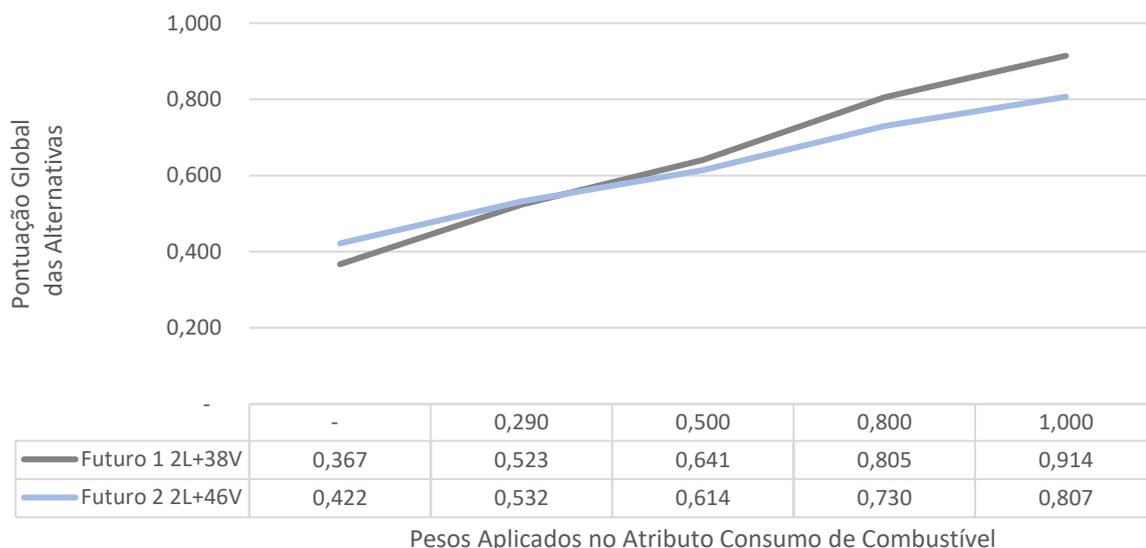


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que o trem-tipo 2L+46V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a um, que nesse caso o trem-tipo 1L+10V do cenário futuro 1 apresenta maior pontuação global.

No Gráfico 11 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo consumo de combustível para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 11 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do consumo de combustível (Sangão-Capivari)

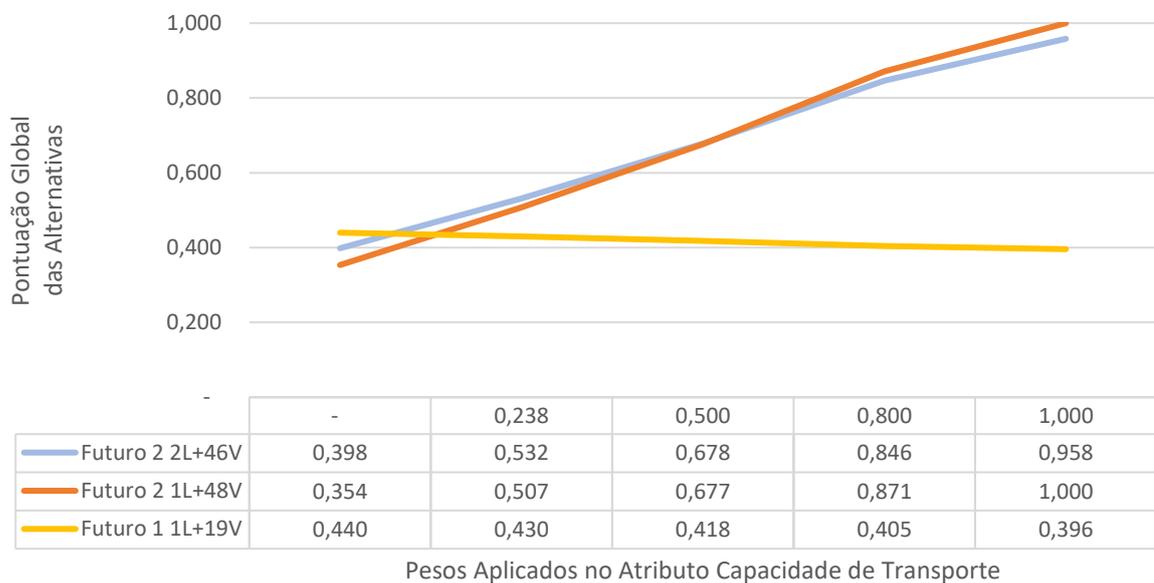


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da variação dos pesos aplicados ao atributo consumo de combustível, observa-se que o trem-tipo 2L+46V do cenário futuro 2 para pesos inferiores a 0,33 apresenta maior pontuação global, enquanto que para pesos superiores a 0,33 o trem-tipo de maior pontuação global é composto por duas locomotivas e 38 vagões do cenário futuro 1.

No Gráfico 12 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo capacidade de transporte para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 12 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso da capacidade de transporte (Sangão-Capivari)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

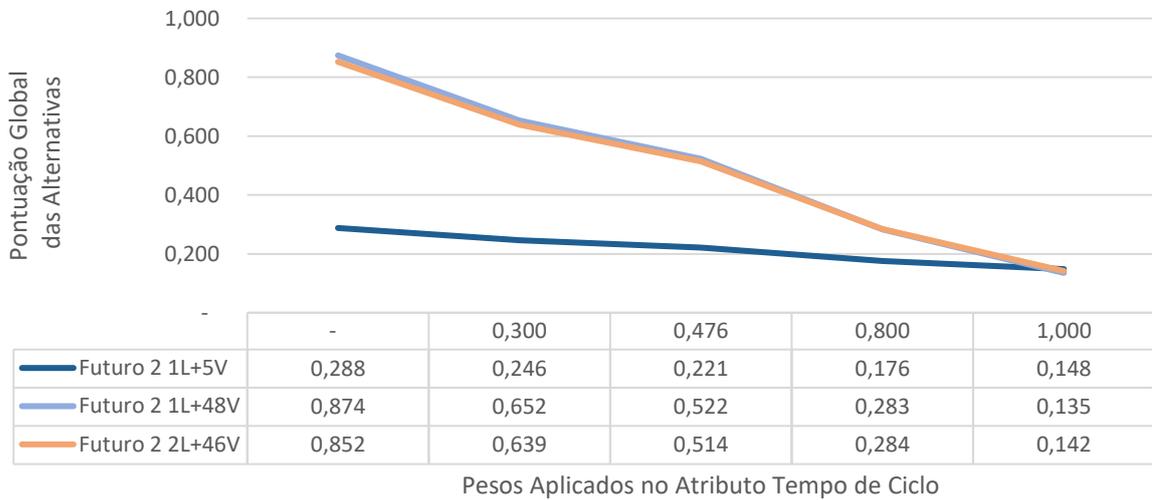
Referente ao atributo capacidade de transporte, observa-se que o trem-tipo 2L+46V do cenário futuro 2 para pesos inferiores a 0,52 apresenta maior pontuação global, com exceção de valores muito próximos a zero, onde o trem-tipo 1L+19V do cenário futuro 1 se sobressai. Enquanto que para pesos superiores a 0,52 o trem-tipo de maior pontuação global é 1L+48V do cenário futuro 2.

5.4.3.4 Fluxo entre Rio Fiorita e Capivari

Conforme os resultados apresentados na etapa 3.2, dentre os trens-tipos e cenários analisados para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari, o trem-tipo 1L+48V referente ao cenário futuro 2 resultou na maior pontuação global, que corresponde ao valor de 0,522.

No Gráfico 13 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo tempo do ciclo para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 13 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do tempo de ciclo (Rio Fiorita-Capivari)

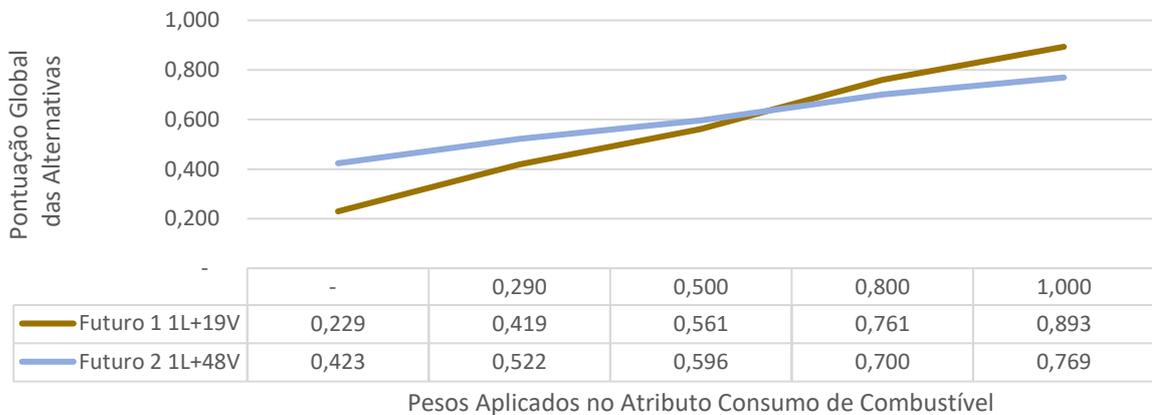


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que o trem-tipo 1L+48V e o trem-tipo 2L+46V do cenário futuro 2 apresentam desempenhos semelhantes com a alteração do peso aplicado no atributo tempo de ciclo. O trem-tipo 1L+5V do cenário futuro 2 apresenta pontuação global alta apenas quando o peso do atributo tempo de ciclo é próximo ao valor um.

No Gráfico 14 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo consumo de combustível para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 14 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso do consumo de combustível (Rio Fiorita-Capivari)

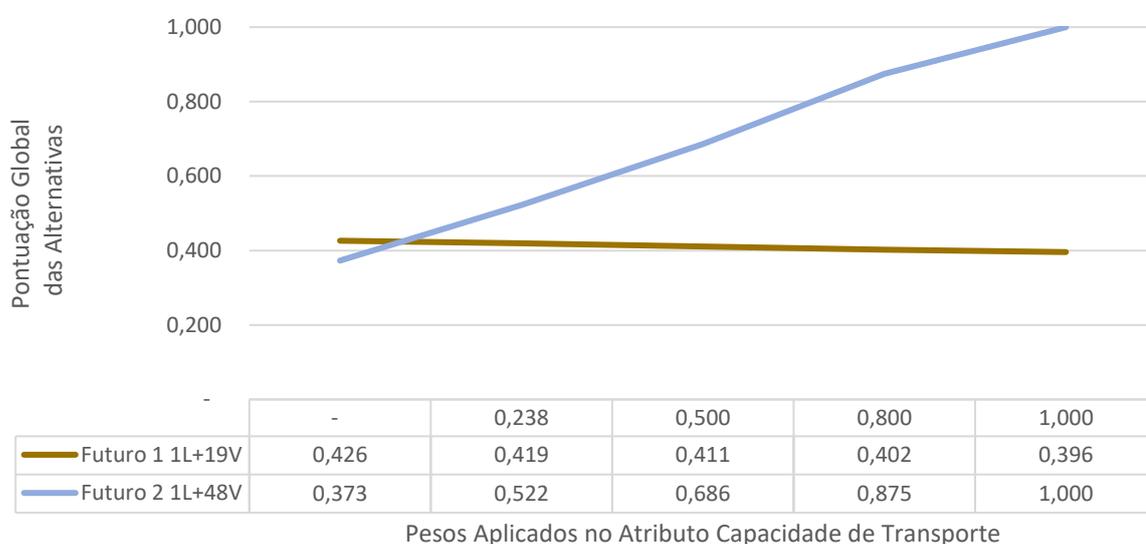


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir da variação dos pesos aplicados ao atributo consumo de combustível, observa-se que o trem-tipo 1L+48V do cenário futuro 1 para pesos inferiores a 0,61 apresenta maior pontuação global, enquanto que para pesos superiores a 0,61 o trem-tipo de maior pontuação global é composto por uma locomotiva e 19 vagões do cenário futuro 1.

No Gráfico 15 é apresentada a variação da função utilidade a partir da variação do peso aplicada ao atributo capacidade de transporte para os trens-tipos que apresentam os maiores valores.

Gráfico 15 - Variação da função utilidade a partir da variação do peso da capacidade de transporte (Rio Fiorita-Capivari)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que o trem-tipo 1L+48V do cenário futuro 2 apresenta maior pontuação global, com exceção de quando é aplicado um peso ao atributo próximo a zero, que nesse caso o trem-tipo 1L+19V do cenário futuro 1 apresenta maior pontuação global.

5.4.4 Etapa 3.4 - Definição do Trem-Tipo

Conforme proposição do método, nesta etapa tende-se a escolher o trem-tipo que apresenta a melhor pontuação global. Para esse estudo, após analisar o resultado da aplicação do método, escolheu-se para todos os fluxos os trens-tipo que apresentaram maior pontuação global.

Na

Tabela 49 é apresentado o detalhamento que identifica os trens-tipo que se encontram em operação na FTC e o trens-tipo escolhidos pelo método.

Tabela 49 - Detalhamento com os trens-tipo escolhidos pelo método

Fluxo	Trem-tipo em operação	Trem-tipo escolhido pelo método		
		Cenário	Trem-tipo	Modelo locomotiva
Urussanga-Capivari	2L+38V	Base	2L+38V	G12
Novo Horizonte-Capivari	1L+19V	Futuro 2	1L+38V	Dash-9
Sangão-Capivari	1L+19V*	Futuro 2	2L+46V	Dash-9
Rio Fiorita-Capivari	1L+19V*	Futuro 2	1L+48V	Dash-9

*Entre os pátios de Paz Ferreira e Capivari a operação é feita com 2L+38V

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O desempenho dos trens-tipo escolhidos pelo método, em comparação com os trens-tipo em operação, é apresentado na Tabela 50.

Tabela 50 - Quadro comparativo de desempenho dos trens-tipo

Fluxo de Transporte	Tempo de Ciclo	Consumo de Combustível	Capacidade de Transporte
Urussanga-Capivari	—	—	—
Novo Horizonte-Capivari	↑ 1%	↑ 105%	↑ 100%
Sangão-Capivari	↓ 15%	↑ 111%	↑ 142%
Rio Fiorita-Capivari	↓ 14%	↑ 112%	↑ 153%

Legenda

— Sem variação ↑ Aumento ↓ Diminuição

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Referente ao fluxo entre Urussanga e Capivari o trem-tipo de maior pontuação global coincidiu com aquele que é utilizado hoje. Enquanto que para o fluxo entre Novo Horizonte e Capavari com a alteração do trem-tipo estima-se dobrar a capacidade de transporte, sendo que o tempo de ciclo sofrerá aumento de menos de 1% e um aumento no consumo de combustível de 105%.

Com relação ao fluxo entre Sangão e Capivari, observam-se ganhos em redução de 15% no tempo de ciclo e aumento de 142% na capacidade de transporte frente a um aumento de 111% no consumo de combustível.

Por fim, para o fluxo entre Rio Fiorita e Capivari, observam-se ganhos em diminuição de 14% no tempo de ciclo e aumento de 153% na capacidade de transporte frente a um aumento de 112% no consumo de combustível.

Observou-se em linhas gerais que os trens diretos apresentam desempenho melhor que aqueles que são acoplados no pátio de Paz Ferreira. Além disso, a partir dos resultados das simulações realizadas na Etapa 2.A.2 depreende-se que a operação realizada com as locomotivas G12 tem como fator limitante a sua capacidade de tração enquanto que as simulações realizadas com as locomotivas Dash-9 apresentaram como limitação a extensão do pátio Esplanada.

Quanto à análise de sensibilidade realizada, percebe-se que a variação do peso dos atributos em dez pontos percentuais para mais ou para menos para os fluxos Urussanga-Capivari, Novo Horizonte-Capivari e Rio Fiorita-Capivari, resultou no trem-tipo de maior pontuação global aquele escolhido pelo método. Apenas no fluxo Sangão-Capivari para os atributos consumo de combustível e capacidade de transporte que o trem-tipo de maior pontuação global, quando alterados os atributos em dez pontos percentuais para mais ou para menos, é diferente daquele escolhido pelo método.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do presente estudo e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

O transporte ferroviário no Brasil prevê dobrar a parcela de carga transportada em 2025. Estima-se alcançar esse resultado por meio das renovações antecipadas de contratos de concessão, novas concessões, desestatizações e relitações por meio do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) do governo federal (BRASIL, 2019). Além do PPI, estão previstos investimentos no modal ferroviário por meio do Programa de Autorizações Ferroviárias. O programa viabiliza a exploração do serviço de transporte ferroviário mediante o modelo de autorizações ferroviárias, estabelecido pela Lei nº 14.273, de 23/12/2021 (BRASIL, 2021c). Por meio dele estão em análise 76 requerimentos de diferentes entes privados que estão interessados em construir e operar mais de 19 mil km de ferrovias (BRASIL, [2022]f).

Esses investimentos são precedidos de estudos, dentre eles o estudo operacional da malha ferroviária, que utiliza como dado de entrada o trem-tipo a ser utilizado nos fluxos de transporte ou no próprio estudo é realizada a sua definição.

A partir da revisão bibliográfica sistemática realizada, que era um dos objetivos específicos propostos, constatou-se que a maioria dos estudos relacionados ao problema de formação de trens-tipo adota como função objetivo a minimização dos custos operacionais. Porém, observou-se também que o local onde está inserida a ferrovia pode influenciar nos atributos a serem escolhidos, como por exemplo nos estudos aplicados à malha ferroviária chinesa, o atributo hora-vagão apresenta-se mais recorrente, uma vez que a demanda ferroviária tem crescido em descompasso com a oferta de infraestrutura naquele país.

De forma a proporcionar novas abordagens na problemática da formação de trens, no presente estudo foi proposto o desenvolvimento de um método para a determinação de trens-tipo ferroviários de carga em estudo operacionais, com o uso combinado de ferramentas de simulação de marcha e método multicritério de apoio à decisão. Dessa forma, a partir do desenvolvimento do método, foi atingido o objetivo geral do trabalho.

O método proposto é dividido em fases. Na primeira fase (Cenário Base) é elaborado um diagnóstico da operação atual da malha ferroviária e dos fluxos de transporte em estudado,

são coletados os dados necessários para realizar as simulações em *software* específico para isso. Depois são realizadas as simulações visando a calibração dos dados de entrada para melhor representação da realidade.

Na fase Cenário Futuro são formulados e simulados cenários futuros, os quais englobam a adoção de melhorias em material rodante, modelo de operação da ferrovia e melhorias na via permanente, por exemplo. Em paralelo pode ser desenvolvida a fase denominada Atributos, nela são levantados quais os atributos são considerados relevantes para a operação ferroviária em estudo e os respectivos pesos são definidos.

Na última fase, Análise Multicritério, os atributos são calculados a partir dos valores obtidos nas simulações e é realizado o cálculo da função utilidade. Por fim, é feita uma análise dos resultados, o que inclui uma análise de sensibilidade e os trens-tipo são selecionados, os quais devem ser utilizados nas demais etapas do estudo operacional.

Um dos objetivos específicos desse trabalho consiste na demonstração da aplicabilidade do método, que foi alcançada a partir da sua aplicação nos fluxos de transporte ferroviário de carvão mineral na malha da FTC. Para tanto foram formulados cenários que consideram a alteração no modelo de operação da ferrovia e também alteração das locomotivas. Consideraram-se como atributos o tempo de ciclo, o consumo de combustível e a capacidade de transporte de cada trem-tipo.

Como resultado da aplicação do método, os fluxos entre Urussanga e Capivari mantiveram o trem-tipo com duas locomotivas G12 e 38 vagões, utilizado atualmente, como o de maior pontuação global. Para os fluxos entre Novo Horizonte e Capivari, o trem-tipo de maior pontuação global é composto por uma locomotiva modelo Dash-9 e 38 vagões, sendo que hoje opera um trem-tipo de uma locomotiva G12 e 19 vagões, sendo que os ganhos com essa alteração se refletem em duplicar a capacidade de transporte com um aumento de tempo de ciclo inferior a 1%.

Referente os fluxos entre Sangão e Capivari, a operação atual consiste na operação de trens-tipo com uma locomotiva e 19 vagões entre o pátio de Sangão e Paz Ferrereira, local onde são agrupados os trens e formadas composições com duas locomotivas e 38 vagões. Nesse caso, o trem-tipo de maior desempenho é caracterizado por realizar a operação direta entre a origem e o destino e ser composto por duas locomotivas Dash-9 e 46 vagões. Prevê-se ganhos de redução em 15% no tempo de ciclo e aumento de 142% na capacidade de transporte frente a um aumento de 111% no consumo de combustível.

Os fluxos entre Rio Fiorita e Capivari atualmente são realizados com trens-tipo formados por uma locomotiva e 19 vagões entre o pátio de Sangão e Paz Ferrereira, local onde são agrupados os trens e formadas composições com duas locomotivas e 38 vagões que seguem até o pátio de Capivari. A partir da aplicação do método, o trem-tipo com maior pontuação global foi verificado naquele em que é realizado o transporte direto entre os pátios de origem e destino, sendo formado por uma locomotiva Dash-9 e 48 vagões. Estima-se, com essa alteração, ganhos em diminuição de 14% no tempo de ciclo e aumento de 153% na capacidade de transporte frente a um aumento de 112% no consumo de combustível.

Realizou-se a análise de sensibilidade, como um objetivo específico deste trabalho de avaliar o impacto da alteração dos parâmetros na determinação de composições de trens-tipo, e verificou-se que a variação do peso dos atributos em dez pontos percentuais para mais ou para menos para os fluxos Urussanga-Capivari, Novo Horizonte-Capivari e Rio Fiorita-Capivari, resultou no trem-tipo de maior pontuação global aquele escolhido pelo método. Apenas no fluxo Sangão-Capivari para os atributos consumo de combustível e capacidade de transporte que o trem-tipo de maior pontuação global, quando alterados os atributos em dez pontos percentuais para mais ou para menos, é diferente daquele escolhido pelo método.

Conclui-se que o método proposto é aplicável, conforme demonstração da aplicabilidade apresentada no capítulo 5, e pode ser uma ferramenta útil na definição de trens-tipo ferroviários de carga, em razão que frequentemente a definição do trem-tipo não é feita com a utilização de simuladores e, quando são utilizados, não são empregados critérios claros que orientem na escolha do melhor trem-tipo pelo tomador de decisão.

O método apresenta a característica de ser adaptável aos objetivos estratégicos de cada operadora ferroviária e pode anteder às particularidades de projetos específicos pelo fato de contemplar uma etapa que define junto a uma equipe com pelo menos três especialistas em planejamento de transportes e/ou operação de ferrovias os atributos a serem otimizados. Além disso, a utilização de simuladores de operação ferroviária permite a configuração de diferentes cenários que representam a realidade e ao mesmo tempo podem ser testadas alterações na configuração do material rodante ou na via permanente, que a partir da aplicação do método proposto é possível analisar o impacto de desempenho do trem-tipo.

Após a definição do trem-tipo, por meio da aplicação do método proposto, pode-se proceder com o desenvolvimento das demais etapas do estudo operacional, seja para embasar o processo de concessão de ferrovias, projetos para a construção de novas ferrovias ou melhorias em operações ferroviárias existentes.

Destaca-se também que não foi encontrada na bibliografia pesquisada métodos que apresentem a utilização de simulação ferroviária e MAUT para o fim proposto neste estudo, sendo portanto, inovador nessa área.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas algumas sugestões que podem ser aplicadas no desenvolvimento de trabalhos futuros relacionados ao desenvolvimento de métodos de definição de trens-tipo ferroviários:

- Aplicar o método desenvolvido nesta dissertação em outros trechos ferroviários a fim de analisar o desempenho de trens-tipo com características diversas.
- Desenvolver um estudo para a definição de metodologia de definição de trens-tipo ferroviários voltada ao transporte de passageiros.
- Desenvolver um estudo que explore as variáveis que estão relacionadas à operação ferroviária e qual a sua formulação matemática.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 7590:** Trilho Vignole - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 37 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Apresentação Reunião Participativa nº 005/2015:** prorrogação dos prazos dos contratos de concessão para exploração e desenvolvimento do serviço público do transporte ferroviário de carga. Brasília: ANTT, 2015. 77 slides, color.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Anuário do Setor Ferroviário.** [2022]a. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/anuario-do-setor-ferroviario>. Acesso em: 29 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Declaração de Rede - 2022.** [2022]b. Disponível em <https://portal.antt.gov.br/declaracao-de-rede-2022>. Acesso em: 20 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Ferrovias Tereza Cristina S.A.** [2022]c. Disponível em: <https://portal.antt.gov.br/ferrovia-tereza-cristina-s-a>. Acesso em: 29 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Relatório Final:** Brasília: ANTT, 2016. 72 p. Disponível em: <http://portal.antt.gov.br/uploads/0021/21791>. Acesso em: 10 maio 2020.

AMICIS, Marco de. **Proposta de Método para Determinar a Frota de Material Rodante de uma Ferrovia de Via Singela na Fase de Projeto com o Auxílio da Simulação Dinâmica.** 2018. 216 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). **Informações Gerais:** o setor ferroviário de carga brasileiro. O Setor Ferroviário de Carga Brasileiro. c2021. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BAHIA MINERAÇÃO S/A (BAMIN). **Nossos Projetos.** c2022. Disponível em: <https://www.bamin.com.br/bamin.php#projetos>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BECKER, João Luis. **Teoria Axiomática da Utilidade Esperada.** 1988. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/204819/000017606.pdf?sequence=1>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BERKELEY SIMULATION SOFTWARE (BSS). **Rail Traffic Controller: RTC Outputs.** [2020]. Disponível em: <http://www.berkeleysimulation.com/outputs.php>. Acesso em: 05 jul. 2020.

BOHLIN, Markus *et al.* Optimization Methods for Multistage Freight Train Formation. **Transportation Science**, [S.L.], v. 50, n. 3, p. 823-840, ago. 2016. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.2014.0580>.

BRASIL. Agência Brasil. **Ministério da Infraestrutura entregará planos de logística até 2050: segurança jurídica de acordos é certeza de investimentos, diz pasta**. Segurança jurídica de acordos é certeza de investimentos, diz pasta. 2020a. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-10/ministerio-da-infraestrutura-entregara-planos-de-logistica-ate-2050>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. **Programa de Parcerias de Investimentos (PPI)**. PPI vai priorizar a desestatização de aeroportos e ferrovias em 2019a. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/ppi-vai-priorizar-privatizacao-de-aeroportos-e-ferrovias-em-2019>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Concessão da EF-170 FERROGRÃO**. [Brasília]: PPI, [2020]b. 10 slides, color. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=8043. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Concessão da Ferrovia Norte-Sul trecho Porto Nacional/TO a Estrela d'Oeste/SP (EF-151/TO/GO/MG/SP)**: programa de concessão de ferrovias federais. Programa de Concessão de Ferrovias Federais. [2019]b. Disponível em: https://www.ppi.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=5642. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **EF-277 - Estrada de Ferro Paraná Oeste - Ferroeste**: Andamento do projeto. [2022]a. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/ef-277-estrada-de-ferro-parana-oeste-ferroeste>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Ferrovia EF-334/BA - Ferrovia de Integração Oeste-Leste-FIOL (trecho entre Ilhéus/BA e Caetité/BA)**: Andamento do projeto. [2021]a. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/ferrovia-ef-334ba-ferrovia-de-integracao-oeste-lest-fiol>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Ferrovia EF-170 – MT/PA - Ferrogrão**: andamento do projeto. Andamento do projeto. [2021]b. Disponível em: <https://www.ppi.gov.br/ef-170-mt-pa-ferrograo>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Governo Federal assina renovações antecipadas de ferrovias e viabiliza construção da FICO**. 2020c. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/assinarenovacoes>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **MRS Logística S.A.** [2022]b. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/mrs-logistica-sa>. Acesso em: 19 ago. 2022.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Projetos concluídos – 6 encontrados**. [2022]c. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/projetos1#/s/Conclu%C3%ADdos/u//e/Ferrovias/m//r/>. Acesso em: 19 ago. 2022.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Projetos em andamento – 5 encontrados**. [2022]d. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/projetos1#/s/Em%20andamento/u//e/Ferrovias/m//r/>. Acesso em: 19 ago. 2022.

BRASIL. Conselho do Programa de Parcerias de Investimentos. Secretaria Especial do Programa de Parcerias de Investimentos. Programa de Parcerias de Investimentos (PPI). **Relicitação do Contrato de Concessão da Malha Oeste**. [2022]e. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/relicitacao-do-contrato-de-concessao-da-malha-oeste>. Acesso em: 30 jan. 2022.

BRASIL, Cristophe Mendes. **Desenvolvimento de Modelos de Avaliação de Desempenho em Gestão de Projetos utilizando os métodos AHP e MAUT**. Orientador: António Carlos Bárbara Grilo. 2016. 102 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial) - Universidade Nova de Lisboa, [Lisboa], 2016. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/18485/1/Brasil_2016.pdf. Acesso em: 1 fev. 2022.

BRASIL. Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. Estabelece a Lei das Ferrovias. **Diário Oficial da União**: seção 1 – Extra C, Brasília, DF, ano 159, n. 241-C, p. 32, 23 dez. 2021c.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Plano Nacional de Logística Portuária (PNLP)**: diagnóstico da situação atual do setor portuário brasileiro. Diagnóstico da Situação Atual do Setor Portuário Brasileiro. [2020]d. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/2-09-pdf>. Acesso em: 25 jan. 2021.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Centro de excelência vai possibilitar crescimento de pesquisas no transporte ferroviário**: Ministro Tarcísio Gomes de Freitas e o governador de Goiás, Ronaldo Caiado, formalizaram protocolo de intenções para criação do espaço em Anápolis. 2021d. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt->

br/assuntos/noticias/2021/7/centro-de-excelencia-vai-possibilitar-crescimento-de-pesquisas-no-transporte-ferroviario. Acesso em: 30 jan. 2022.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Pro Trilhos**: Programa de Autorizações Ferroviárias. [2022]f. Disponível em: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre_antigo/programa-de-autorizacoes-ferroviarias. Acesso em: 19 ago. 2022.

BRASIL. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MTPA). **Plano Mestre**: Complexo Portuário de Imbituba. [Brasília]: MTPA, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/pm12-pdf>. Acesso em: 22 ago. 2021.

BRASIL. **Novo Contrato de Concessão da Malha Paulista é Assinado**: concessionária irá investir mais de R\$ 6 bilhões em obras, trilhos, vagões e locomotivas. Concessionária irá investir mais de R\$ 6 bilhões em obras, trilhos, vagões e locomotivas. 2020e. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/05/novo-contrato-de-concessao-ferroviaria-da-malha-paulista-e-assinado>. Acesso em: 25 jan. 2021.

CABRAL, Eric Wilson Santos. **A Eficiência Energética do Consumo de Combustível em uma Ferrovia Heavy Haul**. 2017. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Vitória, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufes.br/bitstream/10/9483/1/tese_11246_ERIC%20WILSON%20SANTOS%20CABRAL.pdf. Acesso em: 25 jan. 2021.

CANUTO, Daniel Cuissi. **Avaliação de Nível de Serviço dos fornecedores**: Um estudo de caso na Log-In Logística Intermodal S/A. Orientador: Rogério da Silva Nunes. 2007. 77 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) (Bacharelado em Administração) - Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/131113>. Acesso em: 30 jan. 2022.

CARDOSO, Ricardo Lopes; RICCIO, Edson; LOPES, Alexsandro Broedel. O Processo Decisório em um Ambiente de Informação Contábil: Um Estudo Usando a Teoria dos Prospectos. **BASE - Revista de Administração e Contabilidade da Unisinos**, [São Leopoldo], ano maio/agosto 2008, v. 5, n. 2, p. 85-95, 10 fev. 2012. Disponível em: <https://pesquisa-eaesp.fgv.br/sites/gvpesquisa.fgv.br/files/arquivos/5179-16471-1-sm.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2022.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKE, Bruno Hartmut. **Análise de Investimentos**: manual para solução de problemas e tomadas de decisões. 12. ed. São Paulo: Atlas, 2020. 390 p.

CHEN, Chongshuang; DOLLEVOET, Twan; ZHAO, Jun. One-block train formation in large-scale railway networks: an exact model and a tree-based decomposition algorithm. **Transportation Research Part B: Methodological**, [S.L.], v. 118, p. 1-30, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2018.10.003>.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso Celso. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: teoria & aplicações**. 3. ed. São Paulo: Ed. dos Autores, 2010.

COOPER, Harris.; HEDGES, Larry. **The Handbook of research synthesis and meta-analysis**. London: Sage, 2009.

DENG, Lianbo *et al.* How to Balance the Relationship between Train Formation and Service Frequency. **Icte** 2013, [S.L.], p. 3003-3007, 9 out. 2013. American Society of Civil Engineers. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784413159.435>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Rio de Janeiro: IPR, 1999. 195 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários: Escopos Básicos/Instruções de Serviço**. [Rio de Janeiro]: IPR, 2006. 484 p. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/726_diretrizes_basicas-escopos_basicos-instrucoes_de_servico.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Glossário de Termos Ferroviários**. [2021]. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/centrais-de-conteudo/glossariotermosferroviarios.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **ISF-227: Estudos Operacionais**. 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/instrucoes-de-servicos-ferroviarios/isf-227-estudos-operacionais.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2021.

DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015. 181 p.

FABRO, Carlos Roberto. **Diagnóstico e Proposta para o Cálculo de Custo de Transporte em uma Ferrovia: caso ferroeste**. 2015. 12 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Engenharia de Produção, Centro Politécnico, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/43312/R%20-%20E%20-%20CARLOS%20ROBERTO%20FABRO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 jan. 2021.

FERNANDES, Kleber dos Santos. **Logística: Fundamentos e Processos**. 1. ed. rev. Curitiba: IESDE Brasil, 2012. 160 p.

FERROVIA TEREZA CRISTINA (FTC). **Dados Pesquisa de Mestrado**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <guikluch@hotmail.com>. em: 28 jul. 2021.

FERROVIA TEREZA CRISTINA (FTC). **Em Números**. [2020]. Disponível em: <https://www.ftc.com.br/home>. Acesso em: 18 jul. 2021.

FREITAS, Henrique et al. **Informação e Decisão: Sistemas de Apoio e seu Impacto**. Porto Alegre: Atlas, 1997.

FUNDACIÓN DE LOS FERROCARRILES ESPAÑOLES (FFE). **Deliverable D 1.1: a comprehensive map of rail innovative research and key rail stakeholders**. A Comprehensive Map of Rail Innovative Research and Key Rail Stakeholders. 2019. Disponível em: https://ter4rail.eu/wp-content/uploads/2019/09/TER4RAIL_D11_A_comprehensive_map_of_rail_innovative_research_and_key_rail_stakeholders.pdf. Acesso em: 26 jan. 2021.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro. **Teoria da Decisão**. São Paulo: Thomson Learning, 2007. 116 p. (Coleção debates em administração).

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro *et al.* Uma Abordagem Multicritério para a Seleção de Ferramentas de *Business Intelligence*. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação**, [S.I.], v. 10, n. 02, p. 1-28, 27 dez. 2011. IBEPES (Instituto Brasileiro de Estudos e Pesquisas Sociais). <http://dx.doi.org/10.5329/resi.2011.1002005>.

GOMES, Luiz Flavio Autran Monteiro; GOMES, Carlos Francisco Simões. **Princípios e Métodos para Tomada de Decisão: enfoque multicritério**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019. 341 p.

GOODMAN, C.J.; SIU, L.K.; HO, T.K.. A Review of Simulation Models for Railway Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN MASS TRANSIT SYSTEMS, 1998, Londres. **Conference Publication No. 543**. [S. I.]: Iet, 1998. p. 80-85.

GOUGH, David; OLIVER, Sandy; THOMAS, James. **An Introduction to Systematic Reviews**. London: Sage, 2012.

GRUPO ÂNIMA EDUCAÇÃO. **Manual - Revisão Bibliográfica Sistemática Integrativa: a pesquisa baseada em evidências**. Belo Horizonte: Grupo Ânima Educação, 2014. 58 p.

GUGLIELMETTI, Fernando Ribeiro; MARINS, Fernando Augusto Silva; SALOMON, Valério Antonio Pamplona. Comparação Teórica entre Métodos de Auxílio à Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios. **Anais do SBPO**, Natal, 2003. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~ademir/sbpo/sbpo2003/pdf/arq0131.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

HASHIBA, Tiffany Ide. **Metodologia para Escolha de Modal de Transporte, do Ponto de Vista da Carga, Através da Aplicação do Método de Análise Hierárquica**. 2012. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Escola Politécnica de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo (Usp), São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-21062013-100030/publico/Diss_Hashiba_Tiffany_Ide.pdf. Acesso em: 25 jan. 2021.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Relatório Técnico nº 89 350-205: Ensaio de Desempenho de Locomotiva Lastreada Modelo GM12.** São Paulo: IPT, 2006.

KAHNEMAN, Daniel; TVERSKY, Amos. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. **Econometrica**, [New Haven], ano mar 1979, v. 47, n. 2, p. 263-292, 1979. DOI [https://doi.org/0012-9682\(197903\)47:2<263:PTAAOD>2.0.CO;2-3](https://doi.org/0012-9682(197903)47:2<263:PTAAOD>2.0.CO;2-3). Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1914185>. Acesso em: 31 jan. 2022.

KEENEY, Ralph; RAIFFA, Howard. **Decision Analysis with Multiple Conflicting Objectives, Preferences and Value Tradeoffs.** Laxenburg: IIASA Working Paper, 1975. Disponível em: <http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/375/1/WP-75-053.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

KHAN, Khalid s *et al.* Five Steps to Conducting a Systematic Review. **Journal Of The Royal Society Of Medicine**, [S. I.], v. 96, n. 96, p. 118-121, mar. 2003. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/014107680309600304>. Acesso em: 27 jan. 2021.

KOZACHENKO, Dmytro *et al.* An optimization method of the multi-group train formation at flat yards. **International Journal Of Rail Transportation**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 61-78, 20 mar. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/23248378.2020.1732235>.

LAN, Zekang *et al.* Optimizing Train Formation Problem With Car Flow Routing and Train Routing by Benders-and-Price Approach. **Ieee Access**. [S.I.], p. 178496-178510. dez. 2019.

LAUTALA, Pasi; POURYOUSEF, Hamed. Evaluating the Use of Operational Management Techniques for Capacity Improvements on Shared-use Rail Corridors. **National Center for Freight and Infrastructure Research and Education (CFIRE)**, Madison, 2016.

LAVRUKHIN, Oleksandr *et al.* Formation of a model for the rational placement of cars with dangerous goods in a freight train. **Procedia Computer Science**. Riga, p. 28-35. nov. 2018.

LAZAREV, Alexander A.; MUSATOVA, Elena G.. The Problem of Trains Formation and Scheduling: Integer Statements. **Automation And Remote Control**. [S.I.], p. 2064-2068. dez. 2013.

LIN, Boliang *et al.* An Optimization Approach to the Low-Frequency Entire Train Formation at the Loading Area. **Sustainability**. [S. I.], p. 1-15. set. 2019.

LIN, Boliang *et al.* Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. **Applied Mathematical Modelling**. [S. I.], p. 811-830. maio 2021.

LIN, Boliang; ZHAO, Yinan. The Systematic Optimization of Train Formation in Loading Stations. **Symmetry**. Benasque, p. 1-18. set. 2019.

LOBO, Alexandre. **Ferrovias: minério em alta, soja com espaço para crescer.** 2019. Disponível em: <https://www.ilos.com.br/web/tag/transporte-ferroviario-de-carga/>. Acesso em: 01 jun. 2021.

LOUZADA, Patricia Costa *et al.* Estratégia de utilização da folga de tração de trens para planejamento da distribuição de vagões vazios. **Transportes**, [S.L.], v. 26, n. 2, p. 155-166, 31 ago. 2018. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v26i2.1537>.

MARSARO, Mônica Frank. **Estudo de Robustez e Análise de Sensibilidade no modelo Multicritério para Gerenciamento de Risco em Gasodutos baseado em MAUT**. Orientador: Adiel Teixeira de Almeida. 2013. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/12607/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O%20M%c3%b4nica%20Frank%20Marsaro.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

MIRANDA, Caroline Maria Guerra de; ALMEIDA, Adiel Teixeira de. Visão Multicritério da Avaliação de Programas de Pós-Graduação pela CAPES: O Caso da Área Engenharia III Baseado nos Métodos Electre II e MAUT. **Gestão e Produção**, São Carlos, ano jan./abr. 2004, v. 11, n. 1, p. 51-64, 2004.

MURGEL, Liége M. S. Firmino; GUALDA, Nicolau D. Fares. Modelo para formação de composições ferroviárias. **Transportes**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 30-63, 17 abr. 1999. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v7i1.219>.

NABAIS, Rui José da Silva. **Manual básico de engenharia ferroviária**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

NASCIMENTO, Fabiano César Gomes; ROSA, Rodrigo de Alvarenga. Modelo matemático para planejamento da distribuição de locomotivas para atendimento à demanda de formação de trens. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 26, n. 2, 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530x-2557-19>.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE TRANSPORTE E LOGÍSTICA (ONTL). Empresa de Planejamento e Logística S.A. (EPL). **Anuário Estatístico de Transporte: movimentação de cargas - ferroviário**. Movimentação de Cargas - Ferroviário. [2021]. Disponível em: <https://ontl.epl.gov.br/paineis-analiticos/painel-do-anuario-estatistico/movimentacao-de-carga-por-modo-de-transporte/ferroviario/>. Acesso em: 25 jan. 2021.

OPENTRACK RAILWAY TECHNOLOGY LTD (OPENTRACK). **Railway Simulation**. c2021. Disponível em: http://www.opentrack.ch/opentrack/opentrack_e/opentrack_e.html#Events. Acesso em: 26 jan. 2021.

PAIVA, Cassio Eduardo Lima de. **Super e infraestruturas de ferrovias: critérios para projeto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PEREIRA, Ivone Vieira; SILVA, César Augusto Tibúrcio; TAVARES JÚNIOR, Ednilto Pereira. Comportamento Decisório dos Contadores sob a Perspectiva da Teoria do Prospecto. **Revista Ambiente Contábil**, Natal, ano jul./dez. 2017, v. 9, n. 2, p. 222 - 239, 10 jul. 2017.

PEREIRA, Olyntho Carmo. **Soluções de Otimização da Eficiência Energética de uma Ferrovia de Carga: O caso da Estrada de Ferro Carajás - EFC**. Orientador: José Eugenio

Leal. 2009. 126 p. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=14568@1>. Acesso em: 20 jun. 2022.

PINHEIRO, Armando Castelar; RIBEIRO, Leonardo Coelho. **Regulação das Ferrovias**. Rio de Janeiro: FGV, 2017. 452 p.

PONTES FILHO, Glauco. **Estradas de Rodagem: projeto geométrico**. São Carlos: Glauco Pontes Filho, 1998. 432 p.

POURYOUSEF, Hamed; LAUTALA, Pasi; WHITE, Thomas. Evaluating the Use of Operational Management Techniques for Capacity Improvements on Shared-use Rail Corridors. **Annual Meeting of the Transportation Research Board**, Washington, 2013.

POURYOUSEF, Hamed; LAUTALA, Pasi; WHITE, Thomas. Railroad capacity tools and methodologies in the U.S. and Europe. **Journal of Modern Transportation**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 30–42, 2015.

PRADO, Darci Santos do. **Teoria das Filas e da Simulação**. 6. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2017. 152 p. (Série Pesquisa Operacional, vol. 2).

PRESSI, Roberto André. **Tomada de Decisão de Investimento Através do Método Multicritério para Fins de Planejamento da Expansão da Distribuição**. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2017. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/169328/001047965.pdf?sequence=1>. Acesso em: 26 jan. 2021.

PRÉVE, Altamiro Damian; MORITZ, Gilberto de Oliveira; PEREIRA, Maurício Fernandes. **Organização, Processos e Tomada de Decisão**. Florianópolis: UFSC, 2010. 186 p. Disponível em: http://www.ead.uepb.edu.br/arquivos/licitacao_livros_admpub/07-organiza%E7%E3o%20processos%20e%20tomada%20de%20decis%F5es/Livro_grafica%20organiza%E7%E3o%20de%20%20processos%20e%20tomada%20de%20decis%E3o.pdf. Acesso em: 1 fev. 2022.

RAIL MANAGEMENT CONSULTANTS INTERNATIONAL GMBH (RMCon). **Our Software**: RailSys® – My favourite software at work. c2020a. Disponível em: <https://www.rmcon-int.de/railsys-en/>. Acesso em: 26 jan. 2021.

RAIL MANAGEMENT CONSULTANTS INTERNATIONAL GMBH (RMCon). **Workflow**. c2020b. Disponível em: <https://www.rmcon-int.de/railsys-en/workflow/>. Acesso em: 26 jan. 2021.

RANGEL, Luís Alberto Duncan; GOMES, Luiz Flávio Autran Monteiro. O Apoio Multicritério à Decisão na avaliação de candidatos. **Revista Produção**, [Florianópolis], ano jan./mar. 2010, v. 20, n. 1, p. 92-101, 2010. DOI 10.1590/S0103-65132010005000016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/prod/a/YjZDzFWtSX7Rmt5y9J4gvgn/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 1 fev. 2022.

REVISTA FERROVIÁRIA (RF). **Obras da Fico deverão começar em maio, diz Freitas**. 2021. Disponível em: <https://revistaferroviaria.com.br/2021/04/obras-da-fico-deverao-comecar-em-maio-diz-freitas/>. Acesso em: 30 jan. 2022.

ROSA, Rodrigo de Alvarenga. **Operação Ferroviária: planejamento, dimensionamento e acompanhamento**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

ROTHER, Edna Terezinha. Revisão Sistemática x Revisão Narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 20, n. 2, p. v-vi, abr.- jun. 2007. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/3070/307026613004.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2021.

SANTOS, Silvio dos. Portogente. **A capacidade dos trens de carga**. 2007. Disponível em: <https://portogente.com.br/artigos/13884-a-capacidade-dos-trens-de-carga>. Acesso em: 23 maio 2020.

SANTOS, Silvio dos. **Transporte Ferroviário: história e técnicas**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

SANTOS, Silvio dos. **Um Estudo sobre a Participação do Modal Ferroviário no Transporte de Cargas no Brasil**. 2005. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2005. Disponível em: http://www.projetosparaobrasil.com.br/Arquivos/Santos_ferrovia_dissert.pdf. Acesso em: 25 jan. 2021.

SHAFIA, M A; SADJADI, S J; JAMILI, A. Robust train formation planning. **Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, [S.L.], v. 224, n. 2, p. 75-90, 8 dez. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1243/09544097jrrt295>.

SILVA, Amado da Costa e. **Uma Introdução À Engenharia Ferroviária**. 2. ed. S.I: Clube de Autores, 2015. 121 p.

SILVA, Vanessa Batista de Sousa; SCHRAMM, Fernando; CARVALHO, Hugo Riccely Cunha de. O uso do método PROMETHEE para seleção de candidatos à bolsa-formação do Pronatec. **Production**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 548-558, 23 ago. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132013005000048>. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132014000300005. Acesso em: 26 jan. 2021.

SMITH, Valerie *et al.* Methodology in conducting a systematic review of systematic reviews of healthcare interventions. **Bmc Medical Research Methodology**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 1-6, 3 fev. 2011. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/1471-2288-11-15>.

TORRINHA, RITA. G1 AP. **Sem uso, estação e ferrovia de 194 km no Amapá são alvos de saques e invasões há cinco anos: sem poder de polícia, ação do governo se limita a registrar denúncias e fiscalizar áreas, em meio a entraves judiciais. Sem poder de polícia, ação**

do governo se limita a registrar denúncias e fiscalizar áreas, em meio a entraves judiciais. 2018. Disponível em: <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2018/10/06/sem-uso-estacao-e-ferrovia-de-194-km-no-amapa-sao-alvos-de-saques-e-invasoes-ha-cinco-anos.ghtml>. Acesso em: 26 jan. 2021.

VALEC ENGENHARIA CONSTRUÇÕES E FERROVIAS SA (VALEC). **Especificações de Projeto**: Estudos de Traçado. [Brasília]: VALEC, 2011. 1 p. Disponível em: https://www.valec.gov.br/documentos/normativos_tecnicos/especificacoes_de_projeto/Estudo%20de%20tra%C3%A7ado%20-%2080-EG-000A-26-0000%20Rev1.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

VALEC ENGENHARIA CONSTRUÇÕES E FERROVIAS SA (VALEC). **Especificações de Projeto**: Estudos Geotecnológicos. [Brasília]: VALEC, 2019. 47 p. Disponível em: https://www.valec.gov.br/documentos/normativos_tecnicos/especificacoes_de_projeto/Estudo%20Geol%C3%B3gicos%2080-EG-000A-29-000%20E2%80%93%20Revis%C3%A3o%20n%C2%B0%2008.pdf. Acesso em: 30 jan. 2022.

VALEC ENGENHARIA CONSTRUÇÕES E FERROVIAS SA (VALEC). **Manual de Elaboração dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental da VALEC**. [Brasília]: VALEC, 2018. 106 p. Disponível em: https://www.valec.gov.br/documentos/normativos_tecnicos/Estudos_de_viabilidade/Manual-EVTEA-Aprovado-em-28-08-18.pdf. Acesso em: 20 abr. 2021.

VALEC ENGENHARIA, CONSTRUÇÕES E FERROVIAS S.A. (VALEC). **Regulamento de Operação Ferroviária (ROF) - Revisão 01**. Brasília: VALEC, 2016. 85 p. Disponível em: https://www.valec.gov.br/documentos/operacoes_ferrovias/regimento_interno/ROF%20-%20Regulamento%20de%20Opera%C3%A7%C3%B5es%20Ferrovi%C3%A1ria%20-%20Revis%C3%A3o%2001.pdf. Acesso em: 10 maio 2020.

XIA, Xiaomei; DING, Yong; WEN, Xin. Optimization study on multiple train formation scheme of urban rail transit. **AIP Conference Proceedings**. [S. I.], p. 1-6. maio 2018.

WANG, Lihua; PEN, Qiyuan; ZHANG, Zhanjun. A Network Method of Synthetic Optimization of Car Flow Route and Train Formation Plan. **International Conference On Transportation Engineering 2009**, [S.L.], p. 1027-1032, 29 jul. 2009. American Society of Civil Engineers. [http://dx.doi.org/10.1061/41039\(345\)170](http://dx.doi.org/10.1061/41039(345)170).

WANG, M.; LIN, S.; LO, Y. The Comparison Between MAUT and PROMETHEE. **Proceedings of the 2010 IEEE IEEM**, Macao, 2010.

XIAO, Jie; LIN, Boliang. Comprehensive optimization of the one-block and two-block train formation plan. **Journal Of Rail Transport Planning & Management**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 218-236, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.09.002>.

XIAO, Jie; LIN, Boliang; WANG, Jiayi. Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and

tabu search. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, [S.L.], v. 86, p. 124-146, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006>.

YAGHINI, Masoud; MOMENI, Mohsen; SARMADI, Mohammadreza. An improved local branching approach for train formation planning. **Applied Mathematical Modelling**. [S. I.], p. 2300-2307. maio 2012a.

YAGHINI, Masoud; MOMENI, Mohsen; SARMADI, Mohammadreza. A hybrid solution method for fuzzy train formation planning. **Applied Soft Computing**. [S.I.], p. 257-265. mar. 2015.

YAGHINI, Masoud; MOMENI, Mohsen; SARMADI, Mohammadreza. Solving train formation problem using simulated annealing algorithm in a simplex framework. **Journal Of Advanced Transportation**. [S. I.], p. 402-416. mar. 2012b.

ZHAO, Yinan; LIN, Boliang. The Multi-Shipment Train Formation Optimization Problem Along the Ordered Rail Stations Based on Collection Delay. **IEEE Access**. [S. I.], p. 75935-75948. jun. 2019.