

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

HENDRIGO VENES

**PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOTES DE
VAGÕES VAZIOS A PARTIR DE PÁTIOS DE TRIAGEM
PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE CARREGAMENTO
DAS MINAS**

VITÓRIA/ES
2019

HENDRIGO VENES

**PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOTES DE
VAGÕES VAZIOS A PARTIR DE PÁTIOS DE TRIAGEM
PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE CARREGAMENTO
DAS MINAS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Transportes.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA
2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

P436p Pereira, Hendrigo Venes, 1986-
Planejamento da distribuição de lotes de vagões vazios a
partir de pátios de triagem para atendimento à demanda de
carregamento das minas / Hendrigo Venes Pereira. – 2019.
92 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Engenharia de transportes. 2. Programação linear.
3. Programação (Matemática). 4. Ferrovias – Vagões de carga.
5. Transporte ferroviário de carga – Vagões – Pátios. 6. Modelos
matemáticos. I. Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

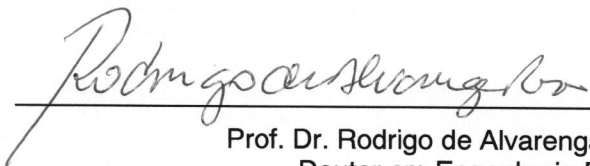
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO DE LOTES DE VAGÕES VAZIOS A PARTIR DE PÁTIOS DE TRIAGEM PARA ATENDIMENTO À DEMANDA DE CARREGAMENTO DAS MINAS

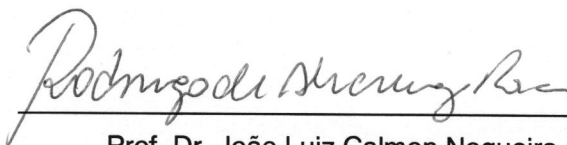
Hendrigo Venes

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Transportes.

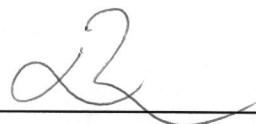
Aprovada no dia **29 de março de 2019** por:



Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Doutor em Engenharia Elétrica
Orientador – UFES



Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Interno – UFES



Prof. Dr. Leandro Colombi Resendo
Doutor em Engenharia Elétrica
Examinador Externo - IFES - Serra

Vitória – ES, março de 2019

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos meus familiares pelo apoio, mas em especial minha tia Sueli. Com ela aprendi a importância da vida acadêmica, a importância do *Stricto Sensu* na formação profissional. Com ela também aprendi a importância da família, pois independente de qualquer circunstância ela sempre colocou os familiares em primeiro lugar, de coração sempre aberto.

Ao Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, o qual além de orientador tornou-se um grande amigo. Agradeço por acreditar em minha capacidade, por incentivar a continuação desse trabalho em períodos difíceis, por compartilhar seus vastos conhecimentos na área de ferrovias. Tenho uma profunda admiração pelo seu dom de ensinar com paixão, pela paciência, pela simplicidade e eficiência a todos que te cercam. Obrigado pela oportunidade de realizar este trabalho ao seu lado, “ombro a ombro”, por ter orientado do zero um aluno elevando o mesmo ao título de Mestre. Levarei comigo todas lembranças desses dois anos de aprendizado, do LAMMEP “ao infinito e além!”

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade e participação da banca, pelo tempo dedicado à leitura, comentários e sugestões.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pela concessão da bolsa para esse projeto de mestrado.

A VALE S/A, ao pessoal do Centro de Operação de Controle da EFVM e ao Rodrigo Pirola pela ajuda, pelos dados e esclarecimentos.

Aos amigos “lammepeanos” por toda ajuda, pelas risadas e tempo de laboratório.

Ao meu amigo Éder Greaff, sempre pronto e disposto a ajudar em múltiplos assuntos desse trabalho.

Ao Mateus de Oliveira, pela paciência e pelo incentivo em momentos de dificuldade. Por estar sempre presente, o meu muito obrigado.

Por fim, agradeço e dedico este trabalho aos meus pais por terem me tornado o homem que sou hoje. Agradeço por toda vida priorizarem seus filhos, nos colocando

sempre em primeiro lugar. Meus pais sempre me incentivaram, me alavancaram, sempre confiaram e apoiaram minhas decisões. Sei que não mediram esforços para que meus sonhos se realizassem. Pela força, pelo esforço, pelo carinho de vocês, além desta conquista, dedico aos dois todo meu amor.

*“Lembra-te sempre: cada dia nasce de um
novo amanhecer...”*

Francisco Cândido Xavier

RESUMO

As ferrovias brasileiras são responsáveis por 20,7% do transporte das cargas movimentadas no país, tais como: minério de ferro, grãos, produtos siderúrgicos, cimento, cal, adubos e fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral, clínquer, contêineres, dentre outros (CNT, 2018). O minério de ferro (MFe) representa 77,45% do percentual total do transporte de cargas brasileiro (ANTT, 2019). Dentre as empresas que possuem participação no mercado ferroviário brasileiro destaca-se a Vale S/A, responsável pelo gerenciamento da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM). A EFVM realiza o transporte de minério de ferro das 13 minas da Vale S/A no Estado de Minas Gerais para o Porto de Tubarão no Espírito Santo. No entanto, os vagões retornam vazios para carregar nas minas. O objetivo desse trabalho é propor um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para distribuição de vagões a partir de pátios de triagem para atender a demanda por vagões vazios nas minas. Utilizando o *solver* CPLEX 12.8 para executar o modelo foi desenvolvida uma metodologia para minimizar o desmembramento de lotes de vagões nos pátios de triagem e de origem, além de minimizar o tempo de percurso dos trens. Utilizando dados reais da EFVM, foi possível fazer um comparativo entre as distribuições e constatar que o CPLEX encontrou soluções ótimas em tempos muito baixos de execução, distribuindo os lotes de vagões vazios com menos desmembramentos que a distribuição realizada pela EFVM de forma manual.

Palavras-chaves: *Distribuição de Vagões vazios. Programação Linear Inteira Mista. Operação Ferroviária. Transporte Ferroviário.*

ABSTRACT

Brazilian railroads are responsible for 20.7% of the cargo transportation in the country, such as: iron ore, grains, steel products, cement, lime, fertilizers, petroleum products, lime, coal, clinker, containers, among others (CNT, 2018). Iron ore (FeO) represents 77.45% of the total percentage of Brazilian cargo transportation (ANTT, 2019). Among the companies in Brazilian rail market is Vale S / A, the company is responsible for the management of the Vitória Minas Railroad (EFVM). EFVM carries out the iron ore transport of the 13 Vale S / A mines in the State from Minas Gerais to the Port of Tubarão in Espírito Santo. However, the wagons return empty to load in the mines. This paper aims to propose a mathematical model of Mixed Integer Linear Programming for distribution of wagons from sorting yards to meet the demand for empty wagons in the mines. Using the CPLEX 12.8 *solver* to execute the model, a methodology was developed to minimize the dismemberment of lots of wagons in the sorting and origin yards, in addition to minimizing the trains' travel time. Using EFVM data, it was possible to compare the distributions and it was found that CPLEX finds optimal solutions in very low execution times, distributing batches of empty wagons with less dismemberment than manual distribution done by EFVM team.

Keywords: *Empty wagon distribution. Mixed Integer Linear Programming. Railroad operation. Railroad transportation.*

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 - Minas e Pátios da EFVM.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2 - Estrutura da Dissertação.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 3 - Etapas da metodologia da pesquisa</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4 - Estrada de Ferro Vitória a Minas.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 5 - Minas e pátios foco dessa dissertação.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 6 - Distribuição a partir das origens passando pelos pátios de triagem.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7 - Distribuição a partir das origens diretamente às minas.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 8 - Distribuição de lotes representada com fluxo de rede.</i>	<i>43</i>
<i>Figura 9 - Fluxo do trem 1 com 3 lotes de vagões vazios.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 10 - Fluxo de trem na origem 2 com 3 lotes de vagões vazios.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 11 - Distribuição da Instância 1 pelo solver CPLEX.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 12 - Distribuição da Instância 2 pelo solver CPLEX.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 13 - Distribuição da Instância 3 pelo solver CPLEX.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 14 - Distribuição da Instância 4 pelo solver CPLEX.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 15 - Distribuição da Instância 5 pelo solver CPLEX.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 16 - Distribuição da Instância 6 pelo solver CPLEX.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 17 - Distribuição da Instância 7 pelo solver CPLEX.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 18 - Distribuição da Instância 8 pelo solver CPLEX.</i>	<i>82</i>
<i>Figura 19 - Distribuição da Instância 9 pelo solver CPLEX.</i>	<i>84</i>
<i>Figura 20 - Distribuição da Instância 10 pelo solver CPLEX.</i>	<i>86</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Instâncias para avaliação do modelo matemático.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 2: Dados do modelo matemático proposto.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabela 3 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 01.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 4 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 02.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 03.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 04.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 7 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 05.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 8 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 06.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 9 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 07.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 10 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 08.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 11 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 09.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 12 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 10.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 13 - Resultados do CPLEX.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 14 - Comparativo das distribuições para a Instância 1.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 15 – Comparativo das distribuições para a Instância 2.</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 16 – Comparativo das distribuições para a Instância 3.</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 17 - Comparativo das distribuições para a Instância 4.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 18 - Comparativo das distribuições para a Instância 5.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 19 - Comparativo das distribuições para a Instância 6.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 20 - Comparativo das distribuições para a Instância 7.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 21 - Comparativo das distribuições para a Instância 8.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 22 - Comparativo das distribuições para a Instância 9.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 23 - Comparativo das distribuições para a Instância 10.....</i>	<i>85</i>

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comparativo de desmembramentos entre CPLEX e Equipe EFVM.....66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1.2	JUSTIFICATIVA	18
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	O PROBLEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS	20
2.1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS.....	21
3	MÉTODO DE PESQUISA	30
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA	30
3.2	ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA	31
3.3	PROBLEMA ESTUDADO	32
3.4	LEVANTAMENTO DE DADOS E CRIAÇÃO DE INSTÂNCIAS	39
3.4.1	INSTÂNCIAS DE TESTE	39
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO.....	42
5	RESULTADOS E ANÁLISES.....	61
6	CONCLUSÃO	88
6.1	TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS.....	90

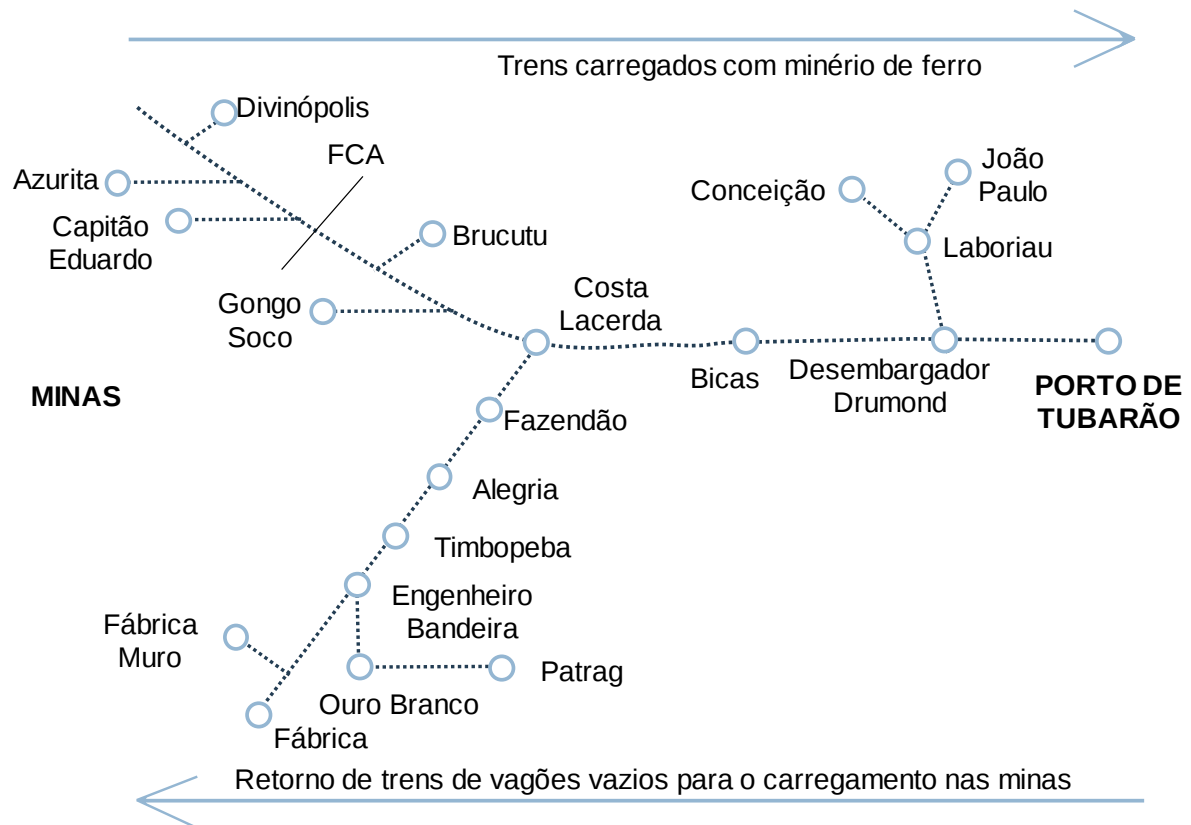
1 INTRODUÇÃO

As ferrovias brasileiras são responsáveis por 20,7% do transporte das cargas movimentadas no país, tais como: minério de ferro, produtos agrícolas, produtos siderúrgicos, cimento, cal, fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral, clínquer, contêineres, dentre outros (CNT, 2018). O minério de ferro (MFe) representa 77,45% do percentual total do transporte brasileiro de cargas (ANTT, 2019). Dentre as empresas que possuem participação no mercado ferroviário brasileiro destaca-se a Vale S/A, responsável, dentre outras ferrovias, pelo gerenciamento da Estrada de Ferro Vitória Minas (EFVM). A EFVM é a terceira ferrovia mais produtiva do Brasil, respondendo por 21,80% do transporte de carga do país (ANTT, 2019). De acordo com a VALE S/A (2019), o transporte de minério de ferro da EFVM tem início com a definição do volume anual de transporte, de onde são obtidos os volumes mensais e diários de carregamento.

A prática do transporte ferroviário de MFe no Brasil mostra que a maior parte dos trens, sobretudo, os que transportam MFe, retornam com vagões vazios do pátio de descarga, porto, para os pátios de carregamento, as minas. Isso ocorre porque o minério de ferro, em sua grande maioria, é destinado à exportação, não havendo carga de retorno na maior parte do transporte ferroviário. Assim, realizar a distribuição desse retorno de vagões vazios de forma mais eficiente, pode trazer reduções de custo para a ferrovia.

Esta dissertação, analisa a distribuição de lotes de vagões vazios realizada pela EFVM, que como citado, é umas das mais importantes ferrovias do Brasil no transporte de MFe, para carregamento nas 13 minas da Vale S/A no Estado de Minas Gerais para o Porto de Tubarão no Espírito Santo, conforme a Figura 1.

Figura 1 - Minas e Pátios da EFVM.



Fonte: O autor, 2019

No retorno dos lotes de vagões de vazio do pátio do Porto de Tubarão para as minas existe uma única linha até o Pátio de triagem de Desembargador Drumond. A partir desse pátio, existem três destinos possíveis: Pátio de triagem de Costa Lacerda, Pátio de triagem de Laboriau e a mina de Bicas. A partir do pátio de Costa Lacerda, pode-se ir para o ramal de Belo Horizonte, onde estão as minas de Brucutu e Gongo Soco e ainda as minas de Azurita, Divinópolis e Capitão Eduardo, as quais encontram-se em outra ferrovia (Ferrovia Centro Atlântica (FCA)), sendo que os trens da EFVM chegam a estas minas circulando sob o regime de tráfego mútuo com a FCA. A partir de Costa Lacerda também pode-se ir para o pátio de triagem de Fazendão, no ramal de Fábrica com várias minas.

A partir do pátio de Laboriau, pode-se ir as minas de João Paulo e Conceição. Os trens podem chegar em Desembargador Drumond com uma formação de até 4 lotes de 84 vagões (existem as condições de 1 Lote – 84 vagões, 2 Lotes – 168 vagões, 3 Lotes – 252 vagões e 4 lotes – 336 vagões (somente vazios)).

Há ainda uma outra origem de lotes de vagões vazios que é o pátio de Ouro Branco, aproximadamente 10% dos lotes, que pode atender as minas de Patrag, Fábrica e Fábrica Muro. Por questões operacionais, Ouro Branco forma trens apenas com um lote, logo, não há desmembramentos nessa origem. Entretanto, pode haver formação de trens no Pátio de Engenheiro Bandeira (VALE, 2019).

O problema enfrentado pelos responsáveis em realizar o planejamento da EFVM é planejar a partir do pátio de Desembargador Drumond e do pátio de Ouro Branco, a distribuição mais eficiente dos lotes de vagões vazios das minas. O objetivo principal do planejamento é reduzir o número de desmembramentos dos lotes dos trens nos pátios de triagem de Drumond, Laboriau, Costa Lacerda, Fazendão e Engenheiro Bandeira. Porém, também é importante reduzir o tempo total de viagem entre o pátio de Desembargador Drumond e as minas.

O desmembramento de trens, que leva cada um aproximadamente 5 horas para ser realizado, aumenta os custos operacionais, pois equipes devem ser designadas para trabalhar no desmembramento dos trens. Pode, ainda, gerar um aumento do ciclo de vagões, o que pode demandar maior quantidade de vagões vazios para atender a demanda de transporte.

A proposição de técnicas de otimização para uma melhor distribuição de vagões ao longo dos pátios ferroviários torna-se um assunto importante no âmbito ferroviário. Dessa forma, essa dissertação propõe um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para distribuição de vagões a partir de diversos pátios de triagem para atender a demanda por vagões vazios visando reduzir o desmembramento de lotes de vagões nos pátios de triagem e nos pátios de origem atendendo a demanda por vagões vazios para carregamento nas minas.

Na literatura, foram encontrados vários artigos sobre a distribuição de vagões vazios conforme apresentado no Capítulo 2. Entretanto, após a revisão bibliográfica, até o momento não foi encontrado nenhum artigo que tivesse o objetivo de distribuir lotes de vagões vazios visando a minimização de desmembramento de lotes dos trens. Os artigos de Barros (2008, 2010) trataram de problema semelhante ao tratado neste artigo, porém não consideraram como objetivo a minimização de desmembramento de lotes de vagões dos trens que é o foco principal da ferrovia estudada nessa

dissertação. Assim, é apresentada uma abordagem diferenciada para a distribuição de lotes de vagões vazios a partir de vários pátios de triagem adequada a necessidade do problema estudado. Vale ressaltar que a abordagem pode ser utilizada por qualquer outra ferrovia que possua pontos de carregamento dispersos geograficamente atendidos por vários pátios de triagem e sejam impactadas pelo tempo de manobra para desmembramento dos trens.

Além disso, o modelo foi testado com dados reais da Estrada de Ferro Vitória à Minas (EFVM), uma das mais importantes ferrovias do Brasil no que tange à volume de transporte de carga. Em todas as instâncias de teste para EFVM, o modelo proposto apresentou menos desmembramentos do que a distribuição efetivamente criada pelo Centro de Controle Operacional da ferrovia no período analisado.

Esta dissertação foi desenvolvida e suportada pelo projeto de pesquisa Fundação de Amparo de Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) - Vale S/A processo FAPES - 75528452/2016 termos de outorga edital FAPES nº 01/2015 - cooperação FAPES/Vale.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo matemático para planejar a distribuição de lotes de vagões vazios a partir de pátios de triagem para atender as demandas para carregamento nas minas, reduzindo o desmembramento de lotes de vagões vazios dos trens e minimizando o tempo de percurso dos trens ao longo de todo fluxo ferroviário.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Aplicar o modelo matemático proposto ao problema real da EFVM;
- Levantar dados junto a operação ferroviária da EFVM;
- Avaliar os impactos dos parâmetros operacionais para resolver o problema de distribuição de lotes de vagões vazios a partir de testes no modelo proposto;

- Realizar análise comparativa dos resultados obtidos pelo modelo e aqueles adotados no planejamento atual da EFVM;
- Minimizar o desmembramento dos trens nos pátios de triagem para evitar custos e reduzir o tempo de operação.

1.2 Justificativa

Investimentos em ativos ferroviários são extremamente altos, em infraestrutura, vagões, locomotivas e etc. Por conta disso, na literatura científica, encontram-se algumas publicações referentes a metodologias para distribuição destes recursos.

Encontrar uma solução para o problema é complexo e ao mesmo tempo muito importante, pois as grandes companhias ferroviárias mundiais dispendem muitas horas de planejamento para fazer esta distribuição.

A UFES, em conjunto com a Vale SA e apoio da FAPES, possui um projeto de Planejamento de Operação Ferroviária em ambiente com incertezas por meio de modelos matemáticos e meta-heurísticas. Dentro deste projeto foi realizada a pesquisa sobre planejamento e distribuição de trens de lotes de vagões vazios a partir de pátios de triagem na EFVM. De modo a atender os objetivos deste projeto, esta dissertação se justifica por propor a formulação de um novo modelo matemático para distribuição de lotes de vagões vazios considerando a distribuição para atender a demanda nos pontos de carregamento. É essencial salientar que os dados fornecidos para esta dissertação serão fornecidos pela Vale SA com base no projeto em conjunto com a FAPES.

1.3 Estrutura da dissertação

Para atender os objetivos dessa pesquisa, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em 6 capítulos, incluindo este primeiro que é uma introdução ao problema, e os demais distribuídos da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema de Distribuição de Vagões Vazios.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa e o estudo do problema.

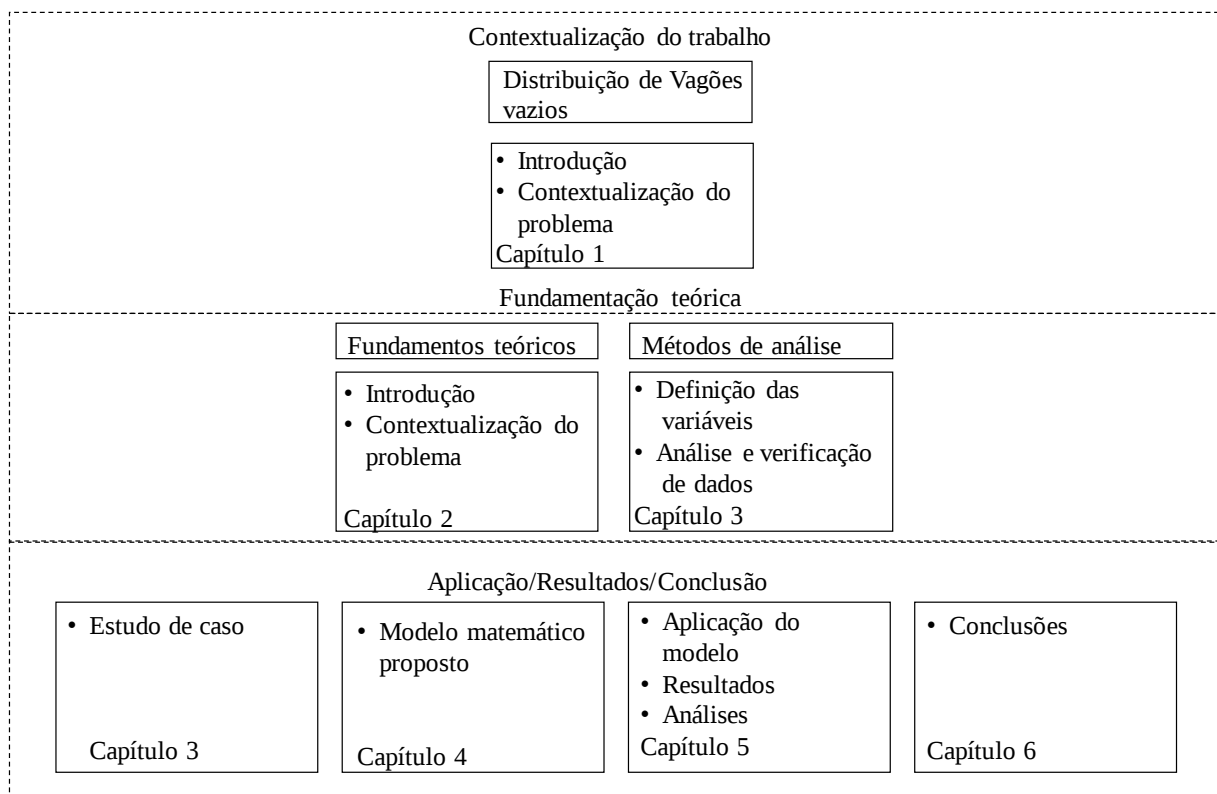
O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto que será a base para a pesquisa.

O Capítulo 5 expõe os resultados obtidos com o modelo proposto, com o uso de instâncias de teste, que comprovam a eficiência do modelo.

Por fim, são apresentadas no Capítulo 6 a conclusões, seguido pelas Referências Bibliográficas utilizadas.

A Figura 2 representa a estrutura desta dissertação, onde são apresentados os tipos de pesquisa, dados e resultados nesta pesquisa.

Figura 2 - Estrutura da Dissertação.



Fonte: O autor, 2019.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentadas as conceituações e discutidas as abordagens e formulações adotadas para o Problema da Distribuição de Vagões Vazios.

2.1 O Problema de Distribuição de Vagões Vazios

A alocação de vagões vazios contidos na grade para carregamento é uma das principais atividades de transporte de carga do modo ferroviário. Fazer uma distribuição eficiente, considerando as particularidades da ferrovia, significa, além da redução de tempo improdutivo, atender a demanda de carregamento com boa qualidade de forma que os vagões sejam levados dos pátios onde há oferta até os pátios onde existe uma demanda (COSTA, 2010).

A distribuição de vagões vazios visa suprir a demanda de transporte objetivando a minimização dos custos de distribuição de vagões. Assim, são definidas as origens e destinos dos vagões para atender a demanda e, em seguida, definidos quais os trens em circulação na ferrovia transportarão os vagões entre as origens e destinos pré-definidos.

A solução deste problema leva em consideração a quantidade e a localização inicial dos vagões, ou seja, em quais pátios e tempos existem ofertas de vagões vazios, a disponibilidade de linhas para receber os vagões nos pátios e a quantidade e tipos de vagões necessários para carga do produto no destino. Além disso, outro aspecto importante refere-se à programação dos trens, ou seja, a distribuição de vagões vazios deve levar em conta as programações já definidas pelo planejador para os trens em circulação na ferrovia.

O problema clássico de distribuição de vagões vazios se refere ao transporte de vagões vazios de pátios onde existe oferta para pátios onde existe demanda. O planejamento considera o número, tipo, o pátio e o tempo que os vagões vazios estão vazios e o número, o tipo, o pátio e o tempo que existem demandas por vazios. O problema da distribuição de vagões vazios visa atender a demanda de transporte objetivando a minimização dos custos de distribuição de vagões. A abordagem mais tradicional para tratar o problema de distribuição de vagões vazios é a utilização de

uma rede espaço-tempo para representar a operação de trens, entre pátios, em certo horizonte de tempo (CRAINIC e LAPORTE, 1997).

Nesse trabalho, o problema de distribuição de vagões difere dessa abordagem clássica, pois precisa ser conhecido o fluxo de lotes de vagões vazios ao longo dos pátios da ferrovia, respeitando diversas restrições e minimizando o número de desmembramentos nos pátios de triagem. Na abordagem clássica, diversos artigos foram publicados. Dentre eles, citam-se: Grain (1985), Dejax e Crainic (1987), Haghani (1987 e 1989), Caldara (1996), Holmberg, Joborn e Lundgren (1998), Fukasawa (2002), Joborn *et al.* (2004), Hamacher (2005), Powel e Topaloglu (2005), Powell *et al.* (2007), Melo, Barros e Nobre (2008), Bektas, Cranic e Morency (2007), Costa (2010), Foletto *et al.* (2016) e Heydari e Melachrinoudis (2017).

2.1.1 Revisão Bibliográfica do Problema da Distribuição de Vagões Vazios

No contexto de distribuição de vagões vazios é possível verificar, na literatura científica, inúmeros trabalhos sobre este tema. Um dos trabalhos pioneiros na área de gestão dos vagões vazios foi elaborado por White e Bomberault (1969). Os autores analisaram a distribuição de vagões por meio do diagrama espaço-tempo onde são representados múltiplos caminhos que um veículo pode percorrer em intervalos de tempo, até seu destino final. O modelo proposto é de programação linear de fluxo de rede global utilizando método Simplex para reposicionar o recurso, a um custo mínimo, para os locais onde eles são necessários para suprir a demanda.

Em 1972 Misra estudou a distribuição estática e considerou como um problema de transporte, entretanto o autor não levava o fator tempo em consideração e assumia o fornecimento da demanda equilibrada em cada dia. A teoria estática foi pouco estudada, pois a distribuição dependia do tempo e este fator foi ignorado no estudo.

Também em 1972, White formulou um problema de distribuição de contêineres vazios mas trabalhou como uma Rede de Transbordo Dinâmica. O autor trabalhou os nós da rede como sendo pontos no espaço e no tempo e às respectivas ofertas e demandas por contêineres, ainda utilizou os arcos representando custos de deslocamento. Os tempos de partida (dos deslocamentos) foram pré-fixados e a

demanda foi tratada como determinística. O problema foi resolvido com uma versão do algoritmo out-of-kilter, proposto por Ford e Fulkerson (1962) para resolver problemas de circulação de custo mínimo. O autor propõe ainda a utilização de técnicas de programação de característica dinâmica, visando a estender o horizonte de tempo. Embora nesse trabalho não seja trabalhado com programação dinâmica, é possível fazer um paralelo da distribuição dos contêineres vazios em rede de transbordo com a distribuição de vagões vazios, os pontos no espaço como os pátios e os arcos como a ligação dos trens entre pátios e minas.

No seu trabalho Philip (1978) fez a distribuição de vagões vazios e análise de operações de pátio, utilizando modelos de simulação. Em 1980, Assad apresentou modelos existentes na literatura aplicados a ferrovias. Segundo ele, as ferrovias são um importante modo de transporte e envolvem um ambiente de tomada de decisão muito complexo, precisando ser suportado por modelos analíticos. Ele cita otimização, filas e modelos de simulação, enfatiza os modelos de otimização por estes oferecerem um desenvolvimento de maior potencial. Em seu trabalho o autor tem dois objetivos principais: fornecer uma visão de modelagem analítica para questões de planejamento e operação e ainda auxiliar os profissionais no campo de transporte e pesquisa operacional com questões de planejamento ferroviário. Vários modelos para atividades ferroviárias são apresentados de acordo com a hierarquia de decisão no planejamento: modelos estratégicos, táticos e operacionais. Os modelos operacionais referem-se as atividades cotidianas em uma ferrovia, como distribuição de carros vazios, a programação das manutenções e despacho. Referente a distribuição dos vazios, o autor fala que o problema pode ser visto como uma rede espaço-tempo, na qual os nós referem-se as locações com um determinado tempo para movimentos entre eles. É possível formular com um problema de transporte em uma rede espaço-tempo com objetivo de minimizar custos de transporte.

Outra contribuição foi de Jordan e Turnquist (1983) que consideram incertezas nos modelos. A estrutura do modelo foi considerada como rede dinâmica, onde suprimento, tempo de viagem e demanda são levados em consideração. O resultado foi uma otimização não linear através do algoritmo de Frank-Wolfe (FRANK,1956)

Grain (1985) propôs um método de otimização na distribuição de vagões usando Programação Linear Inteira, o objetivo é a minimização da diferença entre receita e

despesa de cada fluxo atendido. Este problema é diferente do problema de distribuição na EFVM, pois o mesmo trata um problema em que a demanda em cada ponto de carregamento não é pré-definida, apenas levando em consideração a capacidade de cada ponto.

Dejax e Crainic (1987) fizeram uma revisão dos modelos de gerenciamento e fluxo da frota de carros vazios. Os autores levaram em consideração o deslocamento de vagões vazios como um problema somente de custo, pois nessa condição os vagões não geram receita e por esta razão o planejamento da distribuição de vagões vazios consiste em reduzir o tráfego destes ativos na condição de vazio, ou pelo menos, procurar melhorar a eficiência das operações com vagões carregados.

De acordo com Haghani (1987), o fluxo dos vagões corresponde a tarefa de melhor definir o caminho entre origem e destino de uma carga sobre uma malha ferroviária composta por muitas linhas entrelaçadas.

A solução considera o local inicial dos vagões na grade ferroviária, os horários e as capacidades pré-determinadas dos trens e também as capacidades e horários dos próprios pátios e trens. Os horários dos trens são pré-estabelecidos, de modo que os operadores do centro de controle da ferrovia necessitam o máximo de regularidade em suas operações.

Baseado na previsão de demanda, os operadores montam uma grade fixa de trens para determinado período, apenas efetuando mudanças devido a imprevistos na via ou outros. Como as demandas reais podem ser diferentes da previsão, devido a imprevistos ou casos furtivos, o problema de distribuição de vagões surge para atender o máximo possível das demandas reais sem mudar a programação de trens.

A formulação e solução apresentadas por Haghani (1989) para o fluxo de trens apresentou um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para distribuição de vagões que considera uma rede espaço-tempo. O modelo possui uma função objetivo não linear e restrições lineares. O autor utilizou-se de uma técnica de decomposição heurística para resolução e seu modelo.

Spieckermann e Voß (1995) afirmaram que os modelos matemáticos e estudos teóricos estão disseminados nas literaturas específicas, mas que ainda necessitam

aplicação no mundo real, os autores utilizam de estudos para elaboração de um suporte algorítmico para uma empresa de aluguel de vagões.

Caldara (1996) afirmou que a melhor alocação de vagões é a que atende à demanda com menor tempo de circulação dos ativos na ferrovia, ou seja, o menor ciclo. O autor propôs três abordagens para o problema, o método da Busca Exaustiva, Busca em Árvore e Otimização com combinação de alocação e formação. O primeiro método possui um algoritmo de busca simples, este algoritmo representa o primeiro passo tanto no sentido de modelar os elementos da ferrovia envolvidos no processo de alocação quanto no de representar os estados destes elementos ao longo do tempo, de forma a se tomar decisões de alocação antecipadas. Apesar de ter uma aplicação simples, há um alto gasto computacional para escolha da melhor alocação. O segundo método considera o aspecto dinâmico do problema. Com conceito de estado, que corresponde a uma situação recorrente nos elementos de ferrovia envolvidos na alocação, no modelo cada estado gera um estado novo chamado de “estado-filho”, com base em uma função heurística. O critério de parada impõe um limite de número de estados abertos e permite definir o horizonte de tempo que se quer utilizar. O terceiro método é baseado em rede espaço-tempo composta por uma parte dinâmica e outra estática. De acordo com o autor, o fluxo de carga entre pontos da ferrovia pode ser visto como uma rede onde os pontos de carregamento, descarregamento e classificação são os nós da rede e os arcos são representados pelas vias permanentes que conectam as estações.

Com uma abordagem dos níveis tático, operacional e estratégico, Crainic e Laporte (1997) apresentaram questões de suma importância ao planejamento e gerenciamento do transporte de cargas. Uma revisão bibliográfica foi elaborada, esta revisão descreve problemas relacionados com desenvolvimento de modelos e pesquisa operacional. Os autores destacam a modelagem matemática em uma rede espaço-tempo, para nível operacional, a qual representa os trens, os pátios, o horizonte de tempo de planejamento e o fluxo de vagões vazios.

Sherali e Suharko (1998) discutiram estratégias de reposicionamento dos vagões vazios para transporte de automóveis. Uma revisão, da década de 80, foi proposta por Cordeau et al. (1998). Este estudo abordou três níveis de planejamento, sendo mais voltado para problemas globais de gerenciamento dos trens.

Cordeau, Toth e Vigo (1998) realizaram uma revisão pesquisando a maioria dos modelos propostos durante nos anos 80, onde tratam da distribuição de vagões vazios, rotas e programação de trens, tanto de carga, como de passageiro. O estudo realizou uma abordagem aos três níveis de planejamento, sendo a atenção concentrada em problemas globais de gerenciamento dos trens. Powell e Carvalho (1998) consideraram um problema da gestão de frota de vagões numa ferrovia em um ambiente de tempo real. Os autores apresentam um modelo que foi usado para atribuir contêineres para vagões.

Em seu trabalho, Crainic (2002) apresentou planejamento e tópicos de gestão para transporte de cargas em modais variados. O autor também fala nos três níveis de planejamento. O planejamento estratégico refere-se a alta administração, esse planejamento impacta sobre todo sistema e baseia-se na obtenção de recursos a longo prazo e investimentos de alto porte, como exemplo a mudança na estrutura de rede ferroviária. O planejamento tático tem foco mais voltado ao planejamento a médio prazo, utiliza-se dos recursos para adquirir melhor desempenho de todo o sistema. A distribuição de vagões é vista a nível operacional, pois refletem decisões do dia a dia nas atividades de uma ferrovia. O autor explana que as decisões de alocação são desafiadoras e afetadas pela demanda dos clientes, podendo muitas vezes ocorrer o desbalanceamento da frota de vagões. Uma das maiores contribuições, segundo o autor, foi dada por White e Bomberault (1969) em que propõe o algoritmo para minimizar custos e otimizar o fluxo.

Esta linha de pesquisa ainda é bastante utilizada atualmente, entretanto com formulações mais elaboradas e uso de softwares para refletir a realidade dos tempos atuais.

Fukasawa (2002) realizou uma abordagem dos problemas a nível operacional e tático. No problema tático, houve uma abordagem do Problema de Planejamento de Atendimento (PPA), o qual visava definir as diretrizes de atendimento as quais serviriam como base para todo o planejamento da operação mensal. Neste nível, considerou-se: tamanho da frota de vagões, a capacidade da malha, classes de vagões, blocagem, disponibilidade de vagões vazios, entre outros aspectos. Desenvolveu-se um modelo mono-periódico com base no modelo de multi-fluxos. A nível operacional foi analisado o Problema de Fluxo de Vagões (PFV), onde é

determinada a rota completa de cada vagão na malha ferroviária, assim como a sequência de carregamentos e descarregamentos, durante o intervalo de uma semana. O modelo visa a definição de quando e como atender cada demanda, maximizando o lucro total. Para o PFV, o autor propôs um modelo baseado em multi-fluxos, entretanto desta vez um modelo periódico, sendo nele contemplados todos os possíveis movimentos e operações de vagões para o período. Em ambas modelagens ele utilizou o software CPLEX 7.1.

De acordo com Zhang et al (2003) três tipos de soluções foram encontrados na literatura científica para alocação de vagões: utilização de modelo e método de programação linear, análise matemática para selecionar e distribuir os caminhos dos vagões vazios adotando distribuição dinâmica e linear e ainda a utilização de um algoritmo baseado no Problema de Transporte. Foi proposta a construção de um modelo de otimização sintético de distribuição de carros vazios com um “mix” de restrições. A função objetivo apresentou o custo total para esta distribuição com alocação da quantidade de vagões ainda com o caminho que os mesmos devem seguir. Os autores propõem restrições matemáticas e de conhecimento. As restrições de conhecimento têm foco no caminho percorrido pelos vagões e possuem ênfase na seleção do fluxo de distribuição mais razoável. As restrições matemáticas restringem a distribuição ao suprimento e requisição de vagões. A solução pode ser alcançada combinando um método de otimização matemático com método de conhecimento e construção de um algoritmo baseado na natureza do problema. Este algoritmo combina a distribuição com a seleção do caminho mais razoável.

Segundo Joborn *et al.* (2004) para satisfazer a oferta e a demanda existente, visando a minimização dos custos, deve-se incluir os problemas de desempenho e planejamento na movimentação de vazios. Os autores afirmaram que se uma quantidade menor de grupos de vagões, porém com grupos maiores, pudesse ser atendida nos pátios ferroviários os processos de manobra e classificação seriam simplificados, assim como o custo unitário do vagão associado seria diminuído, já que a estrutura de custo possui um comportamento de economia de escala. Neste trabalho houve a formulação e resolução um modelo de otimização para distribuição de vagões vazios.

Uma introdução à gestão de frotas com foco na distribuição de vagões pode ser encontrada em estudos de Powell e Topaloglu (2005), Powell *et al.* (2007) e Holmberg, Joborn e Lundgren (1998), os quais propuseram modelos de otimização para melhorar o processo de distribuição de vagões vazios para atender o agendamento de minas de minério de ferro. Bektas, Cranic e Morency (2007) tiveram por objetivo reduzir o tempo em que os vagões vazios ficam parados nos pátios.

Hamacher (2005) utilizou um modelo de programação inteira para alocar vagões vazios e também locomotivas, maximizando o retorno obtido pela demanda. O autor utilizou-se de um modelo multi-fluxos onde são inseridas as movimentações de operação de vagões e locomotivas. O problema foi resolvido com um pacote genérico de programação inteira e uso do *software* CPLEX 9.0. O problema já utiliza itinerários de trens pré-definidos e com aproximadamente uma hora de execução o programa apresentou uma solução ótima.

Melo *et al.* (2008) propuseram o desenvolvimento de um modelo de Programação Inteira Mista para o problema de planejamento da alocação de vagões de carga. Os dados de entrada já consideravam o programa de atendimento à demanda com a quantidade a ser transportada, os tipos de vagões, datas de início e fim de carregamento e o frete. A modelagem considerou cinco modelos, com distintas funções objetivo para solucionar os problemas de: minimização da quantidade de vagões ociosos retidos em cada terminal, minimização do número total de vagões vazios e carregados em circulação, minimização apenas dos vagões vazios circulando, maximização do lucro e a minimização dos custos operacionais. Os autores utilizaram o *software* Lingo 8.0 para executar o modelo e Excel 2007 para o fornecimento dos dados de entrada, os tempos de processamento foram muito baixos e obteve-se soluções ótimas.

Barros (2008) propôs a distribuição horária de vagões vazios para carregamento de minério na EFVM, utilizando o solver do Excel. Em seu trabalho a distribuição horária foi feita manualmente sem otimizar o tempo de fila nos pontos de carga. O trabalho da autora difere desta pesquisa pois não trata a distribuição dos lotes de vagões vazios visando a minimização do desmembramento, apenas distribuindo lotes vazios para carregamento de forma a reduzir os tempos de vagões parados.

O problema de distribuição de vagões vazios foi abordado por Costa (2010) em duas etapas. Na primeira, o autor realizou o processo de distribuição para atender a demanda, determinando o destino de cada vagão. Assim, é gerada uma solicitação de movimentação dos vagões vazios, servindo como dado de entrada para a segunda etapa do problema, a definição de quais trens transportarão os vagões da origem ao seu destino (alocação dos vagões). Para isto, foi elaborado um algoritmo de alocação, visando encontrar algum trem da grade de trens para transportar os vagões da origem ao destino.

Barros (2010) resolveu um problema muito similar ao proposto nesta dissertação e ao problema proposto pela própria autora em um trabalho similar (Barros, 2008). Utilizando-se de uma ferramenta de pesquisa operacional para otimizar e fazer a distribuição diária de vagões vazios com método Simplex, o trabalho da autora é dividido em duas etapas. Primeiramente é feita a distribuição horária com a otimização do tempo de percurso na rede e em um segundo momento a distribuição horária com minimização do tempo de fila no ponto de carga. Novamente o trabalho difere da proposta desta pesquisa por ser uma proposta de distribuição, visando a minimização do desmembramento de lotes de vagões vazios, considerando os tempos de operação, *transit times*, tempos de saída e chegada, de modo a evitar filas nas minas, congestionamentos nos pátios e cadenciar o despacho de trens atendendo as demandas.

Foletto et al. (2016) utilizaram modelagem matemática de Programação Linear Inteira como estratégia de distribuição de vagões vazios. Esta abordagem beneficia-se da folga de tração nos trens já carregados. O modelo matemático foi aplicado à Ferrovia Centro Atlântica (FCA) e então uma comparação foi feita com a quantidade de trens compostos pela FCA apenas com vagões vazios para fazer a distribuição destes vagões, com o número de trens compostos apenas de vagões vazios gerados pelo modelo matemático. Este trabalho difere do trabalho aqui proposto pois propôs distribuir vagões vazios utilizando a folga de tração de trens já circulando na malha ferroviária, enquanto o trabalho proposto nesta dissertação propõe distribuir trens com lotes de vagões vazios a partir de uma origem já visando a minimização do desmembramento dos trens.

Heydari e Melachrinoudis (2017) desenvolveram um modelo de programação linear para distribuição de vagões vazios considerando blocagem (agrupamento de diferentes vagões) e capacidade dos vagões na distribuição. Os autores implementaram o modelo no software CPLEX e utilizando Java, o modelo possui três componentes principais: um planejador de viagens, um pseudo gerador de viagens (virtual) e um otimizador. Foi possível perceber que pelo modelo, muitas medidas de performances podem ser melhoradas.

Após a revisão bibliográfica apresentada anteriormente, foi possível constatar que existem diversos trabalhos que tratam sobre a distribuição de vagões vazios. Entretanto, nenhum dos trabalhos teve como foco a distribuição de lotes de vagões vazios visando a minimização do desmembramento dos trens e que também considerasse o tempo total de viagem, incluindo o tempo de chegada na origem, tempo de percurso entre as origens e pátios de triagem, pátios de triagem e minas, tempo de operação nos pátios e tempo de operação nas minas. A distribuição de lotes de vagões vazios com esta minimização dos tempos e do desmembramento é algo que ainda não foi encontrado em artigos disponíveis na literatura.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa adotada para o desenvolvimento dessa dissertação.

No subcapítulo 3.1 é apresentada a classificação da metodologia de pesquisa adotada quanto à natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos. As etapas da metodologia de pesquisa proposta que foram cumpridas são apresentadas no subcapítulo 3.2. No subcapítulo 3.3 é apresentado o Estudo do problema, utilizado para avaliar o modelo proposto. Por fim, no subcapítulo 3.4 descreve-se o levantamento de dados e geração das instâncias

3.1 Classificação da metodologia de pesquisa

Esta pesquisa foi classificada de acordo com a metodologia adotada, assumiu-se a classificação proposta por Silva e Menezes (2005), que qualifica em relação à natureza, à abordagem, ao objetivo e ao procedimento técnico.

Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada, pois a mesma visa gerar conhecimentos para aplicações práticas do problema de distribuição de lotes de vagões vazios.

Sobre a abordagem, esta pesquisa se classifica como quantitativa, pois o universo de estudo pode ser quantificável, ou seja, as informações podem ser comparadas e analisadas.

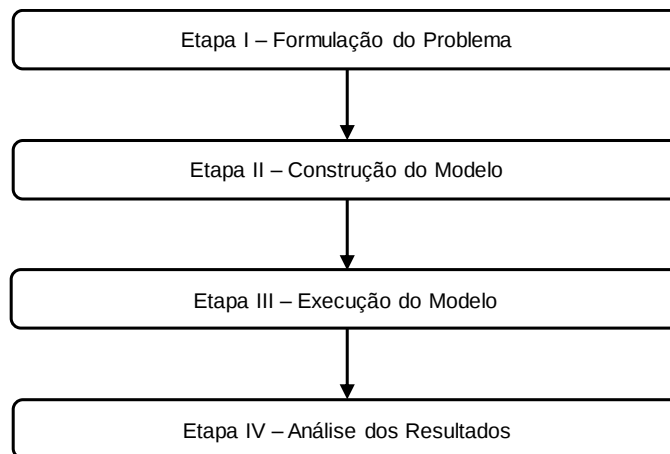
Em relação aos objetivos, a pesquisa é classificada como explicativa, pois identifica os fatores que determinam fenômenos, assumindo em geral as formas de pesquisa experimental.

No que se refere ao procedimento técnico, a pesquisa é experimental, com utilização de modelagem matemática para resolução do problema estudado

3.2 Etapas da metodologia de pesquisa

Para alcançar o objetivo da dissertação, foi definida uma metodologia de pesquisa a ser seguida, distribuída em quatro etapas, apresentada na Figura 3 e descritas a seguir. O modelo proposto, por ser o conteúdo mais importante deste trabalho, é destacado em um capítulo à parte.

Figura 3 - Etapas da metodologia da pesquisa



Fonte: O autor, 2019.

Etapa I: Formulação do problema

Para a formulação do problema identificou-se os seguintes elementos: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, objetivos e restrições.

Ainda nesta etapa, foram estudadas referências bibliográficas quanto aos modelos de distribuição de vagões vazios, bem como estudos mais aprofundados para conhecer a operação atualmente utilizada distribuição de trens em ferrovias reais. Desta forma, foi possível agregar todas as variáveis de decisão e os parâmetros que estão envolvidos no problema estudado, dando o embasamento necessário para construção do modelo.

Etapa II: Construção do modelo

Para atender os objetivos desta pesquisa, foi elaborado um modelo matemático para distribuição de lotes de vagões vazios, baseado em rede de fluxo, também foram incorporadas restrições mais próximas à realidade da distribuição de lotes de vagões

vazios em ferrovias, antes não consideradas distribuições em lotes. O modelo foi executado usando o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® versão 12.8 (IBM, 2018).

Etapas III: Execução do modelo

Para a operacionalização do modelo proposto foram realizadas as seguintes etapas:

- Criação de instâncias teste, com dados aleatórios, para teste da funcionalidade do modelo;
- Levantamento de dados e informações da EFVM junto à Vale S/A;
- Criação das instâncias com dados reais da EFVM;
- Execução do modelo matemático no *solver* CPLEX.

Etapas IV: Análise dos Resultados

Depois da execução do modelo matemático com as instâncias definidas, foi realizada análise dos resultados obtidos comparando-se as distribuições efetuadas pelo *solver* com as distribuições efetuadas pela equipe do Centro de Controle de Operações da EFVM. Foi possível um comparativo com a distribuição manual efetuada pelo operador do Centro de Controle Operacional da EFVM, pois durante alguns dias o modelo foi testado no *solver* CPLEX juntamente com a elaboração das distribuições manuais, resultando em um comparativo em tempo real.

As considerações finais foram descritas no Capítulo 6.

3.3 Problema estudado

O problema em estudo é aplicado à Estrada de Ferro Vitória à Minas (EFVM), uma das mais importantes ferrovias do Brasil no que tange ao volume de transporte de carga, representando cerca de 21,80%, em 2018, do transporte de toda carga ferroviária nacional (ANTT, 2019).

A EFVM tem 905 km de extensão e faz interconexão com outras ferrovias em Ouro Branco - MG (MRS Logística S.A.), Pedro Nolasco - ES (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), Engº Lafaiete Bandeira - MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), Capitão Eduardo – MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.) e Pedreira do Rio das

Velhas – MG (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.). Além disso, a EFVM conecta-se ao Complexo Portuário de Tubarão, ao Terminal de Vila Velha, aos Cais de Paul, Codesa e ao Porto de Barra do Riacho, em Aracruz, no Espírito Santo (ANTT, 2019).

A EFVM é uma ferrovia estratégica, pois faz a ligação do o Sudeste com o Centro-Oeste do país. Anualmente, são transportadas aproximadamente 125 milhões de toneladas (CNT, 2019), o que representa cerca de 22% da carga ferroviária brasileira, de produtos tais como minério de ferro, aço, carvão, calcário, granito, contêineres, ferro-gusa, produtos agrícolas, madeira e celulose.

A ferrovia possui uma frota de 19.031 vagões para atender a 13 minas, total de 34 pátios de formação de trens e 17 pátios de carga geral. Em 2018, a EFVM formou 47.844,00 trens para o transporte de carga. (CNT, 2019).

O processo de carregamento começa com a formação de trens de vagões vazios e envio aos pontos de carga. Após a liberação dos trens, cabe ao Centro de Controle Operacional da EFVM decidir entre uma série de opções como realizar a distribuição dos recursos disponíveis para atender a demanda necessária nos pátios de carga.

A demanda diária de carregamento é composta pela quantidade de vagões a serem enviados para cada ponto de carga, sendo esta enviada ao Centro de Controle Operacional (CCO) no dia anterior pelos programadores dos pátios. Essa demanda pode ser ajustada no dia, em consenso, pelos programadores e CCO, de acordo com a disponibilidade de recursos para carregamento, uma vez que as alterações na malha são muito dinâmicas, gerando um programa revisado de carregamento.

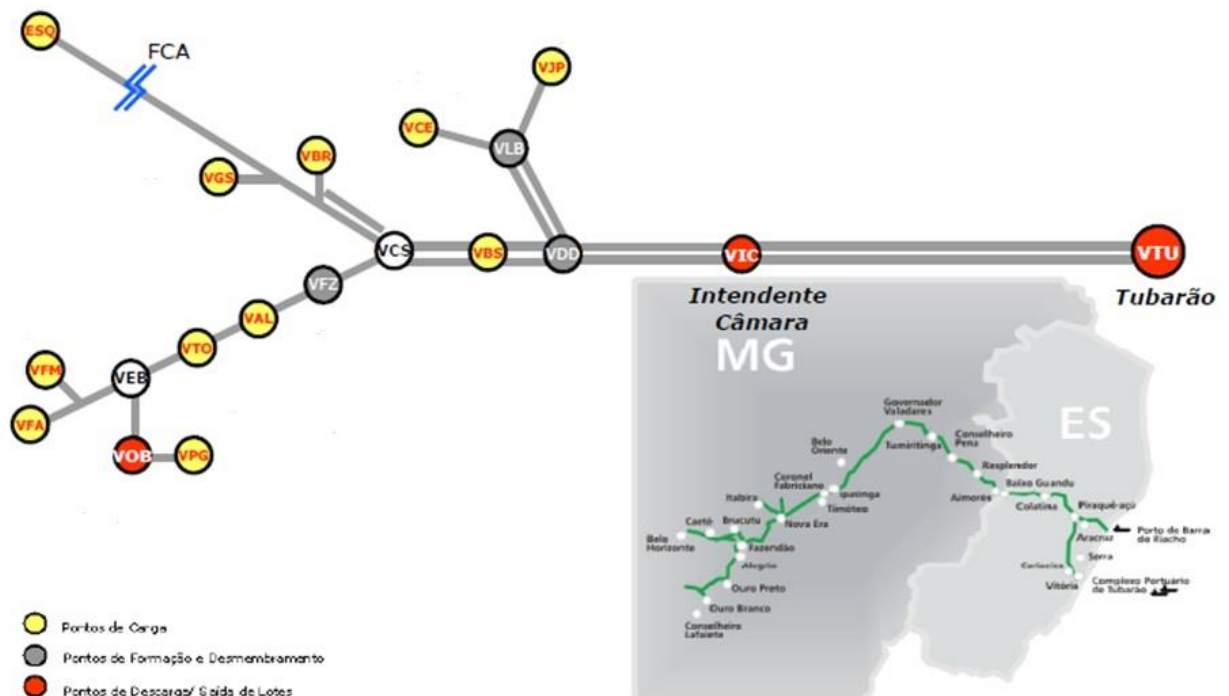
O processo logístico do minério de ferro na Vale S/A engloba muitas variáveis que impactam em todo sistema ferroviário. O principal desafio em programar a distribuição são os recursos de alocação na ferrovia, já que existem treze pontos diferentes de carregamento.

Neste contexto, a programação diária dos lotes de vagões GDE compreende a principal atividade de planejamento envolvida no transporte do minério de ferro, merecendo assim, uma atenção especial. Um lote é considerado como um conjunto de 84 vagões do tipo GDE (vagões com abertura superior os quais são descarregados em viradores).

Atualmente a EFVM distribui cerca de 5.000 vagões vazios de minério diariamente de forma manual, o planejamento é realizado de forma que os lotes de vagões vazios entram em circulação de hora em hora.

A ferrovia possui treze pontos de carregamento, Figura 4, representados pelas letras VJP (João Paulo), VCE (Conceição), VBS (Bicas), VBR (Brucutu), VGS (Gongo Soco), VAZ (Azurita), VCD (Capitão Eduardo), VDV (Divinópolis), VAL (Alegria), VTO (Timbopeba), VFM (Fábrica Muro), VFA (Fábrica) e VPG (Patrag). O ponto ESQ é o terminal de Azurita, o qual se encontra em outra ferrovia, a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA) e os lotes chegam através do regime de tráfego mútuo com a EFVM (junto com as minas de VCD e VDV). O ponto de corte na linha é o entroncamento entre a EFVM e FCA. Existem também 6 pontos de formação e desmembramento de trens, pátios de triagem, que são os pontos VDD (Desembargador Drumond), VOB (Ouro Branco), VLB (Laboriau) e VFZ (Fazendão), VCS (Costa Lacerda) e VEB (Engenheiro Bandeira).

Figura 4 - Estrada de Ferro Vitória a Minas

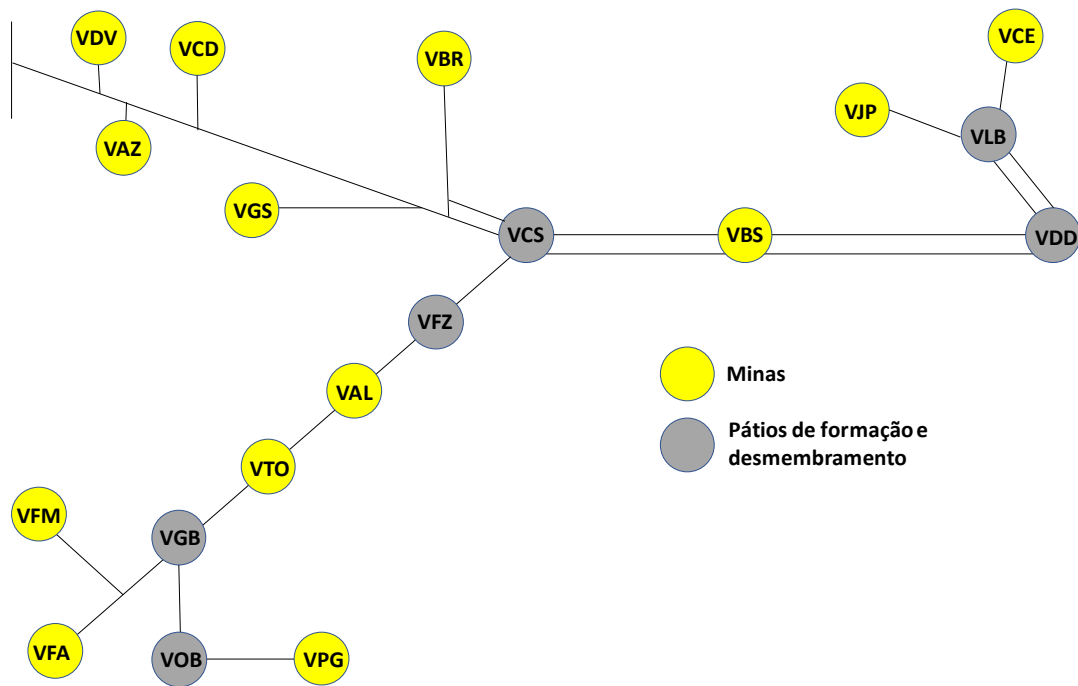


Fonte: Vale ,2019.

O problema analisado trata de uma estratégia para distribuir vagões vazios originados no Porto de Tubarão (responsável por aproximadamente 90% da geração de vagões vazios) para o carregamento de minério de ferro de forma atender o programa diário

de carregamento das minas com o menor custo possível levando em consideração as restrições existentes, as quais serão tratadas na próxima etapa deste projeto. Entretanto, existe uma única linha do Porto de Tubarão até o Pátio de Triagem de Desembargador Drumond, portanto considera-se este pátio como uma origem e desconsidera-se VIC (Intendente Câmara) como origem. A partir Drumond, existem três opções a seguir: Pátio de Costa Lacerda, Pátio de Laboriau e mina de Bicas. A partir do pátio de Costa Lacerda é possível ir direto às minas de Brucutu, Gongo Soco, Azurita, Capitão Eduardo e Divinópolis ou seguir até o pátio de triagem de Fazendão. A partir deste pátio pode-se ir ao ramal de Fábrica com as minas de Alegria, Timbopeba, Fábrica Muro e Fábrica. A partir do pátio de triagem de Laboriau, pode-se ir as minas de João Paulo e Conceição. Considera-se Ouro Branco como uma segunda origem, onde são gerados vagões vazios para atender exclusivamente as minas de Patrag, Fábrica e Fábrica Muro. Esta origem gera apenas trens com um lote, devido a restrições operacionais, os quais podem formar trens com mais lotes no pátio de Engenheiro Bandeira. O problema não engloba a ferrovia como um todo e sim algumas minas e pátios de triagem. Conforme a Figura 5 é possível verificar as minas e pátios focados nesta dissertação.

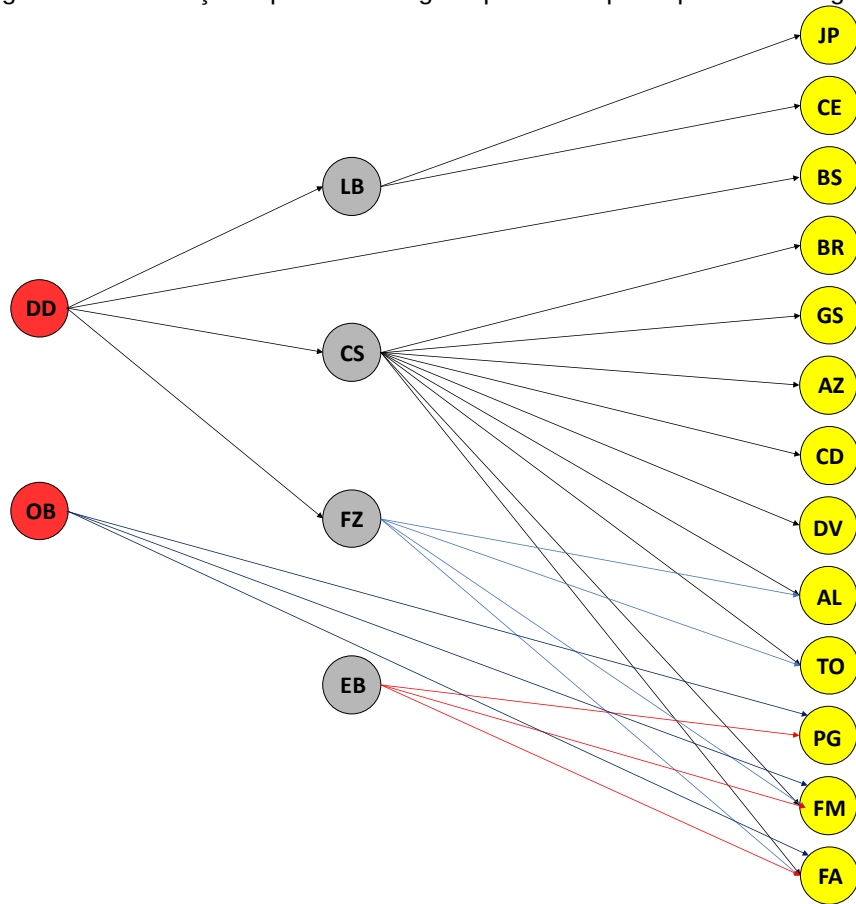
Figura 5 - Minas e pátios foco dessa dissertação.



Fonte: O autor, 2019.

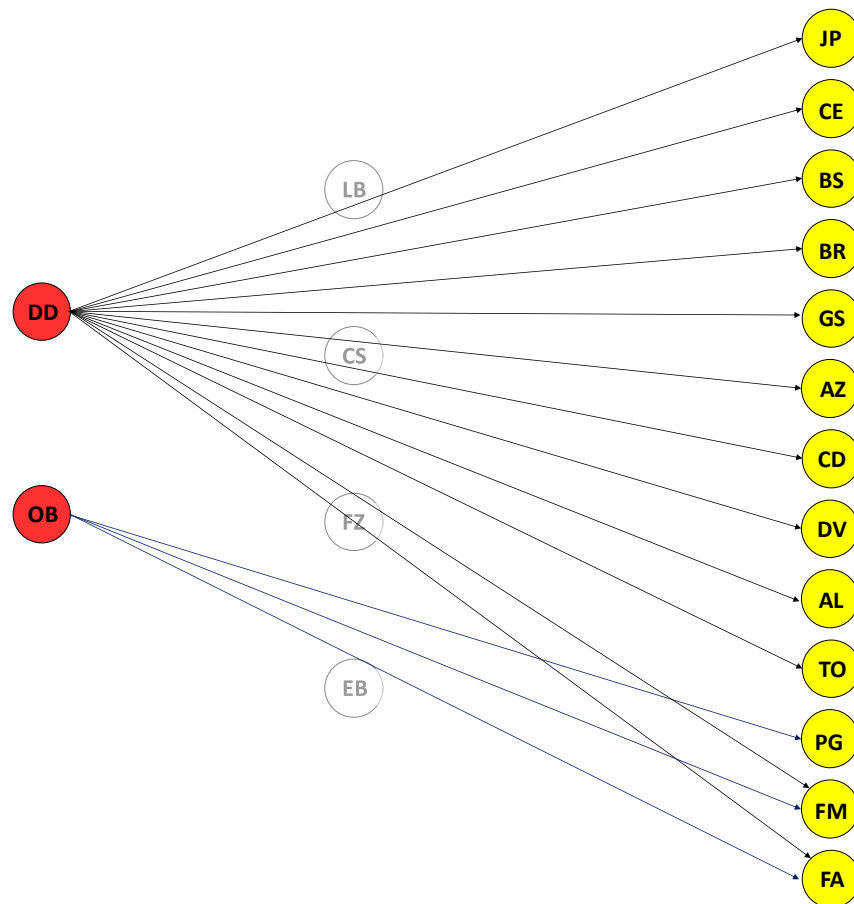
A partir das origens de Desembargador Drummond e Ouro Branco é possível distribuir lotes de vagões vazios para as minas passando pelos pátios e triagem de Laboriau, Costa Lacerda, Fazendão e Engenheiro Bandeira, conforme Figura 6. Também é possível, a partir destas origens, distribuir lotes de vagões vazios diretamente para as minas, sem passar pelos pátios de triagem, conforme Figura 7. Salienta-se que a origem de Ouro Branco somente distribui lotes de vagões vazios apenas para as minas de Patrag, Fábrica Muro e Fábrica.

Figura 6 - Distribuição a partir das origens passando pelos pátios de triagem.



Fonte: O autor, 2019.

Figura 7 - Distribuição a partir das origens diretamente às minas



Fonte: O autor, 2019.

O objetivo principal do planejamento é reduzir o número de desmembramentos dos lotes dos trens nos pátios de triagem de Drumond, Laboriau, Costa Lacerda, Engenheiro Bandeira e Fazendão, pois esta operação incide em custos e em tempos de manobra que atrasam todo o ciclo de vagões. No entanto, a EFVM prioriza que os desmembramentos, caso sejam necessários, sejam realizados em pátios específicos. Desta forma, essa dissertação considera um parâmetro para cada pátio de triagem que representa a prioridade dada para ele pela EFVM. Desta forma, não haveria um acúmulo de trens para desmembramento no pátio de Desembargador Drummond.

A estratégia proposta é definir a quantidade de vagões vazios a serem transportados para cada mina, evitando filas e minimizando os desmembramentos, assim evitando congestionamento nos pátios e a circulação de trens com lotes de vagões vazios desnecessários.

3.4 Levantamento de dados e criação de instâncias

Para validação do modelo proposto nesta dissertação, foram levantados os dados do Problema analisado descrito no subcapítulo 3.3 e, a partir destes, foram criadas 10 instâncias, as quais serão descritas na Tabela 1. A tabela apresenta a oferta de lotes de vagões vazios nas origens, a demanda nas minas por lotes de vagões vazios, o número de trens utilizado e o objetivo de cada instância. Todos os dados para criação das instâncias e testes do modelo foram coletados junto a equipe da EFVM de 01/06/2018 a 09/06/2018 e a última instância em 22/01/2019.

As instâncias de teste foram criadas com objetivo de avaliar o desempenho do modelo proposto quanto ao tempo de processamento para obtenção de solução ótima, além de avaliar também as distribuições de lotes de vagões vazios realizadas quando utilizados dados da EFVM, mostrando como a ferramenta pode ser aplicada como auxílio à tomada de decisão pelo distribuidor de recursos de uma ferrovia.

3.4.1 Instâncias de Teste

Para realização dos testes no modelo matemático proposto foram elaboradas dez instâncias, apresentadas na Tabela 1, com oferta, demanda, número de trens e objetivo de cada uma. Foram avaliados os seguintes parâmetros: Tempo de execução, GAP e Função Objetivo. As instâncias propostas têm por objetivo apresentar: 1) o domínio sobre o modelo matemático desenvolvido, 2) a coerência dos resultados obtidos, com base nas formulações e restrições impostas, e 3) a viabilidade operacional de utilização do *software*.

Tabela 1 - Instâncias para avaliação do modelo matemático.

Instância	Oferta (lotes)	Demanda (lotes)	Número de trens (un)	Objetivo
1	27	27	12	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 01/06/2018.

2	39	39	20	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 02/06/2018.
3	41	41	19	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 03/06/2018.
4	38	34	16	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando oferta é maior que a demanda para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 04/06/2018.
5	39	39	16	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 05/06/2018.
6	44	44	19	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 06/06/2018.
7	55	48	26	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a oferta é maior que a demanda e então comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 07/06/2018.
8	40	40	18	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pela equipe da EFVM em 08/06/2018.

9	38	38	18	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pelo CCO em 09/06/2018.
10	29	29	11	Avaliar a distribuição de trens de lotes de vagões vazios quando a demanda é igual a oferta para comparar com a distribuição efetuada pelo CCO em 22/01/2019.

Fonte: O autor, 2019.

Todos pátios de triagem, Laboriau, Costa Lacerda, Fazendão e Engenheiro Bandeira, possuem a mesma prioridade manobra. A priori foi atribuída prioridade de manobra 5 (pouca utilização) ao pátio de Fazendão a pedido da Equipe da EFVM, pois o pátio ainda seria utilizado para carregamento de MFe, o que impediria muitas manobras. Posteriormente a Equipe EFVM requisitou que fosse atribuída a mesma prioridade de manobra a todos os pátios, pois não haveria mais carregamento de MFe neste pátio.

Todos os trens apresentam um número máximo de 4 lotes, o máximo utilizado na EFVM, sendo eu cada lote conta com 84 vagões gôndola do tipo GDE (descarregamento por viradores).

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Nesse capítulo, será descrito o modelo matemático proposto para distribuir os lotes de trens de lotes de vagões vazios. É proposto um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista para cumprir a programação diária de carregamento de minério de ferro. As demandas das minas (destinos) devem ser atendidas em um horizonte de no máximo 24 horas incluindo tempo de operação nas minas, o tempo de desmembramento, tempo de viagem entre os pátios e o tempo de saída do pátio inicial.

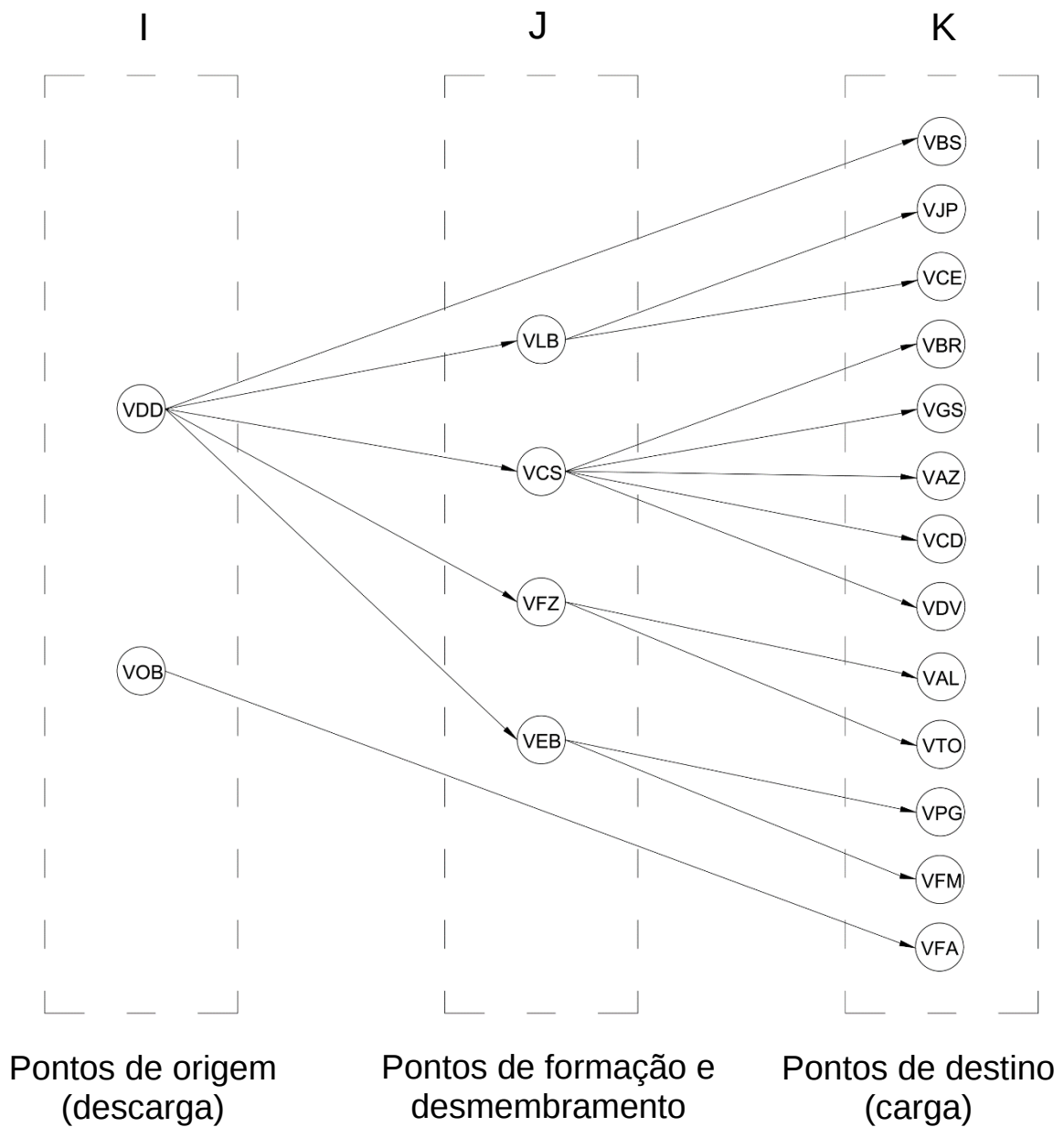
Como pontos de origem são considerados Desembargador Drummond (VDD) e Ouro Branco (VOB), de onde os vagões chegam do porto. Considera-se como pontos de transbordo, Fazendão (VFZ), Laboriau (VLB), Costa Lacerda (VCS) e Engenheiro Bandeira (VEB). Nestes pátios é possível efetuar a formação ou desmembramento de trens.

A partir de Tubarão, os trens viajam diretamente para o pátio de Drummond (VDD). Neste pátio os trens podem prosseguir até VLB, onde atendem as minas de João Paulo (VJP) e Conceição (VCE), ou ao pátio de CS onde atendem os ramais de Belo Horizonte ou Fábrica. A mina de Bicas (VBS) também pode ser atendida diretamente do pátio de VDD, não necessitando passar por nenhum pátio de transbordo. No ramal de Fábrica (VFA) os trens também podem seguir para o pátio de VFZ, atendendo as minas: VAL, VTO, VFM, VFA. A partir de Ouro Branco (VOB) os trens podem viajar para atender as minas de Fábrica (VFA), Fábrica Muro (VFM) ou Patrag (VPG).

Para a distribuição dos lotes de vagões vazios, considera-se no o número de pátios onde se originam os trens de vagões vazios; nd o número de pátios de triagem onde pode ocorrer a formação ou desmembramento de trens em lotes; nm o número de minas que demandam lotes de vagões vazios para carregar e nt o número de trens de lotes de vagões vazios circulando no período de planejamento.

O problema a ser modelado é de distribuição de trens de lotes de vagões vazios na malha da Figura 8 e o mesmo será resolvido utilizando um modelo de rede de fluxo com transbordo. Trata-se o problema como linear inteiro misto, dado que a quantidade de lotes que passa em cada arco deve ser inteira.

Figura 8 - Distribuição de lotes representada com fluxo de rede.



Fonte: O autor, 2019.

Os nós representam os pátios da via férrea (pontos de origem, formação ou desmembramento e minas) e os arcos representam as ligações entre esses pontos. Os pontos de formação e desmembramento são considerados pontos de transbordo.

O modelo matemático proposto é apresentado a seguir em cinco partes: os conjuntos, os parâmetros, as variáveis de decisão, a função objetivo e as restrições.

Tabela 2: Dados do modelo matemático proposto

Conjuntos	
I	Conjunto de pátios que originam lotes, de $1 \dots no$;
J	Conjunto de pátios de triagem onde pode ocorrer desmembramento de trens em lotes, $1 \dots nd$;
K	Conjunto de minas que demandam lotes para carregar, de $1 \dots nm$;
T	Conjunto de trens que trafegam com vagões vazios, de $1 \dots nt$.
Parâmetros	
$lmax$	Número máximo de lotes de vagões vazios por trem;
ov_{it}	Oferta de lotes de um trem $t \in T$ no pátio de origem $i \in I$;
dv_k	Demanda de lotes para carregamento na mina $k \in K$;
pm_j	Prioridade de manobra do trem $t \in T$ no pátio de triagem $j \in J$;
m	Parâmetro utilizado para lógica do modelo matemático, adotado o valor de 0,001;
M	Parâmetro utilizado para lógica do modelo matemático, adotado o valor de 9999,0;
ϕ	Parâmetro utilizado na função objetivo para ponderação da parcela que representa o desmembramento dos trens na origem e seu valor é calculado mais a frente nessa seção;
ψ	Parâmetro utilizado na função objetivo para ponderação da parcela que representa o tempo de percurso dos trens e seu valor é calculado mais a frente nessa seção;
tco_{it}	Tempo de chegada do trem $t \in T$ na origem $i \in I$;
tot_{ij}	Tempo para viajar da origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$;

$t t m_{jk}$	Tempo para viajar do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$;
$t d e_{ik}$	Tempo para viajar diretamente da origem $i \in I$ até a mina $k \in K$;
$t m t_j$	Tempo de manobra no pátio de triagem $j \in J$;
$t m o_i$	Tempo de manobra na origem $i \in I$;
$t o m_k$	Tempo de carregamento na mina $k \in K$;
$c p m_k$	Limite de lotes que a mina $k \in K$ pode receber simultaneamente;
$d p_{ik}$	Destino da origem $i \in I$ até a mina $k \in K$ que não pode ser efetuado;
$h t$	Tempo do horizonte de trabalho;
$h i_k$	Horário de início de manutenção na mina $k \in K$;
$h f_k$	Horário de fim de manutenção na mina $k \in K$.

Variáveis de Decisão

x_{ijt}	Quantidade de lotes do trem $t \in T$ que devem ser deslocados do pátio de origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$;
w_{jkt}	Quantidade de lotes do trem $t \in T$ que devem ser deslocados do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$;
δ_{ikt}	Quantidade de lotes do trem $t \in T$ que devem ser deslocados do pátio de origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$;
$d f_{ijkt}$	Diferença da quantidade de lotes do trem $t \in T$ que devem ser deslocados do pátio de origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$, x_{ijt} , e a quantidade de lotes do trem $t \in T$ que devem ser deslocados do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$;
$f x_{ijt}$	Variável binária que assume valor igual a 1 caso exista deslocamento de lotes de vagões vazios do trem $t \in T$, do pátio de origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$ e 0 caso contrário;

fw_{jkt}	Variável binária que assume valor igual a 1 caso exista deslocamento de lotes de vagões vazios do trem $t \in T$, do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$ e 0 caso contrário;
$f\delta_{ikt}$	Variável binária que assume valor igual a 1 caso exista deslocamento de lotes de vagões vazios do trem $t \in T$, do pátio de origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$ e 0 caso contrário;
dsm_{ijkt}	Variável binária que assume valor igual a 1 caso haja desmembramento do trem $t \in T$ no pátio triagem $j \in J$ e 0 caso contrário;
dso_{ijt}	Variável binária que assume valor igual a 1 caso haja desmembramento do trem $t \in T$ no pátio de origem $i \in I$ e 0 caso contrário;
dsk_{ikt}	Variável binária que assume valor igual a 1 caso haja desmembramento do trem $t \in T$ na origem $i \in I$, indo diretamente para a mina $k \in K$ e 0 caso contrário;
dt_{ijt}	Calcula a quantidade de desmembramentos do trem $t \in T$ no pátio de triagem $j \in J$ a partir da origem $i \in I$;
dot_{it}	Calcula a quantidade de desmembramentos do trem $t \in T$ na origem $i \in I$;
dog_{it}	Variável binária para calcular se ficaram lotes do trem $t \in T$ parados no pátio de origem $i \in I$;
tc_{ijkt}	Tempo de chegada do trem $t \in T$ na mina $k \in K$ saindo da origem $i \in I$ e passando pelo pátio de triagem $j \in J$ até chegar a mina $k \in K$;
tcd_{ikt}	Tempo de chegada do trem $t \in T$ na mina $k \in K$, viajando diretamente da origem $i \in I$ até a mina $k \in K$;
y_{ijkt}	Variável para linearização do termo $x_{ijt} fw_{jkt}$;

z_{ijkt}	Variável para linearização do termo $w_{jkt} f x_{ijt}$;
s_{ijkt}	Variável para linearização do termo $f x_{ijt} f w_{jkt}$;
r_{ijkt}	Variável para linearização do termo $s_{ijkt} dsm_{ijkt}$.

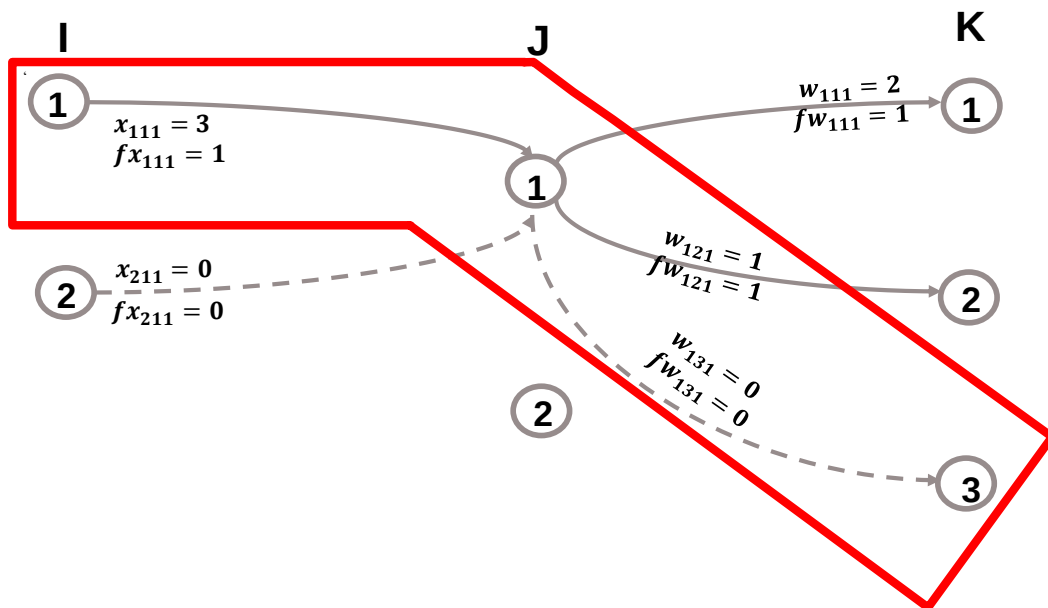
Fonte: O autor, 2019.

Antes de apresentar a Função Objetivo e as Restrições, faz-se necessária uma explicação sobre como foi calculado o fato de haver ou não o desmembramento dos trens de vagões vazios nos pátios de triagem. As Equações (01) calculam se há desmembramento do trem $t \in T$ que chega no pátio de triagem $j \in J$

$$df_{ijkt} = |x_{ijt} - w_{ijt}| \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (01)$$

Ao analisar as Equações (01), é possível perceber duas situações críticas apresentadas nas Figuras 09 e 10, explicadas a seguir.

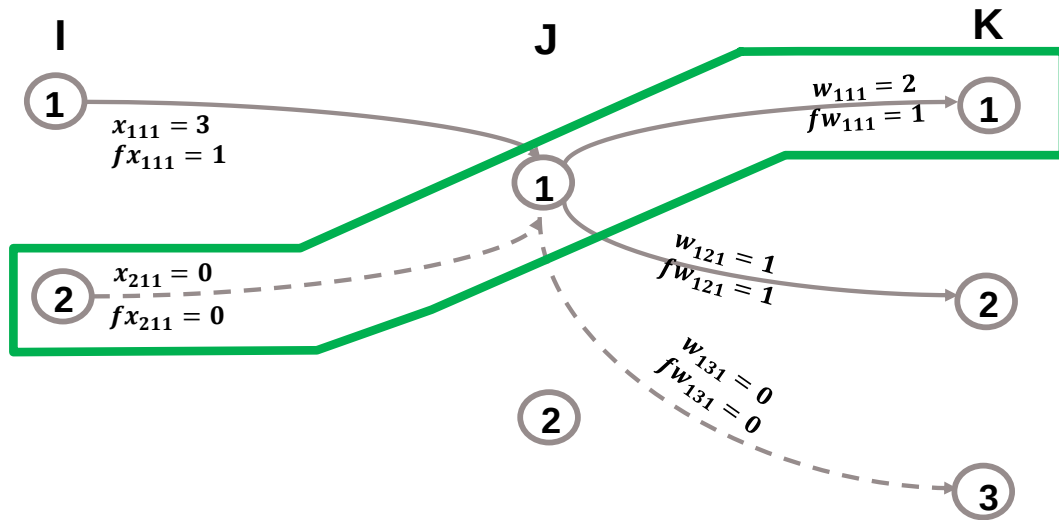
Figura 9 - Fluxo do trem 1 com 3 lotes de vagões vazios.



Fonte: O autor, 2019.

Na Figura 09, tomando o fluxo $i = 1$, $j = 1$ e $k = 3$ percebe-se que se calculada a diferença de fluxo chegar-se-á ao cálculo de $df_{ijkt} = x_{ijt} - w_{jkt}$ em que $fx_{111} = 1$ e $fw_{131} = 0$, assim pode-se verificar que a diferença é igual a $df_{1131} = 3 - 0$. Porém, não se pode contar como diferença de fluxo, pois não há desmembramento no pátio de triagem 1 para o fluxo para $k = 3$.

Figura 10 - Fluxo de trem na origem 2 com 3 lotes de vagões vazios.



Fonte: O autor, 2019.

Na Figura 10, tomando o fluxo $i = 2$, $j = 1$ e $k = 1$ percebe-se que se calculada a diferença de fluxo chegar-se-á ao cálculo da diferença $df_{ijkt} = x_{ijt} - w_{jkt}$ para os fluxos $fx_{211} = 0$ e $fw_{111} = 2$, sendo a diferença $df_{2111} = 0 - 2$.

Esta diferença não é de interesse, dado que não houve fluxo de $i = 2$ para $k = 1$ do trem. Portanto, o cálculo da diferença só pode acontecer caso ocorra fluxo da origem $i \in I$ dos trens de lotes de vagões vazios até o pátio de triagem $j \in J$, e também caso ocorra fluxo do pátio de triagem $j \in J$ até a mina $k \in K$.

Assim, para resolver as duas situações apresentadas anteriormente é necessário reescrever as Equações (01) como $df_{ijkt} = x_{ijt} fw_{jkt} - w_{jkt} fx_{ijt}$. Entretanto, ao multiplicar duas variáveis inteiras, as Equações (01) tornam-se não lineares. A linearização destes termos será apresentada nesta seção mais a frente.

A partir das descrições anteriores, são apresentadas a seguir a função objetivo e as restrições do modelo matemático proposto.

Função Objetivo

Minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} pm_j dt_{ijt} + \phi \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} dot_{it} \\ & + \Psi \left(\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} tcd_{ikt} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} tc_{ijkt} \right) \end{aligned} \quad (02)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_{ijt} + \sum_{k \in K} \delta_{ikt} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (03)$$

$$\begin{aligned} \delta_{ikt} &= 0 \\ &| dp_{ik} = 0 \end{aligned} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (04)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} w_{jkt} + \sum_{i \in I} \sum_{t \in T} \delta_{ikt} = dv_k \quad \forall k \in K \quad (05)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ijt} - \sum_{k \in K} w_{jkt} = 0 \quad \forall j \in J, t \in T \quad (06)$$

$$0 \leq x_{ijt} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (07)$$

$$0 \leq \delta_{ikt} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (08)$$

$$0 \leq w_{jkt} \leq dv_k \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (09)$$

$$fx_{ijt} \geq m x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (10)$$

$$fx_{ijt} \leq Mx_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (11)$$

$$fx_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (12)$$

$$fw_{jkt} \geq m w_{jkt} \quad \forall j \in j, k \in K, t \in T \quad (13)$$

$$fw_{jkt} \leq M w_{jkt} \quad \forall j \in j, k \in K, t \in T \quad (14)$$

$$fw_{jkt} \in \{0,1\} \quad \forall j \in j, k \in K, t \in T \quad (15)$$

$$f\delta_{ikt} \geq m \delta_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (16)$$

$$f\delta_{ikt} \leq M\delta_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (17)$$

$$f\delta_{ikt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (18)$$

$$df_{ijkt} = x_{ijt} fw_{jkt} - w_{jkt} fx_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (19)$$

$$dsm_{ijkt} \geq m df_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (20)$$

$$dsm_{ijkt} \leq M df_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (21)$$

$$dsm_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (22)$$

$$dt_{ijt} \geq \sum_{k \in K} dsm_{ijkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (23)$$

$$dt_{ijt} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (24)$$

$$dt_{ijt} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (25)$$

$$dso_{ijt} \geq m (ov_{it} f x_{ijt} - x_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (26)$$

$$dso_{ijt} \leq M (ov_{it} f x_{ijt} - x_{ijt}) \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (27)$$

$$dso_{ijt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, t \in T \quad (28)$$

$$dsk_{ikt} \geq m (ov_{it} f \delta_{ikt} - \delta_{ikt}) \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (29)$$

$$dsk_{ikt} \leq M (ov_{it} f \delta_{ikt} - \delta_{ikt}) \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (30)$$

$$dsk_{ikt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (31)$$

$$dog_{it} \geq m (ov_{it} - \sum_{j \in J} x_{ijt} - \sum_{k \in K} \delta_{ikt}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (32)$$

$$dog_{it} \leq M (ov_{it} - \sum_{j \in J} x_{ijt} - \sum_{k \in K} \delta_{ikt}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (33)$$

$$dog_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (34)$$

$$dot_{it} \geq \left(\sum_{j \in J} dso_{ijt} + \sum_{k \in K} dsk_{ikt} \right) - (1 - dog_{it}) \quad \forall i \in I, t \in T \quad (35)$$

$$dot_{it} \leq ov_{it} \quad \forall i \in I, t \in T \quad (36)$$

$$dot_{it} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in I, t \in T \quad (37)$$

$$tc_{ijkt} = tco_{it} fx_{ijt} fw_{jkt} + (tot_{ij} + ttm_{jk}) fx_{ijt} fw_{jkt} + tmt_j fx_{ijt} fw_{jkt} dsm_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (38)$$

$$tc_{ijkt} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (39)$$

$$tc_{ijkt} \leq ht - tom_k w_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (40)$$

$$tcd_{ikt} = tco_{it} f\delta_{ikt} + t\delta_{ik} f\delta_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (41)$$

$$tcd_{ikt} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (42)$$

$$tcd_{ikt} \leq ht - tom_k \delta_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (43)$$

$$cpm_k \geq w_{jkt} \quad \forall j \in J, k \in K, t \in T \quad (44)$$

$$tc_{ijkt} \leq hi_k \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (45)$$

$$tc_{ijkt} \geq hf_k \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (46)$$

$$tcd_{ikt} \leq hi_k \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (47)$$

$$tcd_{ikt} \geq hf_k \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (48)$$

A função objetivo, Equação (02), que deve ser minimizada, é dividida em quatro partes: 1) valor que representa a multiplicação da prioridade de manobra vezes a quantidade de desmembramentos nos trens em pátios de triagem; 2) quantidade de desmembramentos em pátios de origem dos trens $t \in T$; 3) soma dos tempos de percurso dos trens $t \in T$ viajando da origem diretamente para a mina; 4) soma dos tempos de percurso dos trens $t \in T$ viajando da origem diretamente para a mina, passando por pelo menos um pátio de triagem.

Na primeira parcela, multiplica-se pela prioridade de manobra do pátio de triagem $j \in J$ pela quantidade de desmembramentos do trem $t \in T$ nesse pátio de triagem. A segunda parcela é multiplicada por um parâmetro ϕ , que será apresentado ao fim dessa seção como foi calculado, para reduzir os desmembramentos no pátio de origem $i \in I$. A terceira e a quarta parcela são multiplicadas pelo parâmetro Ψ , para reduzir o impacto delas na função objetivo. O valor adotado para esse parâmetro é apresentado ao fim dessa seção.

As Restrições (03) asseguram que o fluxo saindo da origem $i \in I$ não pode ser maior que a oferta de lotes de vagões vazios por trem $t \in T$. As Restrições (04) garantem os destinos que podem ou não ser atendidos. Este conjunto de restrições garante que a mina $k \in K$ seja atendida diretamente da origem $i \in I$ sem passar pelo pátio de triagem $j \in J$. O conjunto das Restrições (05) garante que toda demanda por lotes de vagões vazios na mina $k \in K$ deve ser atendida. As Restrições (06) garantem a conservação de fluxo no nó.

As restrições (07) garantem que a quantidade de lotes de vagões vazios entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$ deve ser positiva e menor que a oferta de vagões na origem $i \in I$. O conjunto das Restrições (08) assegura que a quantidade de lotes de vagões vazios da origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$ seja positiva e menor que a oferta de vagões na origem $i \in I$. As Restrições (09) asseguram que a quantidade de lotes de vagões vazios entre o pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$ seja positiva e menor que a oferta de vagões na origem $i \in I$.

As Restrições (10), (11) e (12) definem se há fluxo entre o nó que representa o pátio de origem $i \in I$ e o nó que representa o pátio de triagem $j \in J$. As Restrições (10) garantem que o fluxo $f_{x_{ijt}}$ deve ser maior ou igual a quantidade de lotes da origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$ multiplicada por um parâmetro de lógica do modelo (adotado 0,001). As Restrições (11) determinam que o fluxo $f_{x_{ijt}}$ deve ser menor ou igual que a quantidade de lotes da origem $i \in I$ até o pátio de triagem $j \in J$ multiplicado por um parâmetro para lógica do modelo (adotado 9999,0). Já as Restrições (12) determinam que o fluxo $f_{x_{ijt}}$ seja uma variável binária com valor 1 caso ocorra e com valor 0 caso contrário.

As Restrições (13), (14) e (15) apenas diferem das restrições (10), (11) e (12) pois asseguram a determinação do fluxo entre o pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$.

O conjunto das Restrições (16), (17) e (18) apenas diferem das restrições (10), (11) e (12) pois asseguram a determinação do fluxo da origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$.

As Restrições (19) garantem o cálculo da diferença dos fluxos nos arcos entre origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$ e os arcos entre o pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$. Assim, a oferta de trens de lotes de vagões vazios sem desmembramento é igual a diferença entre as variáveis de decisão $x_{ijt} f_{w_{jkt}}$, representando o fluxo no arco entre o pátios de triagem $j \in J$ e a minas $k \in K$ multiplicado pelo número de trens no fluxo entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$, e as variáveis $w_{jkt} f_{x_{ijt}}$ que representam o número de trens no fluxo entre o pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$ e o fluxo entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$. Contudo, esta restrição torna-se não linear ao multiplicar-se uma variável binária por uma variável inteira. Assim,

faz-se necessária uma linearização deste conjunto de restrições, a qual será demonstrada adiante.

As Restrições (20), (21) e (22) definem que caso haja diferença de fluxo, haverá desmembramento no pátio de triagem $j \in J$. Assim, as Restrições (20) asseguram que se houver desmembramento no pátio de triagem $j \in J$, o mesmo deve ser maior ou igual a um número adotado para lógica do modelo (adotado 0,001) multiplicado pela diferença da quantidade de lotes ao longo de todo fluxo. As Restrições (21) asseguram que se houver desmembramento no pátio de triagem $j \in J$, o mesmo deve ser menor ou igual a um valor adotado para lógica do modelo (adotado 9999,0) multiplicado pela diferença da quantidade de lotes ao longo de todo fluxo. As Restrições (22) garantem que a variável binária de decisão dsm_{ijkt} seja 1 caso exista desmembramento e 0 caso contrário.

As Restrições (23) calculam a quantidade de desmembramento em cada trem $t \in T$ no pátio de triagem $j \in J$. As Restrições (24) garantem que este desmembramento seja inteiro positivo assim como o conjunto das Restrições (25) garante que o desmembramento seja menor que a oferta de lotes de vagões vazios na origem $i \in I$.

As Restrições (26), (27) e (28) calculam se há fluxo quando há desmembramento origem $i \in I$ do trem $t \in T$ indo para $j \in J$. Assim, a variável para o fluxo pós desmembramento na origem $i \in I$, deve ser maior ou igual ao parâmetro matemático adotado (0,001) multiplicado pela oferta de vagões na origem $i \in I$ e o fluxo entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$ menos o número de lotes nesse mesmo arco. Esta variável também deve ser menor ou igual ao parâmetro matemático adotado (9999,0) multiplicado pela oferta de vagões na origem $i \in I$ e o fluxo entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$ menos o número de lotes nesse mesmo arco. O conjunto das Restrições (28) garante o domínio da variável.

As Restrições (29), (30) e (31) calculam o desmembramento nos nós que representam o trem $t \in T$ indo do pátio de origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$. O conjunto das Restrições (29) e (30) calculam o desmembramento em função dos parâmetros de lógica do modelo (adotados 0,001 e 9999,0), a oferta de lotes de vagões vazios na origem $i \in I$, o fluxo da origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$ e a

quantidade de lotes de vagões vazios indo diretamente à mina $k \in K$. As Restrições (31) garantem o domínio da variável.

As Restrições (32), (33) e (34) calculam se ficaram lotes desmembrados parados na origem $i \in I$. As Restrições (32) e (33) calculam os lotes parados em função dos parâmetros usados para lógica do modelo (0,001 e 9999,0), a oferta de lotes de vagões vazios na origem $i \in I$ e a quantidade total de lotes na origem $i \in I$. O conjunto das Restrições (34) garantem o domínio da variável.

As Restrições (35) calculam a quantidade de desmembramento na origem $i \in I$. Os conjuntos das Restrições (36) e (37) garantem que esta quantidade de desmembramento deve ser inteira positiva e menor que a quantidade de lotes de vagões vazios ofertados na origem $i \in I$.

As Restrições (38) calculam o tempo de chegada do trem $t \in T$ na mina $k \in K$ quando passa pelo pátio de triagem $j \in J$. Contudo, esta restrição torna-se não linear ao multiplicar-se as variáveis binárias $fx_{ijt} fw_{jkt}$ pela variável tco_{it} . Assim como os termos $tmt_j fx_{ijt} fw_{jkt} dsm_{ijkt}$ que possuem a multiplicação de variáveis binárias. Desta forma, faz-se necessária a linearização deste conjunto de restrições, a qual será demonstrada adiante. As Restrições (39) garantem que o tempo de chega do trem $t \in T$ na mina $k \in K$ seja positivo.

As Restrições (40) calculam o horizonte de trabalho máximo. Este conjunto limita o tempo de chegada na mina $k \in K$ a ser menor ou igual ao horizonte de trabalho menos o tempo de operação na mina $k \in K$, multiplicado pelo número de lotes no fluxo do pátio de triagem $j \in J$ à mina $k \in K$.

As Restrições (41), (42) e (43) são análogas às Restrições (38), (39) e (40), entretanto, consideram o trem $t \in T$ indo da origem $i \in I$ diretamente à mina $k \in K$.

O conjunto das Restrições (44) calcula a capacidade da mina $k \in K$, a qual deve ser maior que a quantidade de lotes de vagões vazios do fluxo entre a origem $i \in I$ e a mina $k \in K$.

O conjunto das Restrições (45) e (46) garantem o início e fim de uma janela de manutenção, quando houver, na mina $k \in K$ quando o trem $t \in T$ passar pelo pátio

de triagem $j \in J$. O conjunto das Restrições (47) e (48) são análogas as Restrições (45) e (46), entretanto, garantem uma janela de manutenção quando o trem $t \in T$ for diretamente da origem $i \in I$ até a mina $k \in K$.

Tendo em vista que o conjunto de Restrições (19) é não linear, por conta dos termos $x_{ijt} fw_{jkt}$ e $w_{jkt} fx_{ijt}$, apresenta-se a linearização desses dois termos.

Cria-se a variável de decisão y_{ijkt} e as Restrições de (49) a (52) para linearizar o termo $x_{ijt} fw_{jkt}$ das Equações (19). Define-se y_{ijkt} como uma variável de decisão binária utilizada para linearização do fluxo do pátio de triagem $j \in J$ à mina $k \in K$, multiplicado pela quantidade de trens do pátio de origem $i \in I$ ao pátio de triagem $j \in J$.

$$y_{ijkt} \leq lmax fw_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (49)$$

$$y_{ijkt} \leq x_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (50)$$

$$y_{ijkt} \geq x_{ijt} - lmax (1 - fw_{jkt}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (51)$$

$$y_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (52)$$

Os conjuntos de Restrições (49) a (52) garantem a variável binária de decisão y_{ijkt} para linearização do número de trens pelo fluxo nos primeiros arcos. Assim as Restrições (49) asseguram que a variável binária de decisão criada para linearização, y_{ijkt} , seja menor ou igual ao número máximo de lotes do trem $t \in T$ multiplicado pelo fluxo entre os pátios de triagem $j \in J$ e a minas $k \in K$. As Restrições (50) visam assegurar que a variável binária de decisão y_{ijkt} seja menor ou igual a quantidade de lotes do trem $t \in T$ no fluxo entre a origem $i \in I$ e o pátio de triagem $j \in J$.

As Restrições (51) garantem que a variável binária de decisão y_{ijkt} seja maior ou igual que a diferença entre a quantidade de lotes do trem $t \in T$ da origem $i \in I$ ao pátio de triagem $j \in J$ e a quantidade máxima de lotes multiplicada por 1 menos o fluxo do arco

entre o pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$. As Restrições (52) apenas garantem o domínio da variável.

Cria-se também a variável de decisão z_{ijkt} e as Restrições de (53) a (56) para linearizar o termo $w_{jkt} f_{x_{ijt}}$ das Equações (19). Define-se z_{ijkt} como uma variável de decisão binária utilizada para linearização do fluxo do pátio de origem $i \in I$ ao pátio de triagem $j \in J$ do trem $t \in T$, multiplicado pela quantidade de lotes de vagões vazios do pátio de triagem $j \in J$ à mina $k \in K$.

$$z_{ijkt} \leq lmax f_{x_{ijt}} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (53)$$

$$z_{ijkt} \leq w_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (54)$$

$$z_{ijkt} \geq w_{jkt} - lmax (1 - f_{x_{ijt}}) \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (55)$$

$$z_{ijkt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (56)$$

As Restrições (53) a (56) são similares as restrições anteriores para linearização. Contudo, estas restrições dizem respeito a variável binária de decisão z_{ijkt} para linearização de $w_{jkt} f_{x_{ijt}}$.

Assim, o modelo matemático para ser linear, deve retirar as Restrições (19), incluir as Restrições (49) a (56), incluir as Restrições (57) com as duas variáveis y_{ijtk} e z_{ijtk} .

$$df_{ijkt} = y_{ijkt} - z_{ijkt} \quad (57)$$

As Restrições (57) garantem o cálculo da diferença dos fluxos nos arcos entre a origem $i \in I$ e o pátios de triagem $j \in J$ e o arcos entre o pátio de triagem $j \in J$ e a minas $k \in K$. Logo, a oferta de trens de lotes de vagões vazios sem desmembramento é igual a diferença entre as variáveis de linearização y_{ijkt} e z_{ijkt} .

Deve-se considerar, também, que para o cálculo do tempo de chegada nas minas, algumas variáveis binárias são multiplicadas por variáveis inteiras, tornando o conjunto das Restrições (38) não linear. Desta forma, são criadas as variáveis s_{ijkt} e r_{ijkt} para linearizar o conjunto das Restrições (38) e são adicionados os conjuntos de Restrições (58) a (65):

$$s_{ijkt} \leq fx_{ijt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (58)$$

$$s_{ijkt} \leq fw_{jkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (59)$$

$$s_{ijkt} \geq fx_{ijt} + fw_{jkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (60)$$

$$s_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (61)$$

$$r_{ijkt} \leq s_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (62)$$

$$r_{ijkt} \leq dsm_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (63)$$

$$r_{ijkt} \geq s_{ijkt} + dsm_{ijkt} - 1 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (64)$$

$$r_{ijkt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (65)$$

As Restrições (58) a (61) asseguram a linearização de $fx_{ijt}fw_{jkt}$ o cálculo do tempo. As Restrições (58) a (60) garantem o cálculo da variável de linearização s_{ijkt} em função dos fluxos entre o pátio de origem $i \in I$, pátio de triagem $j \in J$ e a mina $k \in K$, multiplicados pelo tempo de chegada na origem $i \in I$. As Restrições (61) garantem s_{ijkt} como uma variável binária de decisão assumindo os valores de 0 e 1.

As Restrições (62) a (65) asseguram a linearização de r_{ijkt} , para multiplicação das variáveis $tmt_j fx_{ijt} fw_{jkt} dsm_{ijkt}$. O conjunto das Restrições (62) a (64) garantem o cálculo da variável de decisão r_{ijkt} em função da variável anterior, s_{ijkt} , e do desmembramento (caso ocorra) nos pátios de triagem $j \in J$. Já o conjunto de Restrições (65) garante r_{ijkt} como uma variável binária de decisão assumindo valor de 0 ou 1.

Assim, para linearizar o modelo, deve-se trocar as Restrições (38) pelas Restrições (66) e adicionar as Restrições (58) a (65):

$$tc_{ijkt} = tco_{it}s_{ijkt} + (tot_{ij} ttm_{jk}) s_{ijkt} + tmt_j r_{ijkt} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, t \in T \quad (66)$$

As Restrições (66) calculam o tempo de chegada do trem $t \in T$ na mina $k \in K$. Este tempo é representado pela soma do tempo de chegada do trem $t \in T$, os tempos de viagem entre origem $i \in I$ e pátio de triagem $j \in J$ e à mina $k \in K$, considerando os fluxos e o tempo de manobra no pátio de triagem.

Considerando os conjuntos I, J, K, T e também as variáveis de decisão pode-se calcular a quantidade de variáveis do modelo. Assim, o modelo matemático possui $|T| (4 |I| |J| + 2 |J| |K| + 3 |I| |K| + 6 |I| |J| |K| + 2 |I|)$ variáveis inteiras e $2 |T| |I| |J| |K|$ variáveis contínuas.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® Versão 12.8 (IBM, 2018) em um computador com processador Dual Core 4116 com 12 núcleos cada e com 128 GB de memória RAM.

O objetivo principal dos planejadores da EFVM é a minimização do desmembramento dos trens. Entretanto também é visado, como objetivo secundário, minimizar os tempos de percursos dos trens ao longo de todo fluxo. Desta forma, testou-se o parâmetro Ψ na função objetivo, Equação 02, visando alcançar os dois objetivos de tal forma que se mantenha a importância da minimização do desmembramento.

Foi realizada uma análise de sensibilidade da Função Objetivo (FO) em relação ao parâmetro Ψ , variando este parâmetro de 0,0010 a 0,0001 em todas as instâncias. Foram testados os resultados para os valores de 0,0010, 0,0005, 0,0003, 0,0002 e 0,0001 verificando a diferença nos valores da FO, Tempo de Execução, desmembramento na origem e desmembramento no pátio de triagem além do tempo de viagem de cada instância, conforme as Tabelas 3 a 12. Todas as tabelas citadas possuem 7 colunas, sendo a coluna 1 o parâmetro Ψ , seguido da FO, Tempo de execução no CPLEX, os desmembramentos no pátio de triagem e no pátio de origem, além do tempo total de percurso dos trens. Para todas as instâncias, o GAP que é a porcentagem calculada como $GAP = (UB - LB) / UB$, foi igual a zero, ou seja, o CPLEX encontrou a solução ótima para todas as instâncias.

Tabela 3 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 01

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	11,96	11,96	11,96	2,11	4	0	7.959,00
0,0005	7,98	7,98	7,98	1,77	4	0	7.959,00
0,0003	6,39	6,39	6,39	2,16	4	0	7.959,00
0,0002	5,59	5,59	5,59	2,89	4	0	7.959,00
0,0001	4,80	4,80	4,80	2,22	4	0	7.959,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 4 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 02

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	19,59	19,59	19,59	3,58	3	0	16.585,00
0,0005	11,29	11,29	11,29	4,84	3	0	16.585,00
0,0003	7,98	7,98	7,98	4,09	3	0	16.585,00
0,0002	6,32	6,32	6,32	4,67	3	0	16.585,00
0,0001	4,66	4,66	4,66	5,27	3	0	16.585,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 5 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 03

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	24,22	24,22	24,22	3,34	6	0	18.223,00
0,0005	15,11	15,11	15,11	3,44	6	0	18.223,00
0,0003	11,47	11,47	11,47	3,56	6	0	18.223,00
0,0002	9,64	9,64	9,64	4,19	6	0	18.223,00
0,0001	7,82	7,82	7,82	4,13	6	0	18.223,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 6 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 04

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	21,00	21,00	21,00	15,64	6	0	15.004,00
0,0005	13,50	13,50	13,50	25,23	6	0	15.004,00
0,0003	10,50	10,50	10,50	17,30	6	0	15.004,00
0,0002	9,00	9,00	9,00	26,31	6	0	15.004,00
0,0001	7,50	7,50	7,50	4,69	6	0	15.004,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 7 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 05

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	24,21	24,21	24,21	7,28	8	0	16.209,00
0,0005	16,10	16,10	16,10	9,39	8	0	16.209,00
0,0003	12,86	12,86	12,86	7,98	8	0	16.209,00
0,0002	11,24	11,24	11,24	10,05	8	0	16.209,00
0,0001	9,62	9,62	9,62	9,13	8	0	16.209,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 8 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 06

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	26,59	26,59	26,59	27,11	7	0	19.588,00
0,0005	16,79	16,79	16,79	5,79	7	0	19.588,00
0,0003	12,88	12,88	12,88	43,41	7	0	19.588,00
0,0002	10,92	10,92	10,92	5,22	7	0	19.588,00
0,0001	8,96	8,96	8,96	41,30	7	0	19.588,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 9 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 07

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	25,55	25,55	25,55	47,61	8	0	17.552,00
0,0005	16,78	16,78	16,78	50,45	8	0	17.552,00
0,0003	13,27	13,27	13,27	53,19	8	0	17.552,00
0,0002	11,51	11,51	11,51	90,86	8	0	17.552,00
0,0001	9,76	9,76	9,76	77,56	8	0	17.552,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 10 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 08

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	22,30	22,30	22,30	3,91	5	0	17.301,00
0,0005	13,65	13,65	13,65	4,03	5	0	17.301,00
0,0003	10,19	10,19	10,19	3,95	5	0	17.301,00
0,0002	8,46	8,46	8,46	18,47	5	0	17.301,00
0,0001	6,73	6,73	6,73	4,38	5	0	17.301,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 11 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 09

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	18,35	18,35	18,35	4,52	3	0	15.345,00
0,0005	10,67	10,67	10,67	5,00	3	0	15.345,00
0,0003	7,60	7,60	7,60	5,84	3	0	15.345,00
0,0002	6,07	6,07	6,07	5,59	3	0	15.345,00
0,0001	4,53	4,53	4,53	6,66	3	0	15.345,00

Fonte: O autor, 2019.

Tabela 12 – Variação do parâmetro Ψ testada para Instância 10

Parâmetro Ψ	FO	UB	LB	Tempo de Execução (s)	Desm. Pátio Triagem (un)	Desm. Pátio Origem (un)	Tempo de Viagem (min)
0,0010	16,58	16,58	16,58	2,64	6	0	10.577,00
0,0005	11,29	11,29	11,29	2,66	6	0	10.577,00
0,0003	9,17	9,17	9,17	3,03	6	0	10.577,00
0,0002	8,12	8,12	8,12	2,69	6	0	10.577,00
0,0001	7,06	7,06	7,06	3,03	6	0	10.576,90

Fonte: O autor, 2019.

Foi possível constatar que o parâmetro Ψ não afetou a Função Objetivo e os desmembramentos, por consequência não interferindo no tempo total de percurso dos trens. Sendo assim, qualquer valor do parâmetro Ψ poderia ter sido utilizado. Contudo, a alteração do valor do parâmetro Ψ apresentou um ganho no tempo de execução no CPLEX, assim utilizou-se o parâmetro de 0,001 na FO, pois o mesmo apresentou menores tempos de execução para a maioria das instâncias, conforme as Tabelas 3 a 13. Logo, os resultados obtidos pelo CPLEX utilizando o parâmetro $\Psi = 0,001$ para as instâncias reais são apresentados na Tabela 13. A Tabela 13 foi extraída da primeira linha das Tabelas 3 a 12.

Tabela 13 - Resultados do CPLEX

Instância	Função Objetivo	Quantidade de desmembramento (un)	Tempo total de percurso (min)	Tempo de execução (s)
1	11,959	4	7.959,00	2,11
2	19,585	3	16.585,00	3,58
3	24,223	6	18.223,00	3,34
4	21,004	6	15.004,00	15,64
5	24,209	8	16.209,00	7,28
6	26,588	7	19.588,00	27,11
7	25,552	8	17.552,00	47,61
8	22,301	5	17.301,00	3,91
9	18,345	3	15.345,00	4,52

10	16,577	6	10.577,00	2,64
----	--------	---	-----------	------

Fonte: O autor, 2019.

É possível verificar que o *solver* CPLEX conseguiu encontrar soluções ótimas para todas as instâncias testadas em bons tempos de execução, menos de 60 segundos, servindo para planejar e, se necessário, replanejar a distribuição dos trens de lotes de vagões vazios quantas vezes for preciso.

Como as instancias mostradas na Tabela 13 foram elaboradas com dados fornecidos pela equipe da EFVM, decidiu-se por comparar os resultados alcançados pelo CPLEX com os resultados alcançados pela EFVM utilizando o processo manual.

O Gráfico 1 apresenta um comparativo das distribuições efetuadas pelo CPLEX e pela equipe da EFVM. É possível verificar que, para todas instâncias, o CPLEX propôs na sua solução menos desmembramentos do que a distribuição efetuada pela equipe da EFVM. Na Instância 9, Gráfico 1, o CPLEX propôs 8 desmembramentos menos que o planejamento da equipe da EFVM. Considerando que cada desmembramento leva em torno de 4 horas, pode-se perceber que a solução do CPLEX representa um ganho de 32 horas de operação de locomotiva de manobra, maquinista e manobrador de pátio.

Fonte: O autor, 2019

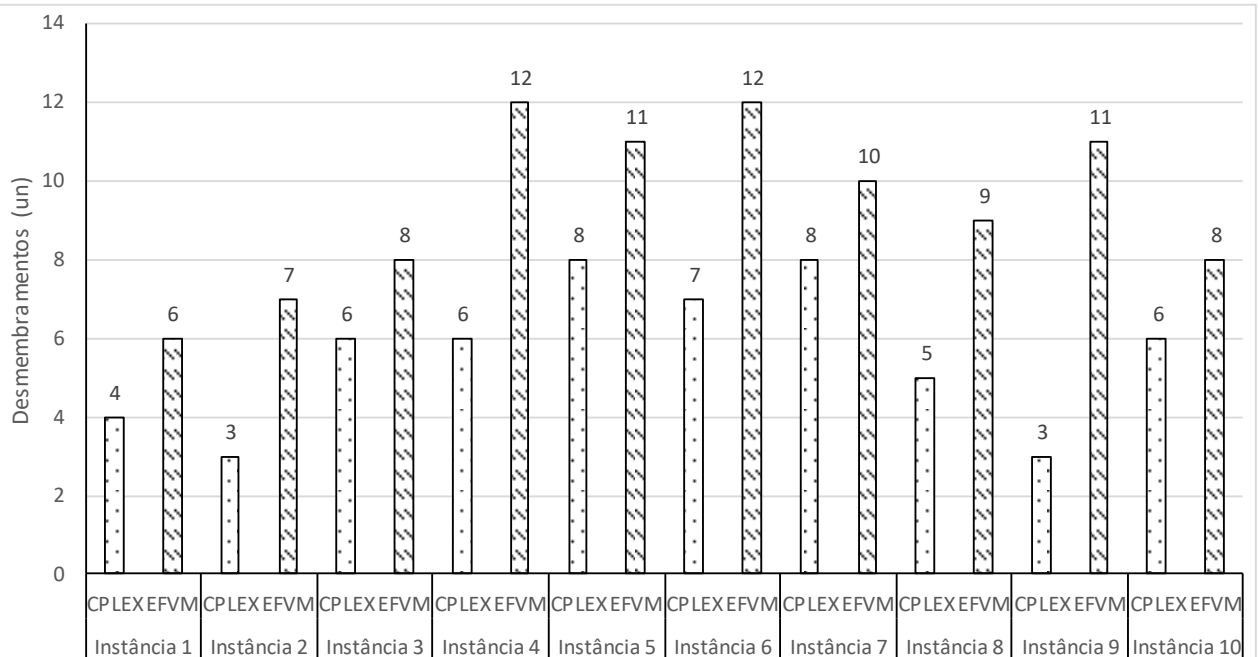


Gráfico 1 - Comparativo de desmembramentos entre CPLEX e Equipe EFVM

Somando o ganho de 38 desmembramentos em todas instâncias, é possível afirmar que essa economia em desmembramentos se traduz em ganhos de 152 horas de operação, além de manobreadores e maquinistas.

As Tabelas 14 a 23 mostram um comparativo entre as distribuições do *solver* CPLEX e a equipe da EFVM. As Figuras 11 a 20 ilustram cada distribuição do CPLEX para todas as instâncias.

A Tabela 14, Instância 1, apresenta um comparativo entre as distribuições para 12 trens com oferta igual a demanda para 27 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 4 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 6 desmembramentos.

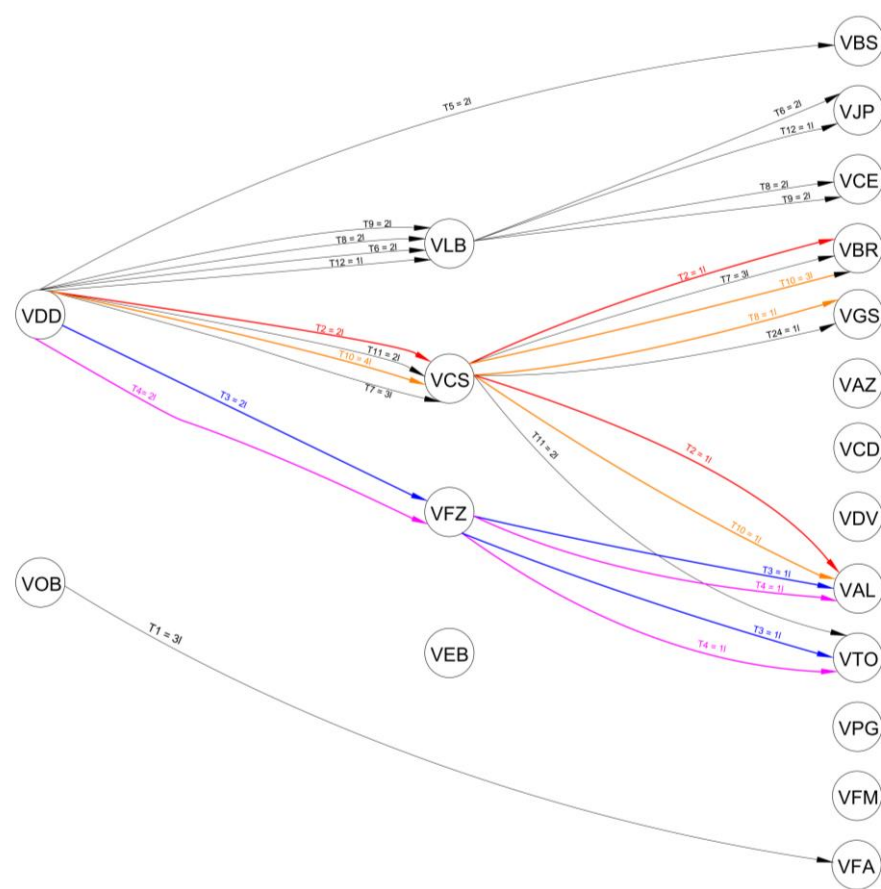
Tabela 14 - Comparativo das distribuições para a Instância 1.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M082	FA	FA	FA		T1	FA	FA	FA	
M064	AL	AL			T2	BR	AL		
M675	TO	TO			T3	AL	TO		
M619	BR	BR			T4	AL	TO		
M901	AL	AL			T5	BS	BS	-	
M007	CE	JP			T6	JP	JP		
M997	BR	BR	BR		T7	BR	BR	BR	
M715	CE	JP			T8	CE	CE		
M017	BR	BR			T9	CE	CE		
M057	BS	BS	TO	TO	T10	BR	BR	BR	AL
M021	CE	JP			T11	TO	TO		
M003	CE				T12	JP			

Fonte: O autor, 2019.

A instância 1, Figura 11, apresentou um total de 4 desmembramentos. Os trens t_2 e t_{10} desmembraram no pátio de Costa Lacerda atendendo as minas de Brucutu e Alegria e os trens t_3 e t_4 desmembraram no pátio de Fazendão atendendo as minas de Alegria e Timbopeba. Os trens t_1 com 3 lotes e t_5 com 2 lotes foram da origem diretamente às minas de Fábrica e Bicas, respectivamente. Os trens t_1 e t_7 distribuíram da mesma forma que os trens M082 e M997 da EFVM, respectivamente.

Figura 11 - Distribuição da Instância 1 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 15, Instância 2, compara as distribuições para 20 trens com oferta de 41 lotes e demanda de 39 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 3 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 7 desmembramentos.

Tabela 15 – Comparativo das distribuições para a Instância 2.

EFVM			
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote
M046	FA	FA	
M079	BR	BR	BR
M833	BR	BR	
M053	TO		
M783	AZ	CD	
M011	CE	JP	
M013	AL	AL	

CPLEX			
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote
T1	FA	FA	
T2	AL	TO	
T3	AL	FA	
T4	AZ		
T5	FA	AL	-
T6	CE	CE	
T7	JP	JP	

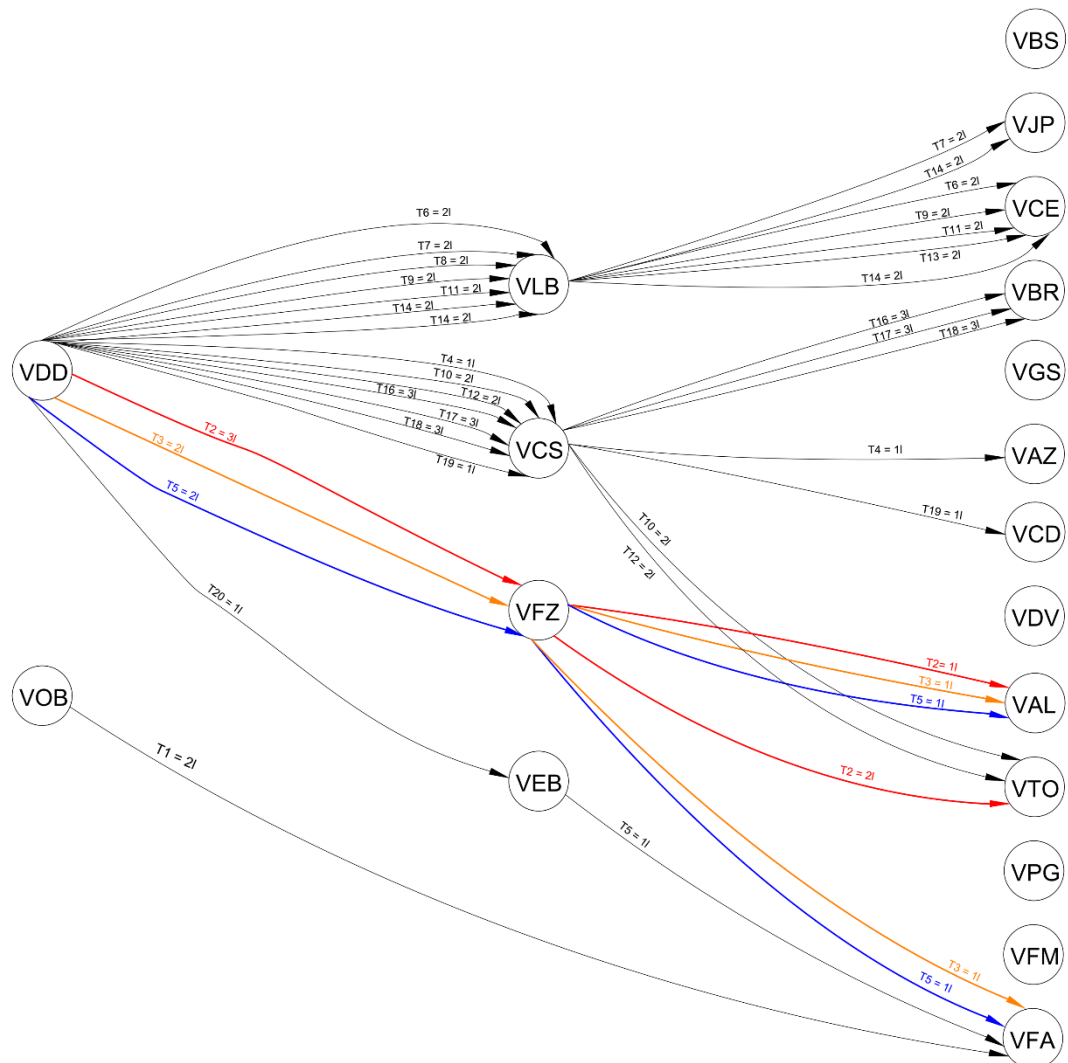
M015	BR	BR	
M057	CE	CE	
M023	TO	TO	
M059	CE	JP	
M729	FA	TO	
M061	CE	CE	
M031	TO	TO	
M035	CE	CE	
M991	BR	BR	BR
M017	FA	FA	AL
M997	CE	CE	JP
M707	JP		
M073	JP		

T8	CE	CE	
T9	CE	CE	
T10	TO	TO	
T11	CE	CE	
T12	TO	TO	
T13	CE	CE	
T14	CE	CE	
T15	PARADO ORIGEM		
T16	BR	BR	BR
T17	BR	BR	BR
T18	BR	BR	BR
T19	CD		
T20	FA	FA	

Fonte: O autor, 2019.

A instância 2, Figura 12, apresentou um total de 3 desmembramentos. Os trens t_2 , t_3 e t_5 desmembraram no pátio de Fazendão atendendo as minas de Alegria, Timbopeba e Fábrica. O t_2 , com 2 lotes, desmembrou no pátio de triagem direcionando 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O t_3 desmembrou no pátio de triagem direcionando 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica. O t_5 desmembrou no pátio de triagem e efetuou a mesma distribuição do t_3 . A oferta de trens, maior que a demanda em 2 lotes, ocasionou a parada do t_{15} na origem, ainda sim atendendo toda demanda nas minas. O t_1 , com 2 lotes, foi diretamente da origem de Ouro Branco até a mina de Fábrica. Os trens t_1 , t_9 , t_{10} , t_{13} e t_{16} , respectivamente M046, M057, M023, M061, M991 da EFVM, apresentaram a mesma distribuição.

Figura 12 - Distribuição da Instância 2 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 16, Instância 3, apresenta um comparativo entre as distribuições para 19 trens com oferta igual a demanda de 41 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 6 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 8 desmembramentos.

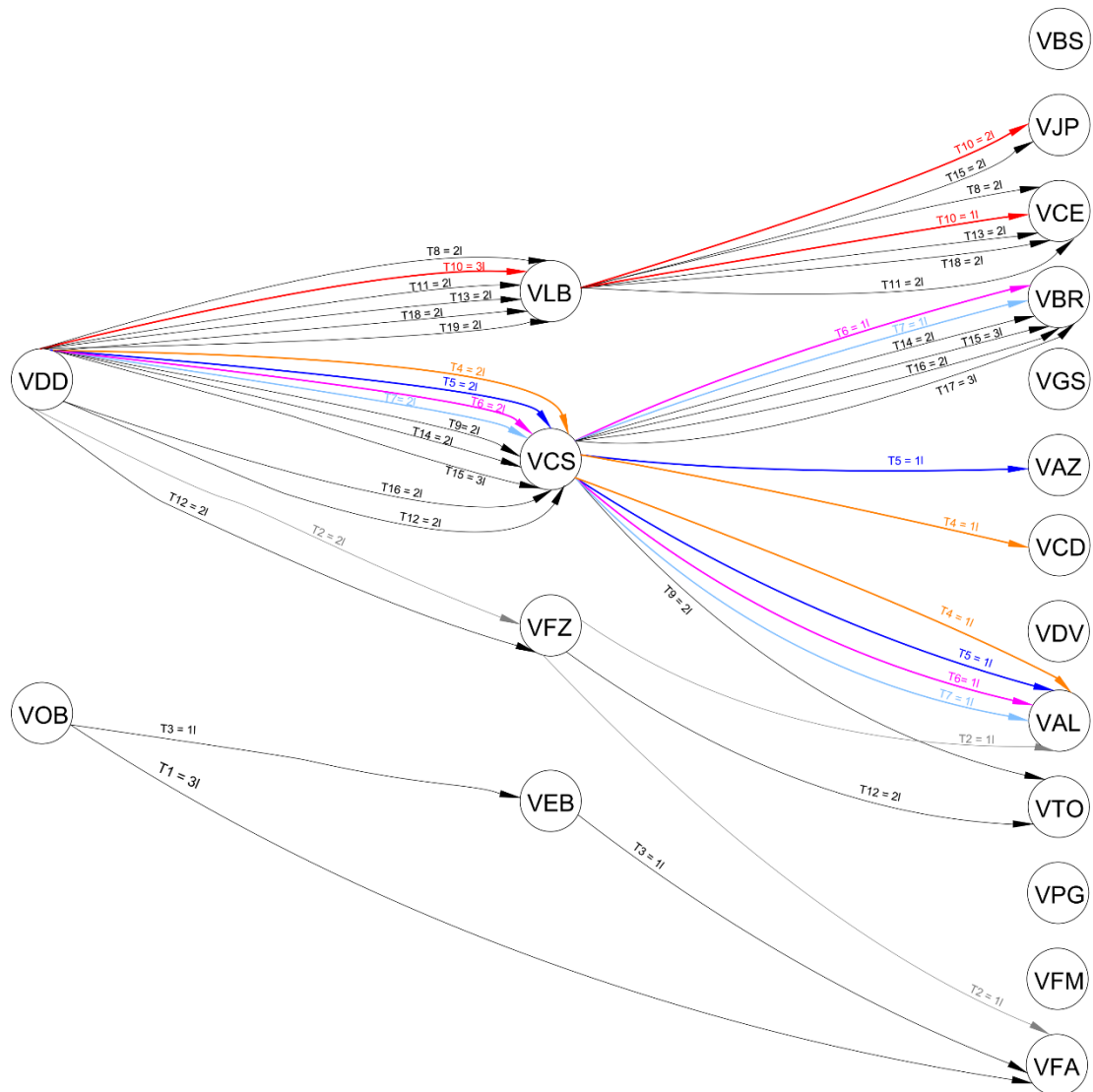
Tabela 16 – Comparativo das distribuições para a Instância 3.

EFVM				CPLEX			
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote
M619	FA	FA	FA	T1	FA	FA	FA
M901	FA	FA		T2	AL	FA	
M037	AL			T3	FA		
M017	AZ	CD		T4	CD	AL	
M019	BR	BR		T5	AZ	AL	-
M821	TO	TO		T6	BR	AL	
M117	AL	AL		T7	BR	AL	
M023	JP	CE		T8	CE	CE	
M025	CE	JP		T9	TO	TO	
M119	BR	BR	BR	T10	JP	JP	CE
M027	CE	CE		T11	CE	CE	
M029	BR	BR		T12	TO	TO	
M731	CE	JP		T13	CE	CE	
M033	CE	CE		T14	BR	BR	
M001	BR	BR	BR	T15	JP	JP	
M805	AL	AL		T16	BR	BR	
M007	CE	CE	JP	T17	BR	BR	BR
M009	TO	TO		T18	CE	CE	
M089	BR	BR		T19	JP	JP	

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 3, Figura 13, apresentou um total de 6 desmembramentos. O trem t_{10} , originalmente com 3 lotes, desmembrou no pátio de Laboriau distribuindo 2 lotes para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. Os trens t_4 , t_5 , t_6 e t_7 desmembraram no pátio de Costa Lacerda, sendo que o t_4 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Capitão Eduardo. O t_5 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Azurita e 1 lote para a mina de Alegria. O t_6 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Brucutu e 1 lote para a mina de Alegria. O t_7 , com 2 lotes, também distribuiu 1 lote para a mina de Brucutu e 1 lote para a mina de Alegria. O t_2 , com 2 lotes, desmembrou no pátio de triagem de Fazendão direcionando 1 lote para a mina de Alegria e 1 lotes para a mina de Fábrica. O trem t_2 , com 2 lotes, foi da origem de Ouro Branco até a mina de Fábrica passando pelo pátio de triagem de Fazendão. Os trens t_1 e t_{11} apresentaram a mesma distribuição que os trens M619 e M027 da EFVM, respectivamente.

Figura 13 - Distribuição da Instância 3 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 17, Instância 4, apresenta um comparativo entre as distribuições para 16 trens com oferta de 38 lotes e demanda nas minas de 34 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 6 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 12 desmembramentos.

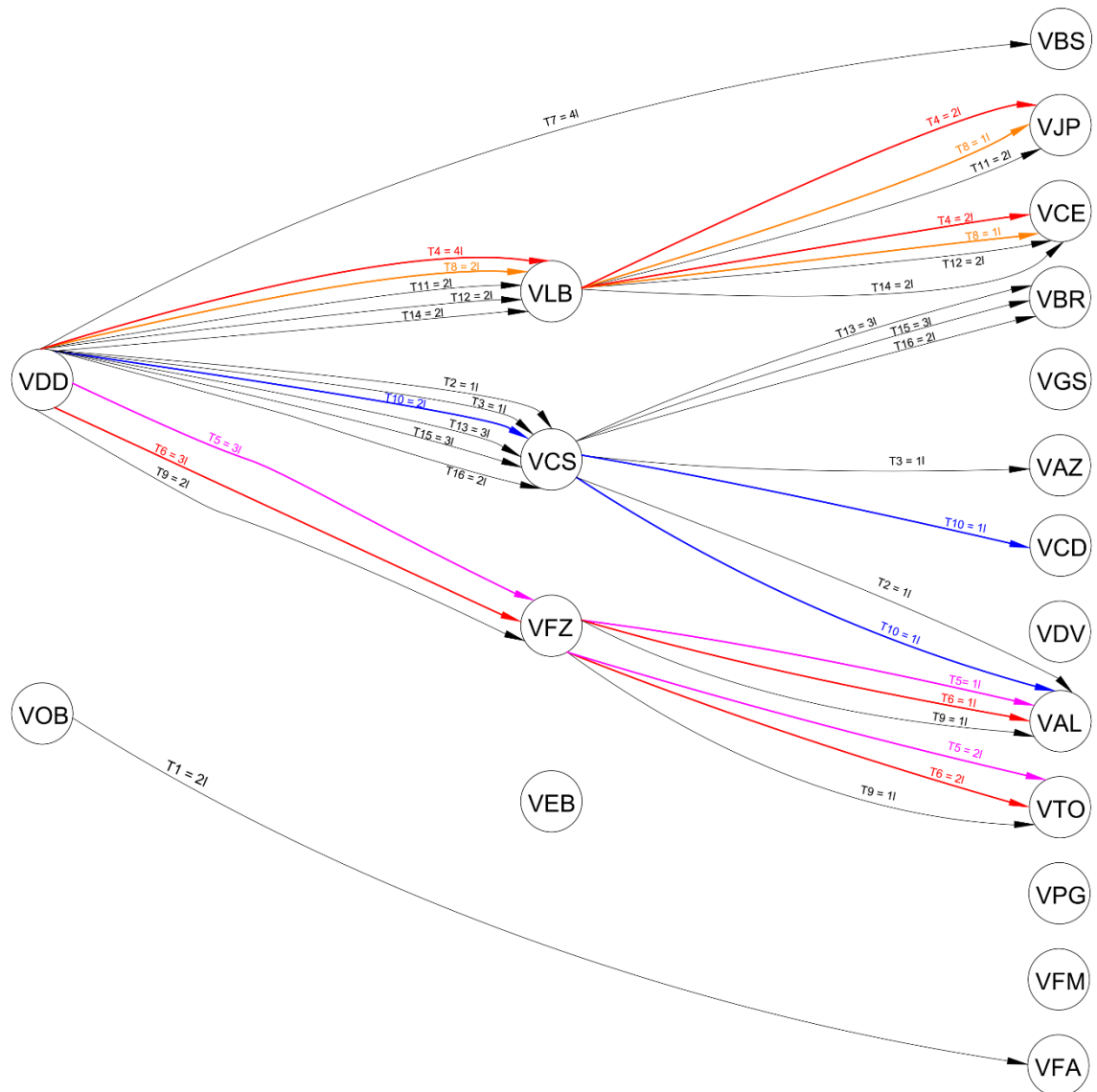
Tabela 17 - Comparativo das distribuições para a Instância 4.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M087	FA	FA			T1	FA	FA		
M145	AZ				T2	AL			
M147	CD				T3	AZ			
M057	AL	AL	TO	AL	T4	JP	JP	CE	CE
M021	CE	JP	CE		T5	AL	TO	-	
M781	TO	TO	AL		T6	AL	TO	TO	
M025	BS	BS	BR	BR	T7	BS	BS	BS	BS
M727	CE	JP			T8	CE	JP		
M061	BR	BR			T9	AL	TO		
M029	CE	CE			T10	CD	AL		
M831	BR	BR			T11	JP	JP		
M075	TO	AL			T12	CE	CE		
M051	JP	CE	JP		T13	BR	BR	BR	
M001	BS	BS			T14	CE	CE		
M003	BR	BR	TO		T15	BR	BR	BR	
M071	JP	CE			T16	BR	BR		

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 4, Figura 14, apresentou um total de 6 desmembramentos. Os trens t_4 e t_8 desmembraram no pátio de Laboriau, sendo que o trem t_4 , com 4 lotes, distribuiu 2 lotes para a mina de João Paulo e 2 lotes para a mina de Conceição. O trem t_8 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. O trem t_{10} , com 2 lotes, desmembrado em Costa Lacerda, distribuiu 1 lote para a mina de Capitão Eduardo e 1 lote para a mina de Alegria. No pátio de Fazendão houve o desmembramento dos trens t_5 , com 2 lotes, e o t_6 , com 3 lotes. O trem t_5 distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Timbopeba. O trem t_6 distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. Os trens t_7 , com 4 lotes e o t_1 , com 2 lotes, foram diretamente às minas de Bicas e Fábrica, respectivamente. Os trens t_1 , t_7 e t_8 realizaram a mesma distribuição que os trens M087, M025 e M727 da EFVM, respectivamente.

Figura 14 - Distribuição da Instância 4 pelo solver CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 18, Instância 5, apresenta um comparativo entre as distribuições para 16 trens com oferta igual a demanda de 39 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 7 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 11 desmembramentos.

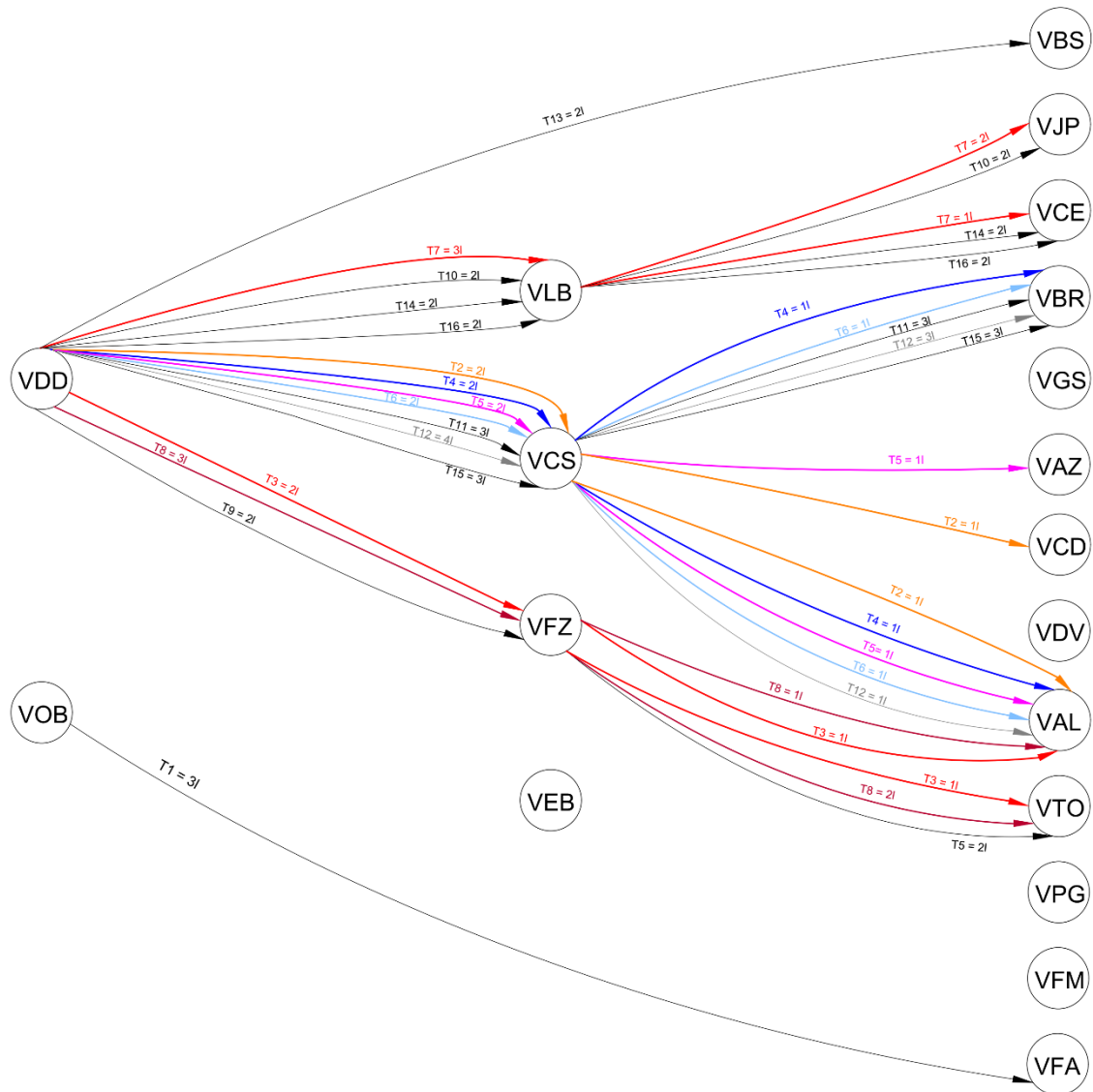
Tabela 18 - Comparativo das distribuições para a Instância 5.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M009	FA	FA	FA		T1	FA	FA	FA	
M783	AZ	CD			T2	AL	CD		
M057	AL	AL			T3	TO	AL		
M021	BR	BR			T4	BR	AL		
M023	TO	AL			T5	AZ	AL	-	
M781	BS	BS			T6	AL	BR		
M025	CE	JP	JP		T7	CE	JP	JP	
M059	BR	BR	TO		T8	AL	TO	TO	
M027	AL	AL			T9	TO	TO		
M729	BR	BR			T10	JP	JP		
M033	BR	BR	AL		T11	BR	BR	BR	
M061	CE	CE	TO	TO	T12	BR	BR	BR	AL
M035	AL	TO			T13	BS	BS		
M001	BR	BR			T14	CE	CE		
M003	BR	CE	JP		T15	BR	BR	BR	
M005	JP	CE			T16	CE	CE		

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 5, Figura 15, apresentou um total de 7 desmembramentos. O trem t_7 , com 3 lotes, desmembrou no pátio de Laboriau distribuindo 2 lotes para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. Os trens t_2 , t_4 , t_6 e t_{12} efetuaram desmembramento no pátio de Costa Lacerda. O trem t_2 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Capitão Eduardo e 1 lote para a mina de Alegria. O trem t_4 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Brucutu e 1 lote para a mina de Alegria. O trem t_6 , com 2 lotes, distribuiu efetuou a mesma distribuição do t_4 . O trem t_{12} , com 4 lotes, distribuiu 3 lotes para Brucutu e 1 para Alegria, respectivamente. Os trens t_3 e t_8 desmembraram no pátio de Fazendão. O trem t_3 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para Alegria e 1 lote para Timbopeba. O trem t_8 , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_1 , com 3 lotes, foi diretamente da origem Ouro Branco à mina de Fábrica. Os trens t_1 e t_7 apresentaram as mesmas distribuições que os trens M087, M025 e M727 da EFVM, respectivamente.

Figura 15 - Distribuição da Instância 5 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 19, Instância 6, apresenta um comparativo entre as distribuições para 19 trens com oferta igual a demanda de 44 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 7 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 12 desmembramentos.

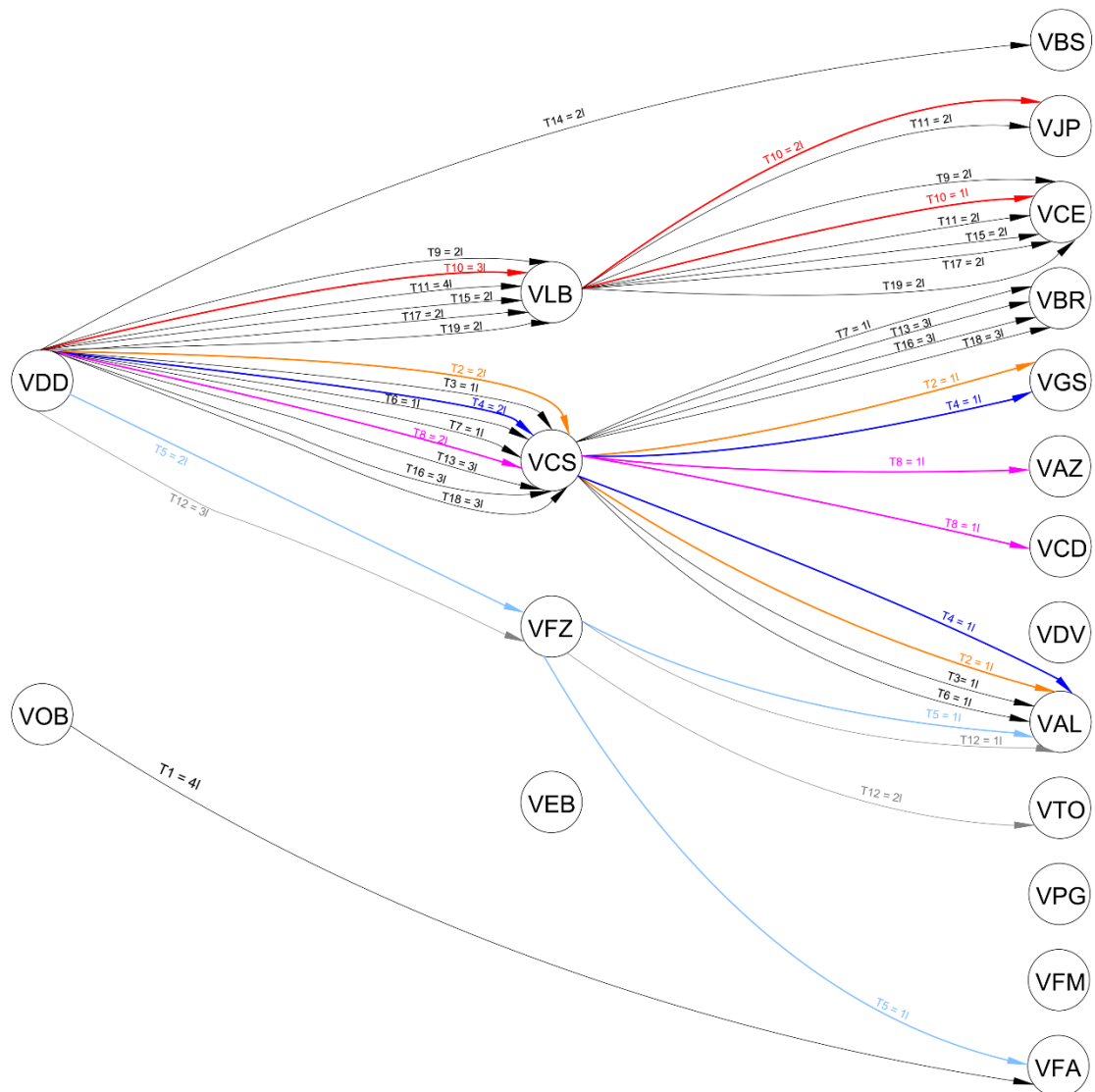
Tabela 19 - Comparativo das distribuições para a Instância 6.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M005	FA	FA	FA		T1	FA	FA	FA	FA
M731	CE	CE			T2	GS	AL		
M555/FZ	TO				T3	AL			
M007	AL	AL			T4	AL	GS		
M783	AZ	CD			T5	AL	FA	-	
M011	AL				T6	AL			
M013	CE				T7	BR			
M715	CE	JP			T8	AZ	CD		
M017	GS	GS			T9	CE	CE		
M019	FA	AL	TO		T10	CE	JP	JP	
M021	BS	BS	CE		T11	JP	JP	CE	CE
M059	BR	BR	BR		T12	AL	TO	TO	
M029	BR	BR	BR		T13	BR	BR	BR	
M725	CE	JP			T14	BS	BS		
M061	AL	AL			T15	CE	CE		
M035	CE	JP	CE		T16	BR	BR	BR	
M851	BR	BR	-		T17	CE	CE		
M003	CE	CE	JP		T18	BR	BR	BR	
M015	BR	BR	CE		T19	CE	CE		

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 6, Figura 16, apresentou um total de 7 desmembramentos. Os trens t_{10} e t_{11} efetuaram desmembramento no pátio de Laboriau. O trem t_{10} , com 3 lotes, distribuiu 2 lotes para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. O trem t_{11} , com 4 lotes, distribuiu 2 lotes para a mina de João Paulo e 2 lotes para a mina de Conceição. Os trens t_2 , t_4 e t_8 desmembraram no pátio de Costa Lacerda. O trem t_2 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Gongo Soco e 1 lote para a mina de Alegria. O trem t_4 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Gongo Soco e 1 lote para a mina de Alegria. O trem t_8 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para cada mina, respectivamente Azurita e capitão Eduardo. Os trens t_5 e t_{12} desmembraram no pátio de Fazendão. O trem t_5 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica. O trem t_{12} , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para mina de Timbopeba. Os trens t_1 , com 4 lotes, e o t_{14} , com 2 lotes, foram diretamente da origem às minas de Fábrica e Bicas, respectivamente. O trem t_{13} apresentou a mesma distribuição que o trem M029.

Figura 16 - Distribuição da Instância 6 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 20, Instância 7, apresenta um comparativo entre as distribuições para 26 trens com oferta igual a 55 lotes e demanda de 48 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 8 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 10 desmembramentos.

Tabela 20 - Comparativo das distribuições para a Instância 7.

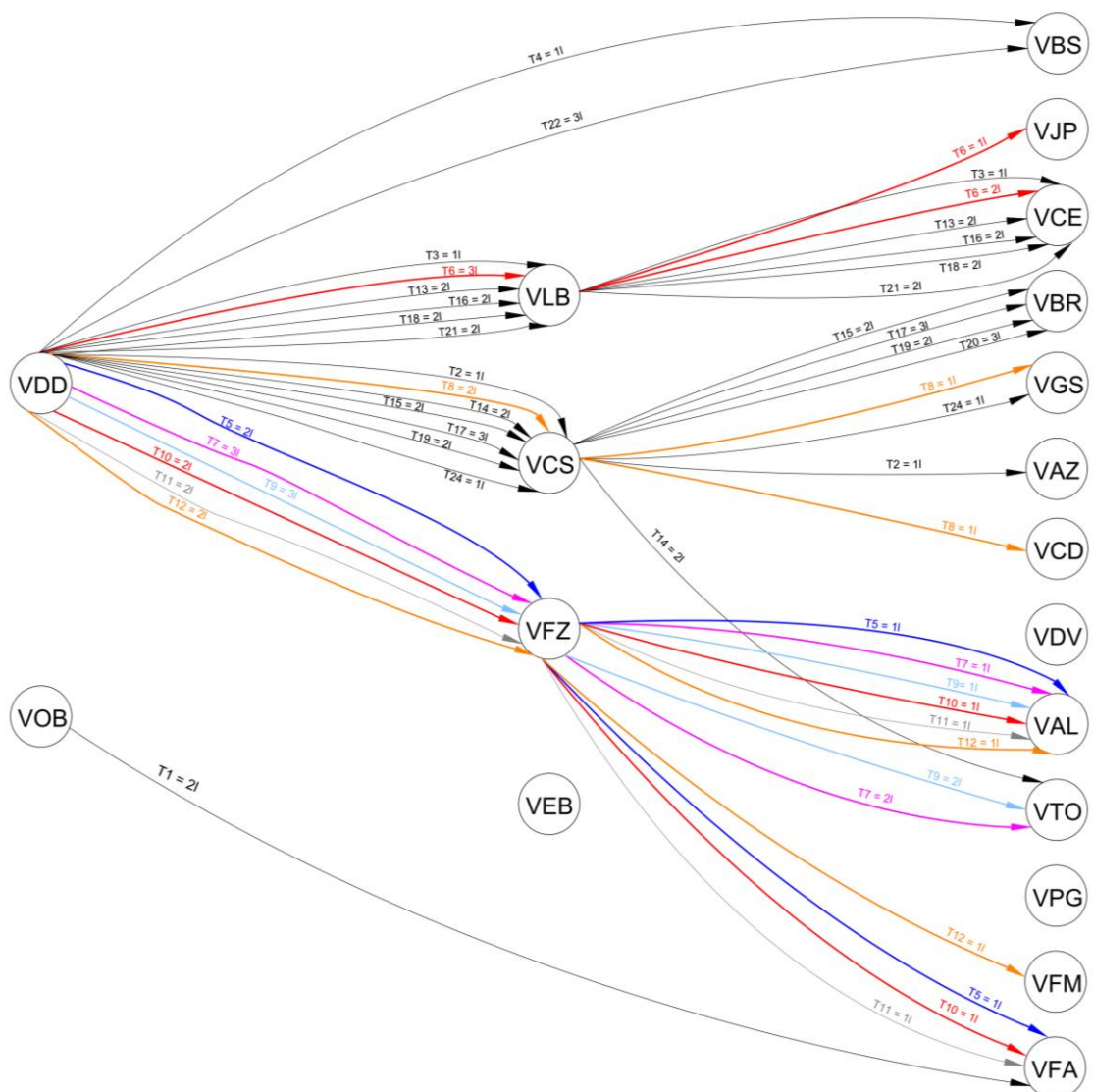
EFVM				CPLEX			
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote
M783	FA	FM		T1	FA	FA	
M011	CD			T2	AZ		
M675	FA			T3	CE		
M619	FA			T4	BS		
M901	AZ	CD		T5	AL	FA	-
M007	AL	AL	TO	T6	JP	CE	CE
M997	BR	BR	BR	T7	AL	TO	TO
M715	CE	CE		T8	GS	CD	
M017	CE	CE	CE	T9	AL	TO	TO
M057	TO	TO		T10	AL	FA	
M021	AL	AL		T11	AL	FA	
M023	GS	GS		T12	AL	FM	
M059	FA	FA		T13	CE	CE	
M027	BS	BS		T14	TO	TO	
M781	TO	TO		T15	BR	BR	
M029	CE	CE		T16	CE	CE	
M061	BR	BR	BR	T17	BR	BR	BR
M031	CE	CE		T18	CE	CE	
M033	BS	BS		T19	BR	BR	
M035	AL	AL	TO	T20	BR	BR	BR
M991	BR	BR		T21	CE	CE	
M003	BR	BR	AZ	T22	BS	BS	BS
M007	CE	CE	JP	T23	PARADO NA ORIGEM		
M011	TO			T24	GS		
M995	BR	BR	BR	T25	PARADO NA ORIGEM		
M013	CE			T26	PARADO NA ORIGEM		

Fonte: O autor, 2019.

A instância 7, Figura 18, apresentou um total de 8 desmembramentos. Os trens t_1 , com 4 lotes, o t_4 , com 1 lote e o t_{22} com 3 lotes foram diretamente da origem às minas de Fábrica e Bicas, respectivamente. O trem t_6 , com 3 lotes, desmembrado no pátio de Laboriau, distribuiu 1 lote para a mina de João Paulo e 2 lotes para a mina de Conceição. O trem t_8 , com 2 lotes, desmembrado no pátio de Costa Lacerda, distribuiu 1 lote para a mina de Gongo Soco e 1 lote para a mina de Capitão Eduardo. Os trens t_5 , t_7 , t_9 , t_{10} , t_{11} e t_{12} efetuaram desmembramentos no pátio de Fazendão. O trem t_5 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica.

O trem t_7 , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_9 , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_{10} , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e um lote para a mina de Fábrica. O trem t_{11} , com 2 lotes, distribuiu efetuou a mesma distribuição do trem t_{10} . E finalmente o trem t_{12} , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica Muro. Por excesso de oferta de lotes (7 lotes), os trens t_{23} , t_{25} e t_{26} não saíram da origem. Os trens t_{16} , t_{17} e t_{18} , realizaram a mesma distribuição que os trens M029, M061 e M031 da EFVM, respectivamente.

Figura 17 - Distribuição da Instância 7 pelo solver CPLEX.



A Tabela 21, Instância 8, apresenta um comparativo entre as distribuições para 18 trens com oferta igual a demanda de 40 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 5 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 9 desmembramentos.

Tabela 21 - Comparativo das distribuições para a Instância 8.

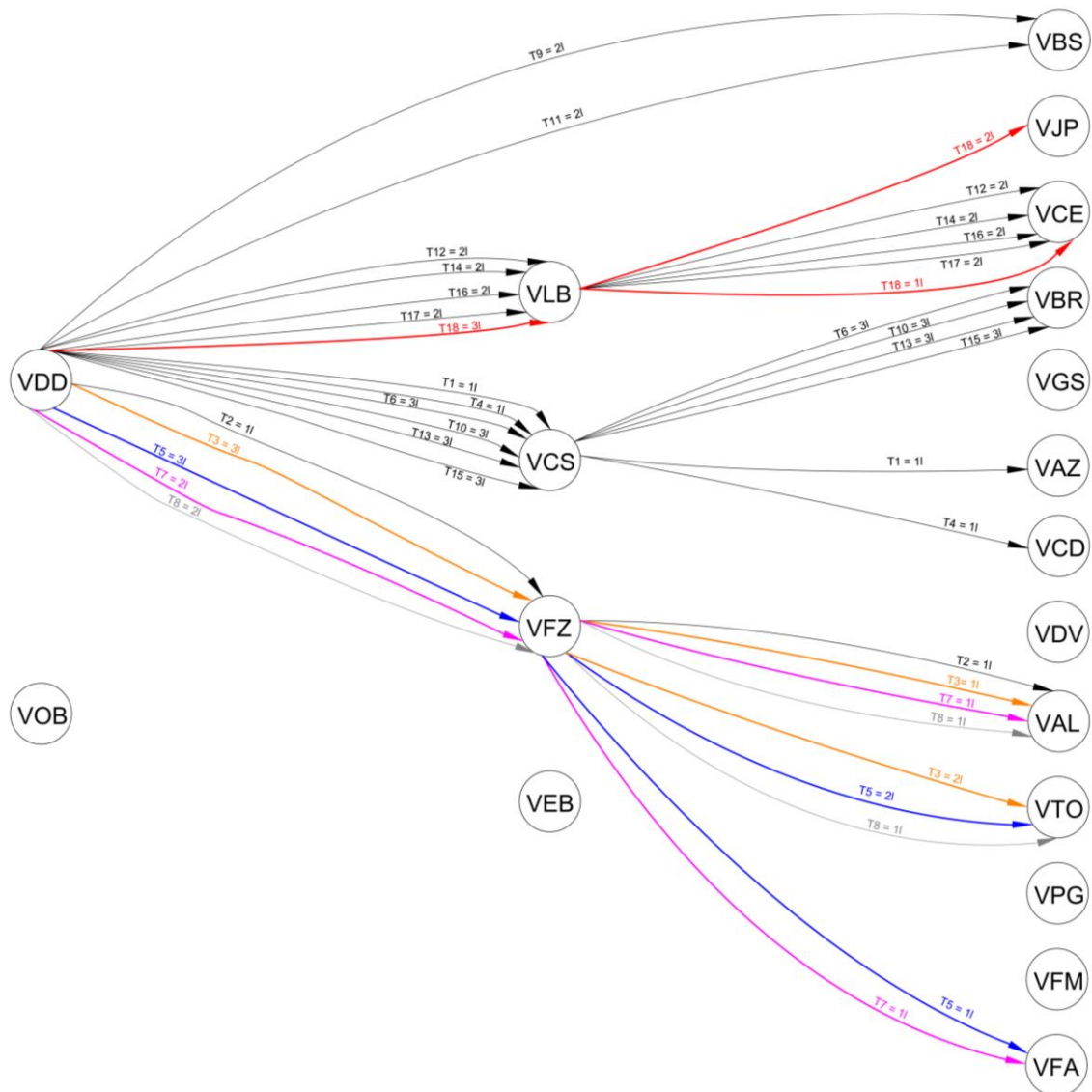
EFVM				CPLEX			
Trem	1º Lote	BR.	3º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote
M547	CD			T1	AZ		
M545	AZ			T2	AL		
M995	BR	BR	BR	T3	AL	TO	
M015	CE			T4	CD		
M057	BR	BR	BR	T5	TO	TO	FA
M023	FA	FA	TO	T6	BR	BR	BR
M025	BS	BS		T7	AL	FA	
M027	CE	CE		T8	AL	TO	
M029	CE	JP		T9	BS	BS	
M061	BR	BR	BR	T10	BR	BR	BR
M031	AL	AL		T11	BS	BS	
M781	TO	AL		T12	CE	CE	
M033	BR	BR	BR	T13	BR	BR	BR
M035	TO	TO		T14	CE	CE	
M051	CE	CE	CE	T15	BR	BR	BR
M001	BS	BS		T16	CE	CE	
M003	TO	AL		T17	CE	CE	
M997	CE	JP	CE	T18	CE	JP	JP

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 8, Figura 18, apresentou um total de 5 desmembramentos. O trem t_{18} , com 3 lotes, desmembrou no pátio de Laboriau, onde 2 lotes foram para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. Os trens t_3 , t_5 , t_7 e t_8 desmembraram no pátio de Fazendão. O trem t_3 , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_5 , com 3 lotes, distribuiu 2 lotes para a mina de Timbopeba e 1 lote para a mina de Fábrica. O trem t_7 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica. O trem t_8 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Timbopeba. Os trens t_9 , com 2 lotes, e t_{11} , com 2 lotes, foram diretamente da origem à mina de Bicas. Os

trens t_{10} e t_{13} efetuaram a mesma distribuição que os tens M061 e M033 da EFVM, respectivamente.

Figura 18 - Distribuição da Instância 8 pelo *solver* CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 22, Instância 9, apresenta um comparativo entre as distribuições para 18 trens com oferta igual a demanda de 35 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 3 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 11 desmembramentos.

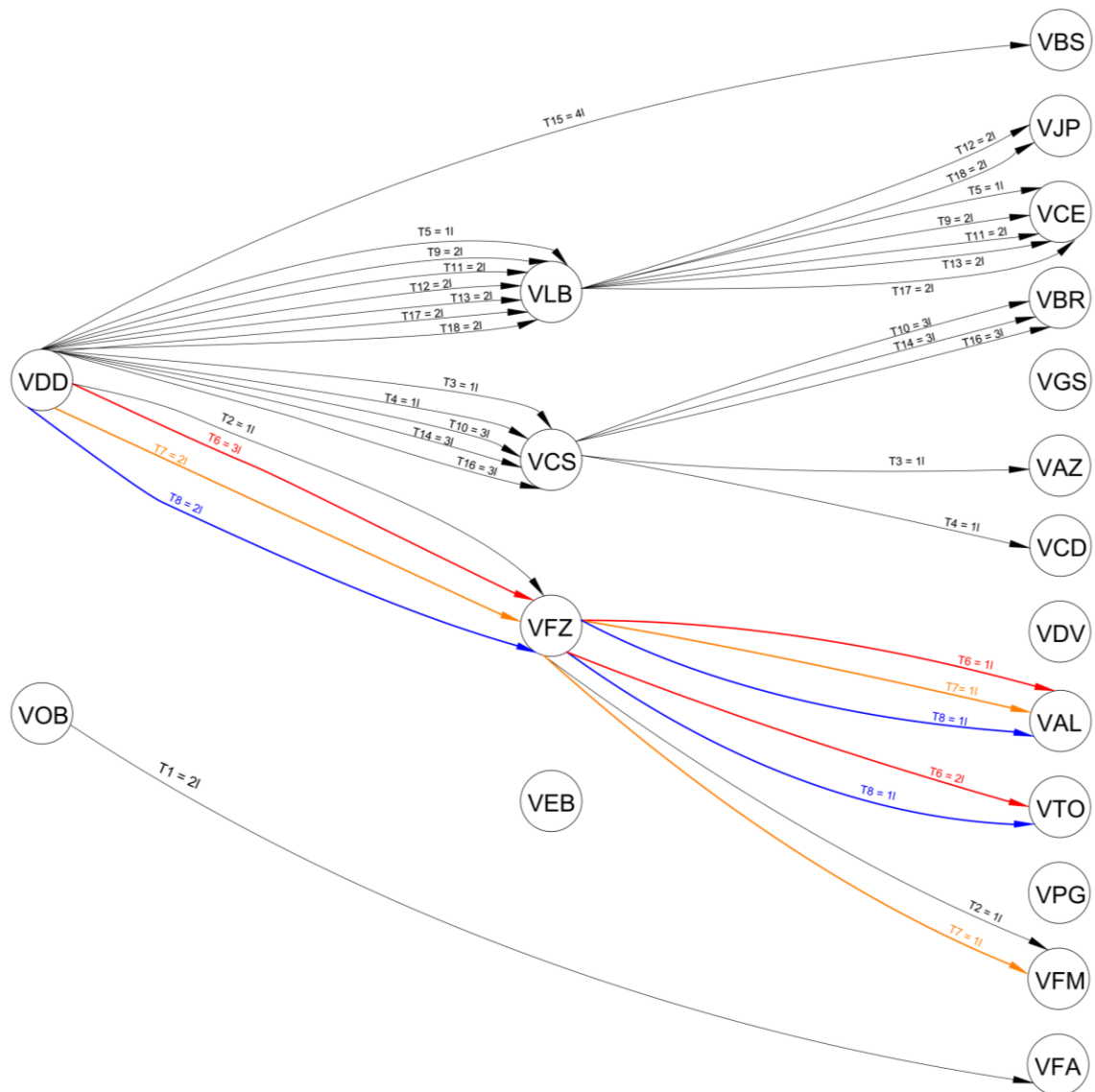
Tabela 22 - Comparativo das distribuições para a Instância 9.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M733	FM	FM			T1	FA	FA		
M345	AZ				T2	FM			
M347	CD				T3	AZ			
M585	TO				T4	CD			
M657	FA				T5	CE		-	
M999	BR	BR	BR		T6	AL	TO	TO	
M021	BR	BR			T7	AL	FM		
M023	AL	AL			T8	AL	TO		
M025	TO	FA			T9	CE	CE		
M027	CE	JP	CE		T10	BR	BR	BR	
M029	CE	CE			T11	CE	CE		
M781	BS	BS			T12	JP	JP		
M061	BR	BR			T13	CE	CE		
M033	CE	JP	CE		T14	BR	BR	BR	
M035	BS	BS	AL	TO	T15	BS	BS	BS	BS
M051	CE	JP	CE		T16	BR	BR	BR	
M993	BR	BR			T17	CE	CE		
M053	CE	JP			T18	JP	JP		

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 9, Figura 19, apresentou um total de 3 desmembramentos. Os trens t_1 , com 2 lotes, e t_{15} , com 4 lotes, foram diretamente da origem às minas de Fábrica e Bicas, respectivamente. Os trens t_6 , t_7 e t_8 desmembraram no pátio de Fazendão. O trem t_6 , com 3 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_7 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Fábrica Muro. O trem t_8 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para Alegria e 1 lote para a mina de Timbopeba.

Figura 19 - Distribuição da Instância 9 pelo solver CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

A Tabela 23, Instância 10, apresenta um comparativo entre as distribuições para 11 trens com oferta igual a demanda de 29 lotes. A distribuição do CPLEX apresentou 6 desmembramentos enquanto a distribuição da equipe da EFVM apresentou 8 desmembramentos.

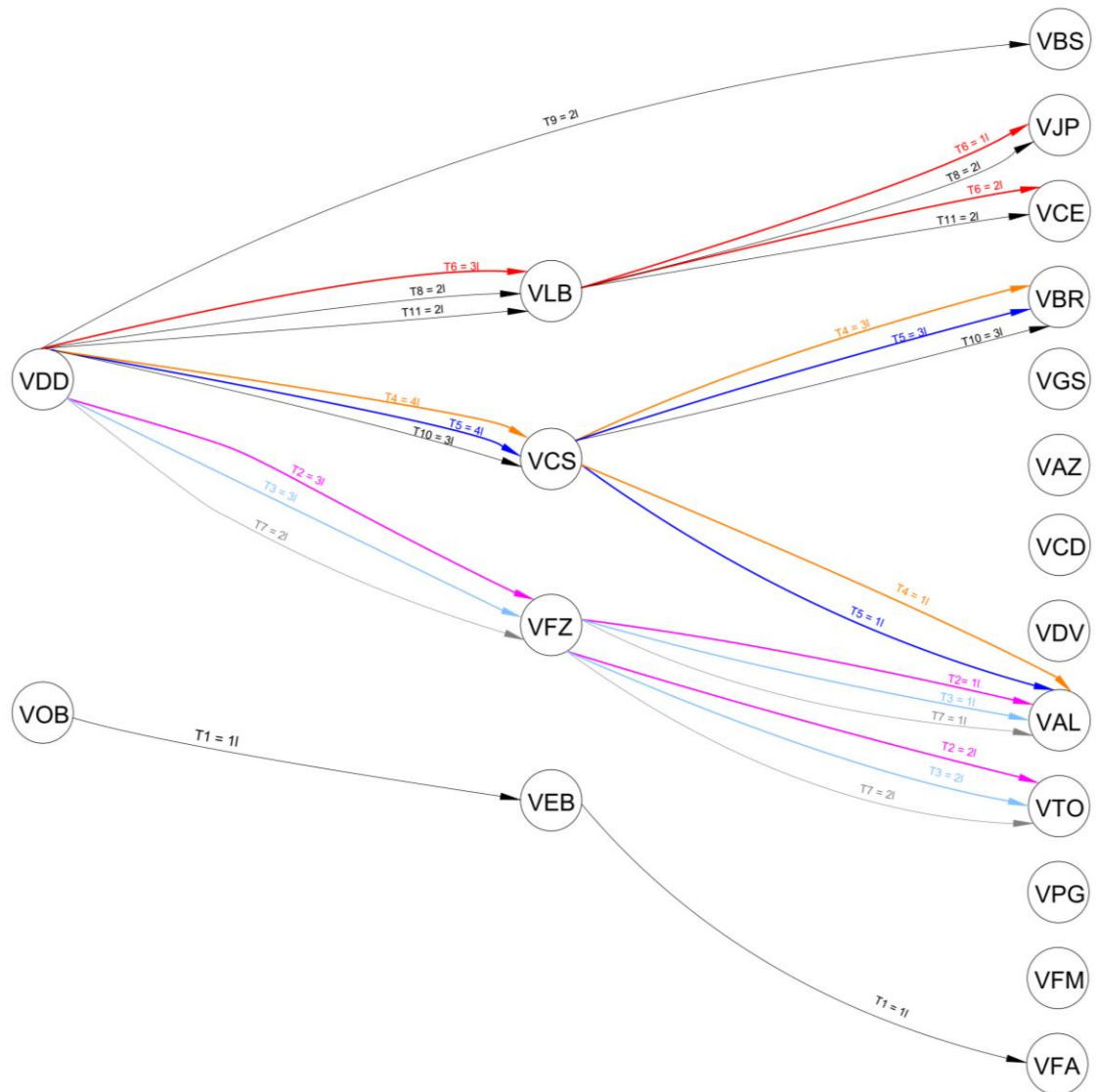
Tabela 23 - Comparativo das distribuições para a Instância 10.

EFVM					CPLEX				
Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote	Trem	1º Lote	2º Lote	3º Lote	4º Lote
M055	FA				T1	FA			
M019	TO	AL	TO		T2	AL	TO	TO	
M021	BR	BR	BR		T3	AL	TO	TO	
M025	AL	AL	TO	TO	T4	AL	BR	BR	BR
M059	BS	BS	JP	JP	T5	AL	BR	BR	BR
M227	BR	BR	BR		T6	CE	CE	JP	
M781	TO	AL			T7	TO	AL		
M029	CE	JP			T8	JP	JP		
M061	CS	CS			T9	BS	BS		
M033	BR	BR	BR		T10	BR	BR	BR	
M035	CE	JP			T11	CE	CE		

Fonte: O autor, 2019.

A Instância 10, Figura 20, apresentou um total de 6 desmembramentos. Os trens t_1 , com 1 lote, e t_9 , com 2 lotes, foram diretamente da origem às minas de Fábrica e Bicas, respectivamente. O trem t_6 , com 3 lotes, desmembrou no pátio de Laboriau de onde distribuiu 2 lotes para a mina de João Paulo e 1 lote para a mina de Conceição. Os trens t_4 e t_5 , ambos com 4 lotes, desmembraram no pátio de Costa Lacerda de onde distribuíram 1 lote para a mina de Alegria e 3 lotes para a mina de Brucutu. Os trens t_2 , t_3 e t_7 desmembraram no pátio de Fazendão. Os trens t_2 e t_3 , ambos com 3 lotes, distribuíram 1 lote para a mina de Alegria e 2 lotes para a mina de Timbopeba. O trem t_7 , com 2 lotes, distribuiu 1 lote para a mina de Alegria e 1 lote para a mina de Timbopeba. Os trens t_7 e t_{10} realizaram a mesma distribuição que os trens M781 e M033 da EFVM, respectivamente.

Figura 20 - Distribuição da Instância 10 pelo solver CPLEX.



Fonte: O autor, 2019.

Assim, após todos testes realizados e com os comparativos entre as distribuições do CPLEX e da equipe do Centro de Controle Operacional (CCO) da EFVM, foi possível verificar que o modelo atendeu satisfatoriamente as demandas nas minas, dentro do horizonte de trabalho e com um tempo de execução bastante baixos, proporcionando assim uma melhoria na distribuição e evitando oscilações no planejamento. Para todas instâncias houve tempo de execução menor que 60 segundos, inclusive para a maior instância testada, Instância 7, com 26 trens, a qual apresentou tempo de execução e 47,61 segundos. Dessa forma, foi possível constatar que o modelo se mostrou uma ferramenta viável para o planejamento e replanejamento, caso necessário, da distribuição podendo trazer significativos resultados para a VALE S/A.

6 CONCLUSÃO

Foi proposto nessa dissertação, um modelo matemático que tem por objetivo minimizar os desmembramentos de lotes de vagões vazios e o tempo de percurso de todos os trens ao longo da malha da EFVM para atender as minas de Minério de Ferro.

Em relação aos modelos existentes na literatura, essa pesquisa se destaca por construir um modelo matemático que visa minimizar o desmembramento de lotes, ao contrário dos artigos existentes os quais tratam a distribuição de vagões vazios e não dos lotes como uma unidade, permitindo assim um ganho de tempo no ciclo de vagões de minério de ferro.

Para avaliar o modelo proposto e os impactos na distribuição dos lotes de vagões vazios, foram conduzidos testes com o modelo no *solver* CPLEX considerando-se a variação dos parâmetros: demanda de lotes de vagões vazios nas minas de carregamento, oferta de lotes de vagões vazios nas duas origens que a EFVM possui, o número máximo de lotes por trem, a capacidade das minas, os tempos de percurso entre cada ponto da malha ferroviária, os tempos de manobra em cada pátio, mina e origem. Também são considerados os parâmetros de horário de manutenção em cada mina, quando existir. Além disso, o modelo foi testado com dados reais da Estrada de Ferro Vitória à Minas (EFVM) que pertence à empresa Vale S/A, uma das mais importantes ferrovias no que se refere à volume de transporte de carga no Brasil.

Para realização dos testes, foi utilizado o *solver* CPLEX, o qual conseguiu resolver otimamente todas as instâncias com tempos de execução extremamente favoráveis quando se trata do planejamento da distribuição de lotes para o carregamento de minério nas minas. Por apresentar tempos de execução bastante baixos, o planejamento com o *solver* torna-se uma importante ferramenta para planejar e replanejar, caso seja necessário, a distribuição dos lotes de vagões vazios.

Os testes realizados mostraram que o *solver* CPLEX conseguiu reduzir 38 desmembramentos comparado a distribuição manual, isso implica em 40,42% de redução de desmembramentos. Considerando que cada desmembramento leva em torno de 4 horas, esta redução implica em um ganho de aproximadamente 152 horas de operação de manobra, além de acarretar economia com funcionários para manobra, locomotivas, maquinistas dentre outros.

Desta forma, os testes realizados para a validação do modelo mostram que a estratégia de planejamento da distribuição proposta também pode ser adotada pelos planejadores de ferrovias para analisar a distribuição para um período maior que o planejamento diário, dentro de um espaço de tempo planejado. A ferramenta também poderia ser utilizada para avaliar antecipadamente o impacto que seria causado, por exemplo, caso a oferta diária não atenda a demanda e seja necessário replanejar a distribuição.

Tendo analisado as instâncias baseadas em dados reais da EFVM, conclui-se que o modelo matemático proposto pode trazer benefícios para o planejamento operacional, auxiliando nas tomadas de decisão do planejamento da distribuição de lotes de vagões vazios com intuito de equilibrar a oferta disponível e a demanda necessária para atender todo carregamento de minério de ferro nas minas da EFVM.

Pelas exemplificações apresentadas anteriormente, associadas aos testes realizados, conclui-se que modelo proposto poderá subsidiar os planejadores de ferrovias quanto às tomadas de decisões.

Conclui-se, portanto, que o modelo matemático proposto pode ser aplicado como ferramenta de planejamento da distribuição de lotes vagões em pátios ferroviários para atendimento à demanda de carregamento de minério de ferro em qualquer ferrovia com pontos de carregamento dispersos geograficamente, tanto no Brasil, quanto no mundo.

6.1 Trabalhos Futuros

A solução apresentada pelo modelo proposto nesta dissertação resulta na distribuição de lotes de vagões vazios para carregamento de minério de ferro nas minas da EFVM. Sugere-se como trabalho futuro o desenvolvimento de um procedimento para planejar o número de trens a serem formados com estes lotes de vazios a partir dos pátios de triagens integrado a um planejamento da circulação desses trens.

REFERÊNCIAS

- ANTT - **Agência Nacional de Transportes Terrestres** (2019). Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/>> Acessado em: 28 de janeiro de 2019.
- ASSAD, A. (1980) **Models for rail transportation**. *Transportation Research – A*, s.l.: v. 14A, p.205-220.
- BANDEIRA, D. L. (2005). **Alocação e movimentação de contêineres vazios e cheios – um modelo integrado e sua aplicação**. Tese do Programa de Pós-Graduação em Administração. UFRGS, Porto Alegre – RS.
- BARROS, A. L. M. (2008). **Distribuição horária de lotes de vagões GDE para carregamento de minério na EFVM**. Dissertação de Especialização em Ciências e Transporte. IME, Rio de Janeiro – RJ.
- BARROS, A. L. M. (2010). **Modelo de Otimização para distribuição horária de lotes de vagões ferroviários GDE para carregamento de minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. UFES, Vitória – ES.
- BEKTAS, T.; CRAINIC, T.G.; MORENCY, V. (2007). **Improving performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars**. *Journées de l'Optimisation*. HEC Montréal.
- CALDARA, A. (1996). **Um sistema de Otimização para Alocação de Vagões Vazios em Ferrovias**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. UFES, Vitória - ES
- CNT. **Confederação Nacional Do Transporte**. Pesquisa CNT de Ferrovias. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/>> Acessado em: 24 de janeiro de 2019.
- CORDEAU, J-F.; Toth, P.; VIGO, D. (1998) **A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling**. *Transportation Science*, v. 32, n. 4, p. 380-404.
- COSTA, J. C. (2010) **Algoritmo de Distribuição e Alocação Vagões em Tempo Real**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP.
- CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. (1997) **Planning Models for Freight Transportation**. *European Journal of Operational Research*, v. 97, p. 409-438.
- CRAINIC, T. G. (2002). **A survey of optimization models for long-haul freight transportation**. *Handbook of Transportation Science* R.W. Hall, 2ª Edição, Kluwer.
- DEJAX, P. J.; CRAINIC, T. G. (1987) **A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation**. *Transportation Science*, v. 21, n. 4, p. 227-248.
- GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.L. (2015). **Programação Linear e fluxo em redes**. 1ª edição, Rio de Janeiro: Ed. Elsevier.
- GRAIN, M. T. F. (1985) **Otimização da Distribuição de Vagões**. Dissertação de Mestrado em Ciências e Transporte. IME, Rio de Janeiro – RJ.

FOLETTTO M. B.; ROSA, R. A.; LOUZADA, P. C.; PIMENTA, L. B. (2016). **Modelo matemático para uma nova estratégia de planejamento da distribuição de vagões vazios**. XLVIII SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.

FORD, L. R. E FULKERSON, D. R. (1962). **Flows in Networks**. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.

FRANK, M.; WOLFE, P. (1956). **An algorithm for quadratic programming**. Naval Res. Logis. Quart., 3:95–110.

FUKASAWA, R. (2002). **Resolução de problemas de logística ferroviária utilizando programação inteira**. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ.

HAGHANI, A. E. (1987). **Rail Freight Transportation: A Review of Recent Optimization Models for Train Routing and Empty Car Distribution**. Journal of Advanced Transportations, 21:2.

HAGHANI, A. E. (1989) **Formulation and Solution of a Combined Train Routing and Makeup, and Empty Car Distribution Model**. Transportation Research B, v. 23B, n. 6, p. 433-452.

HAMACHER, F. C. (2005). **Logística Ferroviária: Resolução do Problema de Alocação Ótima de Vagões e Locomotivas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. PUCRJ, Rio de Janeiro – RJ.

HEYDARI, R.; MELACHRINOUDIS, E. (2017). **A path-based capacitated network flow model for empty railcar distribution**. Annals of Operations Research, v. 253, n. 2, p. 773-798.

HOLMBERG, K.; JOBORN, M.; LUNDGREN, J. T. (1998). **Improved Empty Freight Car Distribution**. Transportation Science, Vol. 32, Nº 2, p. 163-173.

JOBORN, M.; CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; HOLMBERG, K.; LUNDGREN, J. T. (2004) **Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways**. Transportation Science, v. 38, n. 2, p. 121-134.

JORDAN, W. C.; TURNQUIST, M. A. (1983). **A Stochastic Dynamic Network Model for Railroad Car Distribution**. Transportation Science, 17:123-145.

MELO, M. C. V.; BARROS NETO, J. F. ; NOBRE Jr, E.F. (2008). **Problema de Planejamento da Alocação de Vagões de Carga: uma Abordagem via Modelagem Matemática**. CNT - Confederação Nacional dos Transporte e ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes. (Org.). Transporte em Transformação XIII.

MENDIRATTA, V., TURNQUIST, M. (1982). **A model for the management of empty freight cars**. Transportation Research Record, v. 838, p. 50-55.

MISRA, S. (1972). **Linear programming of empty wagon disposition**. Rail International 3.

MURGEL, Liége MS Firmino; GUALDA, Nicolau D. Fares (1999). **Modelo para formação de composições ferroviárias**. TRANSPORTES, v. 7, n. 1.

PHILIP, C.E. (1978) **Freight car utilization and railroad reliability: the application of an inventory model to the railroad empty car distribution process**. Technical Report MIT MIT-CTS-78-2, Center for Transportation Studies, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA.

POWELL, W.B., CARVALHO, T.A. (1998). **Real-time optimization of containers and flatcars for intermodal operations**. Transportation Science 32 (2).

POWELL, W.B., TOPALOGLU, H. (2005). Fleet management. In: Wallace, S., Ziemba, W. (Eds.), **Applications of Stochastic Programming Math Programming Society-Series on Optimization**. SIAM, Philadelphia.

POWELL, W.B., BOUZAÏENE-AYARI, B., SIMAO, H.P. (2007). **Dynamic models for freight transportation**. Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science, Vol. 14. North-Holland, Amsterdam.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. (2005). **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**, 4. ed. Florianópolis: UFSC.

SHERALI, H.D., SUHARKO, A.B. (1998). **A tactical decision support system for empty railcar management**. Transportation Science 32 (4).

SPIECKERMANN, S.; VOß, S. (1995). **A case study in empty railcar distribution**. European Journal of Operational Research, v. 87, p. 586-598.

VALE. **Nossos Negócios/ Logística/ Histórico de Ferrovias**. Disponível em: <<http://www.vale.com>>. Acesso em: 27 de janeiro de 2019.

WHITE, W.W, BOMBERAULT, A.M. (1969) **A network algorithm for empty freight car allocation**. IBM System Journal 8, 147-169.

WHITE, W.W. (1972). **Dynamic transshipment networks: an algorithm and its application to the distribution of empty containers**. Networks, v. 2, p. 211-236.

ZHANG, X.; FENG, M.; ZHANG, Z. (2003). **Study on an optimized model and algorithm of railway empty wagon distribution in China**. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Beijing, v. 5, p.277-291.