

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

PATRICIA COSTA LOUZADA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
DISTRIBUIÇÃO INTEGRADA DE VAGÕES E LOCOMOTIVAS
PARA FORMAÇÃO DE TRENS**

VITÓRIA
2017

PATRICIA COSTA LOUZADA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA
DISTRIBUIÇÃO INTEGRADA DE VAGÕES E LOCOMOTIVAS
PARA FORMAÇÃO DE TRENS**

Dissertação apresentada ao 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
2017

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

L886m Louzada, Patricia Costa, 1987-
Modelo matemático para planejamento da distribuição
integrada de vagões e locomotivas para formação de trens /
Patricia Costa Louzada. – 2017.
98 f. : il.

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

1. Distribuição de vagões e locomotivas. 2. Operação
ferroviária. 3. Transporte ferroviário 4. Programação inteira. I.
Rosa, Rodrigo de Alvarenga. II. Universidade Federal do Espírito
Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

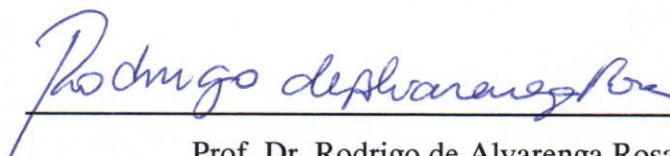
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DA DISTRIBUIÇÃO INTEGRADA DE VAGÕES E LOCOMOTIVAS PARA FORMAÇÃO DE TRENS

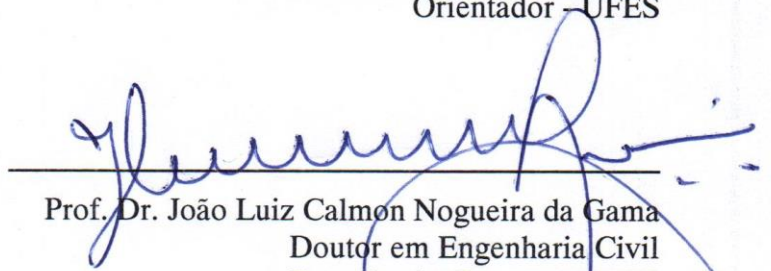
Patricia Costa Louzada

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.

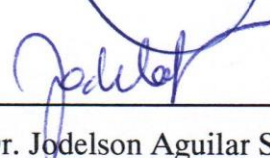
Aprovada no dia **12 de dezembro de 2017** por:



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. Jodelson Aguilar Sabino
Doutor em Engenharia de Produção
Examinador Externo - Vale S/A



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

Dedico este trabalho à minha família, em especial ao meu esposo Thiago pelo apoio incondicional em todos os momentos dessa caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por se fazer presente em todos os momentos da minha vida e por colocar pessoas especiais no meu caminho que contribuíram para a concretização dessa etapa.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, por acreditar em minha capacidade e compartilhar seus conhecimentos acerca de um tema que tanto nos encanta - ferrovia. Minha profunda admiração pelo seu dom de ensinar com paixão, simplicidade e eficiência a todos que te cercam. Obrigada pela oportunidade de realizar este trabalho ao seu lado. Obrigada pela parceria, pela paciência, pela amizade, pela dedicação e doação ao desenvolvimento da pesquisa e pelos ensinamentos que levarei para sempre.

Ao meu esposo e incondicional companheiro Thiago, por ser tão importante na minha vida. Obrigada pelo companheirismo, pela força, pela compreensão e principalmente por acreditar em mim nos momentos de fraqueza. Essa vitória é nossa!

Aos meus pais Suely e Tony e meus irmãos Antônio e Lucas que sempre me incentivaram e torceram por mim. Grata a Deus pela nossa união e pelos sonhos que realizamos juntos. Vocês são minha fortaleza!

Aos meus colegas de trabalho da IM Engenharia, pelo incentivo na busca do conhecimento, em especial aos Diretores Izaias Mai e Genysa Mai pelo apoio e compreensão. Obrigada por confiarem no meu trabalho.

Aos meus sogros Célia e Agatangelo e à minha cunhada Ághata pelo constante apoio e carinho.

Aos colegas Rafael Pedruzzi Fonseca e Gustavo de Luna Pinto por me ajudarem a desenvolver macros em Excel que permitiram agilizar a criação de instâncias.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFES, por partilharem seus conhecimentos.

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

Aos meus amigos e demais familiares pelo apoio fundamental e incentivo constante.

Muito obrigada a todos!

“A vida é o trem, não a estação.”

Paulo Coelho

RESUMO

O atendimento da demanda de transporte ferroviário de carga está relacionado ao processo de distribuição de vagões e locomotivas para formação de trens para transportar as cargas, o qual impacta diretamente nos custos operacionais da ferrovia. O planejamento da distribuição de vagões vazios é importante porque a maioria dos vagões nas ferrovias do Brasil retornam vazios do pátio de descarga para o pátio de carregamento. No caso das locomotivas, eventualmente, estas viajam sozinhas para atendimento a demandas em outros pátios. Ambas as situações elevam os custos operacionais da ferrovia, pois um trem formado somente de vagões vazios, ou uma locomotiva viajando sozinha, acarreta custos com maquinista e combustível, e não gera receita. Assim, esta dissertação propõe um modelo matemático de Programação Inteira para planejamento da distribuição integrada de vagões e locomotivas, onde estes são transportados utilizando a folga na capacidade de tração dos trens carregados que já estão programados para circular na ferrovia para atendimento a demandas de vagões vazios e locomotivas solicitadas nos pátios, tendo como objetivo a minimização dos custos totais de distribuição. O modelo proposto destaca-se pela integração da distribuição de vagões e locomotivas, algo que ainda não foi encontrado na literatura. Para garantir o balanceamento entre oferta e demanda, é proposta a introdução de variáveis de folga para representar as demandas que não tenham sido atendidas pela quantidade real ofertada, ou ainda pela limitação na tração disponível nos trens em circulação. No caso da utilização destas variáveis para obtenção da solução ótima, isso significa que a demanda naquele pátio e tempo não será atendida, indicando assim que uma ação deve ser tomada pelo distribuidor de recursos. Testes em instâncias baseadas em dados reais da Estrada de Ferro Vitória à Minas (EFVM) foram resolvidas de forma ótima utilizando o *solver* CPLEX 12.6 e os resultados se mostraram bastante aderentes com a utilização operacional para apoio à tomada de decisão no que tange ao planejamento e distribuição de vagões e locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens. Nas instâncias do Estudo de Caso da EFVM, o modelo proposto utilizou menos trens exclusivamente de vagões vazios para distribuir vagões e locomotivas do que os efetivamente criados pelo Centro de Controle Operacional da ferrovia no período analisado.

Palavras-chave: Distribuição de Vagões e Locomotivas. Operação Ferroviária. Transporte Ferroviário. Programação Inteira.

ABSTRACT

Meeting demand for rail cargo transport is related to the wagons and locomotives distribution process for making up trains in order to transport cargo, which directly influences railroad's operational costs. Planning the distribution of empty wagons is important because most wagons on Brazilian railroads return empty from the unload rail yard to the cargo rail yard. In case of locomotives they eventually travel alone to meet demands in other rail yards. Both situations increase the railroad operational costs because a train made up only of empty wagons, or a locomotive traveling alone, adds engine driver and diesel costs, and does not bring any revenue for the railroad. Thus, this dissertation proposes an Integer Programming mathematical model for planning the integrated distribution of wagons and locomotives, where they are transported using the slack in the capacity of traction of loaded trains that are already scheduled to circulate in the railroad to meet empty wagons demands and locomotives requests in the yards aiming to minimize the total distribution costs. The proposed model is distinguished by integrating wagons and locomotives distribution, which has not been found in the literature yet. In order to guarantee the balance between offer and demand, it is proposed the introduction of gap variables to represent the demands that have not been met by the actual quantity offered or by the limitation in the traction capacity available in circulating trains. In the case of using these variables to obtain the optimal solution, it means that the demand in that yard and time will not be met, indicating that the resource distributor must take an action. Test instances based on real data from the Vitória a Minas Railroad (EFVM) were solved to optimality using the *solver* CPLEX 12.6 and the results were quite consistent with the operational use to support decision making in planning and distribution of wagons and locomotives over rail yards to meet the demand for making up trains. In EFVM real case instances, the proposed model used fewer trains made up exclusively of empty wagons to distribute wagons and locomotives than those actually created by the Railroad Operational Control Center in the period analyzed.

Keywords: Wagons and Locomotives Distribution Planning. Railroad Operation. Railroad Transport. Integer Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rede Espaço-Tempo	22
Figura 2 - Etapas da metodologia da pesquisa	32
Figura 3 – Mapa da EFVM com indicação dos terminais de carga geral	36
Figura 4 – Tela em Excel para criação das instâncias	38
Figura 5 - Demonstração da circulação de trens de carga geral	43
Figura 6 - Representação da Rede Espaço-Tempo usualmente utilizada na literatura (par ordenado).....	49
Figura 7 - Representação da Rede Espaço-Tempo utilizada no modelo matemático proposto (vetor)	49
Figura 8 – Representação dos arcos que assumem valor zero. a) viagens entre pátios no mesmo período de tempo, b) viagens para períodos de tempo anteriores e c) viagens dentro de um mesmo pátio	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de custos para transporte de vagões vazios entre pátios	40
Tabela 2 - Matriz de custos para transporte de locomotivas entre pátios	40
Tabela 3 - Quantidade de trens criados pelo CCO.....	44
Tabela 4 - Instâncias de teste executadas no modelo	47
Tabela 5 – Resultados alcançados pelo CPLEX (continua)	59
Tabela 6 - Resultados apresentados pelo CPLEX para as instâncias criadas	61
Tabela 7 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo B	62
Tabela 8 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo C	65
Tabela 9 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo D	69
Tabela 10 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo E	72
Tabela 11 - Comparação das instâncias reais para avaliação da estratégia proposta	77

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo B.....	63
Gráfico 2 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo B.....	64
Gráfico 3 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição	
– Grupo B.....	64
Gráfico 4 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo C.....	67
Gráfico 5 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição	
– Grupo C.....	67
Gráfico 6 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo C.....	68
Gráfico 7 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo D.....	70
Gráfico 8 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo D.....	71
Gráfico 9 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição	
– Grupo D.....	71
Gráfico 10 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo E.....	73
Gráfico 11 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição	
– Grupo E.....	73
Gráfico 12 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição	
– Grupo E.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Pátios de carga geral EFVM.....	36
--	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	19
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
2.1	A REDE ESPAÇO-TEMPO	21
2.2	O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS	23
2.2.1	Revisão Bibliográfica do Problema da Distribuição de Vagões Vazios ..	23
2.3	O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS	26
2.3.1	Revisão Bibliográfica do Problema da Distribuição de Locomotivas	27
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	31
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA.....	31
3.2	ETAPAS DA METODOLOGIA DE PESQUISA PROPOSTA	32
3.3	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	34
3.4	ESTUDO DE CASO	34
3.5	LEVANTAMENTO DE DADOS E CRIAÇÃO DAS INSTÂNCIAS	37
3.5.1	Instâncias de Teste	37
3.5.2	Instâncias EFVM – Carga Geral	43
3.5.3	Resumo das Instâncias Criadas	46
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	48
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	59
5.1	ANÁLISES QUANTO À EXTENSÃO DAS LINHAS DE PÁTIO.....	62
5.2	ANÁLISES QUANTO AO LIMITE MÁXIMO DE VAGÕES EM CADA TREM.	65

5.3	ANÁLISES QUANTO AO LIMITE MÁXIMO DE LOCOMOTIVAS EM CADA TREM	68
5.4	ANÁLISES QUANTO À OFERTA DE VAGÕES VAZIOS NOS PÁTIOS.....	72
5.5	ANÁLISES PARA INSTÂNCIAS DE TESTE MAIORES.....	75
5.6	ANÁLISES DO ESTUDO DE CASO EFVM – CARGA GERAL.....	76
6	CONCLUSÕES.....	81
6.1	TRABALHOS FUTUROS	83
	REFERÊNCIAS.....	85
	APÊNDICE A	89

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário de cargas no Brasil cresceu 28,9% entre os anos de 2006 e 2014 medido em tonelada útil por quilômetro (TKU), chegando à marca de 307,5 bilhões de TKU em uma extensão total de 29.291 km (ANTT, 2015; CNT, 2017).

O modo ferroviário pode transportar vários tipos de cargas, tais como: minério de ferro, grãos, produtos siderúrgicos, cimento, cal, adubos e fertilizantes, derivados de petróleo, calcário, carvão mineral, clínquer, contêineres, dentre outros (ANTT, 2015). Esse tipo de transporte pode transportar as cargas por grandes distâncias, carregando em um pátio de origem (mina, armazém agrícola, entre outros) até um pátio de descarga (mais comumente no Brasil, um porto).

A prática do transporte ferroviário no Brasil mostra que a maior parte dos trens retornam vazios do pátio de descarga para o pátio de carregamento. Isso ocorre porque existem poucas cargas de retorno para o transporte ferroviário. Este retorno vazio eleva os custos operacionais da ferrovia, pois um trem exclusivamente formado de vagões vazios acarreta custos com maquinista, combustível, além de não auferir receita para a ferrovia.

No caso das locomotivas, o retorno do pátio de descarga para um pátio de carga é realizado acoplando locomotivas desligadas em um trem que já iria circular na ferrovia ou viajando sozinhas, sendo a primeira mais comumente adotada. Em ambas situações, agregam-se custos à operação da ferrovia, em proporções diferentes, já que na primeira situação o trem já iria circular e se aproveita a folga na capacidade de tração para distribuição, enquanto que na segunda, quando viajando sozinha, gasta-se mais diesel e mais horas de trabalho de maquinista para fazer essa distribuição.

Logo, a proposição de técnicas de otimização para uma melhor distribuição de vagões e locomotivas ao longo dos pátios ferroviários para atender à demanda para formação de trens torna-se um assunto importante no âmbito ferroviário.

Após revisão bibliográfica acerca do tema, foram encontradas publicações que tratam do problema de distribuição de vagões vazios, e outras publicações que tratam do problema de distribuição de locomotivas para formação de trens. No entanto, como a formação de trens é dada pelo agrupamento de vagões, que são responsáveis por

transportar as cargas na ferrovia, e locomotivas, que têm a função de tracionar esses vagões, nota-se a importância em tratar do problema da distribuição de vagões e locomotivas de forma integrada, objetivando uma redução global dos custos operacionais da ferrovia. A distribuição integrada destes recursos visa otimizar a quantidade de trens com folga de tração a serem utilizados para entregar as demandas de clientes nos pátios e, principalmente, minimizar a criação de trens formados de vagões vazios e viagens com locomotivas escoteiras.

Diante da importância do tema e do fato da literatura específica ainda ser limitada, esta dissertação tem por objetivo propor um modelo matemático para planejamento da distribuição integrada de vagões e locomotivas entre pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens com foco na minimização do custo total de distribuição, onde estes são transportados utilizando a folga na capacidade de tração dos trens que já circulam na ferrovia para atendimento a demandas definidas.

Para os casos em que a demanda solicitada não possa ser atendida pela folga na capacidade de tração dos trens em circulação na ferrovia, são utilizadas variáveis de folga que representam o não atendimento à demanda de vagões e locomotivas. Desta forma, cabe ao distribuidor de recursos analisar os resultados e tomar a decisão de 1) ajustar os parâmetros operacionais atribuídos àquela distribuição, 2) introduzir trens de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras, 3) realizar uma solução combinada de ajustes de parâmetros e introdução de trens de vagões vazios e locomotivas, ou ainda 4) negociar com os programadores dos pátios o reagendamento da entrega dos recursos demandados.

Na decisão 1, os parâmetros operacionais considerados no modelo são: extensão de linhas de pátio disponíveis para manter vagões e locomotivas estacionados, limite máximo de vagões e locomotivas permitidos por trem, oferta de vagões e locomotivas nos pátios, demanda de vagões e locomotivas nos pátios, tipo e peso dos vagões e locomotivas, e folga de tração disponível nos trens em circulação. Desta forma, quando o modelo, numa primeira rodada, utiliza as variáveis de folga para atender a demandas específicas nos pátios, é permitido ao operador, numa segunda rodada, ajustar um ou mais dos parâmetros relacionados. Por exemplo, poderá ser disponibilizada maior extensão de linhas de pátio para manter vagões e locomotivas estacionados, ou ainda permitir maior quantidade de vagões e locomotivas na formação de um trem, dentre outras.

Na decisão 2, é permitido ao operador, numa segunda rodada de análise do modelo, que sejam introduzidos trens formados de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras, ou seja, locomotivas viajando sozinhas com custos elevados, de forma a suprir a demanda necessária. Assim sendo, este artifício possibilita o distribuidor de recursos da via programar a quantidade de trens formados somente de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras que serão efetivamente necessários para atender a demanda solicitada caso a folga na capacidade de tração dos trens em circulação na ferrovia não sejam suficientes.

A decisão 3 aplica-se aos casos em que, ao ajustar os parâmetros dentro das condições de operacionalidade da ferrovia ainda não tenha eliminado na totalidade a utilização das variáveis de folga, o operador então, utilizará o artifício de introduzir os trens de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras.

Na decisão 4, a utilização das variáveis de folga representando o não atendimento às demandas permitirá ao distribuidor de recursos informar antecipadamente aos programadores dos pátios sobre a indisponibilidade de entrega de vagões e/ou locomotivas no tempo solicitado, devendo esses negociarem o reagendamento da entrega demandada.

Em todos os casos, objetiva-se atingir a solução ótima não apenas de resolução do modelo, mas aquela que permite o real atendimento às demandas por vagões vazios e locomotivas nos pátios realizando o planejamento da distribuição de vagões e locomotivas para formação de trens com foco na minimização do custo total de distribuição.

Em suma, em relação aos modelos existentes na literatura, pode-se destacar essa pesquisa por construir um modelo matemático que 1) integra, ao mesmo tempo, a distribuição de vagões e locomotivas para formação de trens, 2) utiliza a folga na capacidade dos trens em circulação para realizar a distribuição de vagões e locomotivas, 3) permite o balanceamento entre oferta e demanda por meio da utilização das variáveis de folga, 4) considera a disponibilidade de linhas nos pátios para estacionamento de vagões e locomotivas e 5) limita a quantidade máxima de vagões e locomotivas na formação dos trens.

Para avaliar o modelo proposto e os impactos na distribuição integrada de vagões e locomotivas, testes foram realizados considerando-se a variação dos parâmetros:

extensão de linhas de pátio disponíveis para manter vagões e locomotivas estacionadas, limite máximo de vagões por trem, limite máximo de locomotivas por trem e oferta de vagões nos pátios.

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 do Brasil no que tange à volume de transporte de carga. Em todas as instâncias do Estudo de Caso da EFVM, o modelo proposto utilizou menos trens formados exclusivamente de vagões vazios para distribuir vagões e locomotivas do que os trens de vagões vazios efetivamente criados pelo Centro de Controle Operacional da ferrovia no período analisado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um modelo matemático para planejar a distribuição integrada de vagões e locomotivas para formação de trens utilizando a folga na capacidade de tração dos trens que já circulam na ferrovia visando o menor custo desse processo de distribuição.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- Criar uma ferramenta automatizada de auxílio na criação de instâncias para os testes no modelo proposto;
- Avaliar os impactos dos parâmetros operacionais de uma ferrovia para resolver o problema de distribuição de vagões e locomotivas a partir de testes no modelo proposto;
- Aplicar e analisar o modelo proposto para resolver o problema de distribuição de vagões e locomotivas em um caso real - EFVM;

- Realizar análise comparativa dos resultados obtidos pelo modelo e aqueles adotados no planejamento atual da EFVM.

1.2 JUSTIFICATIVA

O investimento em ativos ferroviários é muito alto, sobretudo em vagões e locomotivas. Por conta disso, na literatura científica, encontram-se algumas publicações referentes a metodologias para distribuição destes recursos, contudo, de forma independente, ou seja, são apresentadas metodologias para a distribuição de vagões vazios e metodologias para a distribuição de locomotivas. Ao longo de pesquisas realizadas, pôde-se perceber que a distribuição desassociada de vagões vazios e locomotivas para atendimento a demandas definidas pode elevar os custos operacionais da ferrovia, uma vez que maiores quantidades de viagens podem ser geradas, enquanto que uma análise integrada irá otimizar o conjunto de viagens como um todo, desta forma, reduzindo-se os custos totais de distribuição.

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.

Neste contexto, essa dissertação se justifica por propor a formulação de um modelo matemático integrado para distribuição de vagões vazios e locomotivas que auxilie na tomada de decisão dos distribuidores de recursos de ferrovias, objetivando a otimização de recursos ferroviários. Desta forma, os custos totais de distribuição de vagões vazios e locomotivas nas operações ferroviárias poderão ser minimizados.

No âmbito da pesquisa operacional, além da contribuição científica quanto à incorporação das distribuições de vagões vazios e locomotivas em um modelo único, a relevância desta pesquisa consiste também na apresentação de um modelo que representa ganhos para o meio, já que até então na literatura, estudos existentes consideram que a quantidade de vagões vazios e locomotivas transportadas entre pátios em um período de tempo específico é representada por uma matriz para cada trem trafegando neste intervalo, o que não é real para a ferrovia, já que só pode haver um trem trafegando por vez. Ou seja, os estudos consideram uma matriz de trens para

o mesmo percurso de viagem, o que torna o modelo mais complexo e de solução lenta. Além disso, outra contribuição relevante refere-se à inclusão das variáveis de folga de vagões e locomotivas para suprir demandas que não tenham sido atendidas pela quantidade real ofertada, onde a utilização destas variáveis subsidiará o distribuidor de recursos da ferrovia nas tomadas de decisão.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Além do presente capítulo, de caráter introdutório, esta dissertação é constituída por outros sete capítulos.

No segundo capítulo apresenta-se o referencial teórico sobre os principais conceitos relativos ao problema: A Rede Espaço-Tempo, O Problema da Distribuição de Vagões Vazios e O Problema da Distribuição de Locomotivas.

O terceiro capítulo abrange a metodologia do trabalho, relatando-se a classificação da pesquisa, as etapas da metodologia utilizadas para atingir os objetivos, a descrição do problema tratado, o Estudo de Caso que será analisado, o levantamento e tratamento dos dados utilizados e a metodologia adotada para criação das instâncias de testes.

No quarto capítulo apresenta-se o modelo matemático proposto.

O quinto capítulo contém os resultados dos experimentos computacionais e as subsequentes análises.

No sexto capítulo constam as conclusões e também recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e discutidas as abordagens adotadas para o Problema da Distribuição de Vagões Vazios e da Distribuição de Locomotivas. Antes disso, será feita uma explanação da Rede Espaço-Tempo, a qual aplica-se a ambos os casos de distribuição. O entendimento da Rede Espaço-Tempo nessa dissertação é importante, uma vez que o modelo matemático se baseia neste conceito para simplificar a estrutura de dados do problema.

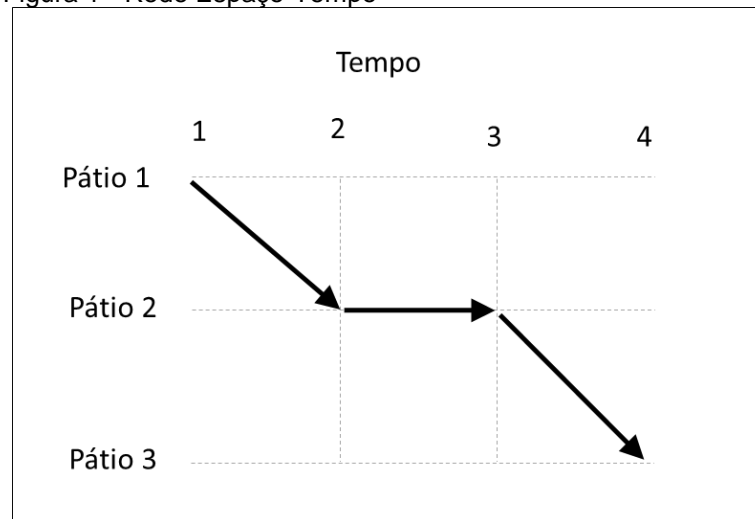
No subcapítulo 2.1 apresentam-se os conceitos relativos à Rede Espaço-Tempo. A definição conceitual e revisão bibliográfica do Problema da Distribuição de Vagões Vazios são apresentadas no subcapítulo 2.2. Já os conceitos e revisões bibliográficas relativos ao Problema da Distribuição de Locomotivas são abordados no subcapítulo 2.3.

2.1 A REDE ESPAÇO-TEMPO

A abordagem mais tradicional para tratar o problema da distribuição de vagões ou locomotivas é a utilização de uma rede espaço-tempo para representar a operação de trens, entre pátios, em certo horizonte de tempo (CRAINIC; LAPORTE, 1997).

Na rede espaço-tempo, o horizonte de planejamento é dividido em tempos discretizados que podem ser um dia, um turno de trabalho, ou mesmo uma hora. O fluxo nesta rede representa o movimento de vagões ou locomotivas de um pátio para outro ou estoque de vagões ou locomotivas em um mesmo pátio (JOBORN et al., 2004), como representado na Figura 1. Cada nó na rede espaço-tempo representa um pátio em um certo momento de tempo e pode ocorrer neste nó uma oferta ou uma demanda por vagões ou locomotivas.

Figura 1 - Rede Espaço-Tempo



Fonte: Própria Autora.

A Figura 1 ilustra o fluxo de vagões ou locomotivas entre os pátios em uma ferrovia. O segmento entre o (pátio 1, tempo 1) e o (pátio 2, tempo 2) representa um trem iniciando sua circulação no pátio 1 no tempo 1 com destino ao pátio 2 no tempo 2, com sua respectiva folga na capacidade de tração. Entre os tempos 2 e 3, a representação significa que o trem ficou estacionado no pátio 2 nesse período. O segmento final representa um trem iniciando sua circulação no pátio 2 no tempo 3 com destino ao pátio 3 no tempo 4, com sua respectiva folga na capacidade de tração para esse trecho.

Na representação da rede espaço-tempo, o número de colunas é igual ao limite do tempo discretizado no problema e o número de linhas é igual à quantidade de pátios envolvidos no modelo.

Os nós representam, em conjunto, os pátios e os tempos, respectivamente, de saída e chegada dos trens, ou seja, trens que saem de um pátio de origem em certo tempo, para um pátio de destino em outro tempo subsequente.

Deste modo, a rede espaço-tempo representa os movimentos dos trens na forma de uma sequência origem-destino, por meio de um par ordenado, indicando respectivamente: pátio de origem e tempo de origem, e pátio de destino e tempo de destino.

2.2 O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE VAGÕES VAZIOS

O problema da distribuição de vagões vazios visa atender a demanda de transporte objetivando a minimização dos custos de distribuição de vagões através do transporte de vagões vazios de pátios onde existe oferta para pátios onde existe demanda. Para isso, são definidas as origens e destinos dos vagões para atender a demanda de transporte 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, as folgas nas capacidades de tração disponíveis nos trens em circulação, 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.

2.2.1 Revisão Bibliográfica do Problema da Distribuição de Vagões Vazios

Dentro do contexto da distribuição de vagões vazios, vários artigos foram encontrados na literatura. Um dos primeiros artigos na área de gestão dos vagões vazios foi desenvolvido por White e Bomberault (1969), que considera o problema da distribuição de vagões vazios em toda a rede, dada à previsão de demanda. Um modelo de programação linear de fluxo de rede global é proposto para reposicionar este recurso, a um custo mínimo, para os locais onde eles são necessários para atender a demanda. Vários estudos sobre a confiabilidade da estrada de ferro e a utilização dos vagões foram realizados na década de 1970 pela Associação Americana de Estradas de Ferro junto com a Massachusetts Institute of Technology.

Misra (1972) estudou a distribuição estática e considerou a questão como um problema de transporte, porém não considerava o fator tempo e assumia o fornecimento da

demanda equilibrada em cada dia. Como a distribuição dependia do fator tempo, e este foi ignorado, a teoria estática foi pouco estudada.

Philip (1978) utilizou modelos de simulação para distribuir os vagões vazios e analisar as operações de pátio. Dejax e Crainic (1987) reuniram e revisaram em um único artigo os modelos de gerenciamento e fluxo da frota de vagões vazios. Eles consideraram o deslocamento de vagões vazios como um problema exclusivo de custo, pois nesta situação os vagões não geram receita e é por esta razão que o planejamento da distribuição de vagões consiste na redução do tráfego destes ativos na condição de vazio, ou pelo menos, deve procurar melhorar a eficiência das operações com vagões carregados.

Uma formulação e solução que combina roteamento, formação de trens e alocação de vagões vazios foi proposta por Haghani (1989). Tal formulação resultou em um modelo de programação inteira mista, com uma função objetivo não linear, e restrições lineares. Para resolução do modelo foi desenvolvida uma técnica de decomposição heurística.

Spieckermann e Voß (1995) afirmaram que os modelos matemáticos e estudos teóricos estão disseminados nas literaturas específicas, mas que ainda necessitam serem aplicados no mundo real, e utilizam de estudos para elaboração de um suporte algorítmico para uma empresa de aluguel de vagões. Cordeau, Toth e Vigo (1998) fizeram uma revisão da maioria dos modelos propostos durante a década de 80, onde tratam da distribuição de vagões vazios, rotas e programação de trens, tanto de carga, como de passageiro. O estudo fez 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.

Crainic e Laporte (1997) apresentaram importantes questões nos sistemas de planejamento e gerenciamento no transporte de carga, abordando todos os três níveis de planejamento: estratégico, tático e operacional. Em cada nível foi feita uma revisão bibliográfica, descrevendo os principais problemas relacionados e como as questões foram abordadas por meio do desenvolvimento em modelos de pesquisa operacional. No nível operacional, destacam a modelagem matemática em uma rede espaço-tempo, na qual representa os trens, os pátios, o horizonte de tempo de planejamento, e por fim, o fluxo de vagões vazios.

Fukasawa (2002) abordou os problemas de nível tático e operacional. No problema tático, foi abordado o Problema de Planejamento de Atendimento (PPA), onde o objetivo é definir as diretrizes de atendimento que irão servir como base para todo o planejamento da operação mensal. Neste nível tático, leva-se em conta: a capacidade da malha, o tamanho da frota de vagões, blocagem, classes de vagões, disponibilidade de vagões vazios, entre outros aspectos. Para este problema, foi desenvolvido um modelo mono-periódico baseado no modelo de multi-fluxos. No nível operacional, foi analisado o chamado Problema de Fluxo de Vagões (PFV), no qual é determinada a rota completa de cada vagão na malha ferroviária, bem como a sequência de carregamentos e descarregamentos, no intervalo de uma semana. Neste modelo, o objetivo é definir quando e como atender, ou não, cada demanda, de modo a maximizar o lucro total. Para o PFV, foi proposto um modelo baseado em multi-fluxos, porém desta vez periódico, sendo que nele são contemplados todos os possíveis movimentos e operações de vagões que podem ser feitos no período. Para ambas modelagens foi usado o *software* CPLEX 7.1.

Segundo Joborn et al. (2004), o problema do processo de distribuição de vagões vazios inclui os problemas de planejamento e desempenho da movimentação de vagões vazios, objetivando a minimização dos custos, de modo a satisfazer a oferta e demanda existentes. Os autores ainda afirmaram que se menos, porém maiores, grupos de vagões pudessem ser atendidos nos pátios, não apenas os processos de manobra e classificação seriam simplificados, mas também o custo unitário do vagão associado seria diminuído, uma vez que a estrutura de custo exibe um comportamento de economia em escala.

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 ferro. Bektas, Cranic e Morency (2007) tiveram por objetivo reduzir o tempo em que os vagões vazios ficam parados nos pátios. Quanto à Sherali e Suharko (1998), estes discutiram estratégias de reposicionamento dos vagões vazios para transporte de automóveis.

Melo, Barros e Nobre (2008) estudaram o problema de planejamento da alocação de vagões de carga por meio de um modelo de Programação Inteira Mista. O horizonte de

planejamento estudado foi de quinze dias, sob o ponto de vista do plano operacional, ou seja, a curto prazo. Em seu artigo eles descreveram cinco modelos, nos quais as funções objetivo solucionavam cinco problemas distintos: minimização dos vagões ociosos retidos em cada pátio, minimização do número de vagões em circulação (vazios e carregados), minimização dos vagões em circulação (apenas vazios), maximização do lucro e a minimização dos custos.

Costa (2010) abordou o problema de distribuição e alocação de vagões vazios em duas etapas. Primeiramente, é realizado o processo de distribuição de vagões, definindo os destinos de cada vagão para atender a demanda de transporte. A partir deste momento, é gerada uma solicitação de movimentação de vagões, a qual serve de dado de entrada para a segunda parte do problema, que é definir quais trens transportarão os vagões de sua origem até o seu destino (alocação dos vagões). Para este último problema, foi elaborado um algoritmo de alocação, cujo objetivo é encontrar algum trem, dentro da grade de trens, para levar os vagões da origem ao destino.

Foletto et al. (2016) propõem um modelo matemático de Programação Linear Inteira como estratégia de distribuição de vagões vazios. Esta proposta visa aproveitar a folga de tração dos trens carregados. Para testar a estratégia, o modelo matemático foi aplicado à Ferrovia Centro Atlântica (FCA) e foi comparado o número de trens formados pela FCA exclusivamente com vagões vazios para fazer a distribuição de vagões com o número de trens formados exclusivamente de vagões de vagões vazios gerados pelo modelo matemático para a estratégia proposta de distribuição de vagões vazios.

2.3 O PROBLEMA DA DISTRIBUIÇÃO DE LOCOMOTIVAS

O problema da distribuição de locomotivas consiste em distribuir as locomotivas disponíveis nos pátios para outros pátios a fim de tracionar os trens que estão sendo formados. Novamente, o objetivo é fazer esta distribuição de tal forma que sejam minimizados os custos totais envolvidos neste processo. Um ponto importante é que um planejamento otimizado desta distribuição pode levar a uma redução do número de locomotivas a serem adquiridas, reduzindo o investimento total em ativos (AHUJA; SHUGHART; LIU, 2006).

A distribuição de locomotivas pode ser realizada de duas formas: 1) acoplando locomotivas desligadas em um trem que já iria circular na ferrovia e, portanto, elas são rebocadas pelas locomotivas do trem e 2) viajando sozinhas, ou no máximo acopladas a outras locomotivas, sem haver acoplamento de vagões. Quando ocorre a primeira forma, a locomotiva é denominada *Deadheading* e na segunda forma ela é denominada escoteira ou *Light Traveling*. Como na primeira situação o trem já irá circular e se aproveita a folga na capacidade de tração para distribuição, ela apresenta um custo muito mais baixo do que a segunda, onde se gasta mais diesel e mais maquinista para fazer a distribuição (MAPOSA; SWENE, 2012).

O problema de planejamento da distribuição de locomotivas é tratado na literatura científica como Locomotive Assignment Problem (LAP) que tem por objetivo o planejamento da designação de locomotivas a trens ao longo de um horizonte de planejamento (PIU; SPERANZA, 2014). Quando o LAP tem uma visão estratégica ou tática é denominado Locomotive Scheduling Problem (LSP) e considera as locomotivas no espaço e tempo, considerando o impacto temporal das decisões, sem definir especificamente cada locomotiva, porém define ao longo do tempo a necessidade de locomotivas por tipo. Quando o LAP tem uma visão mais operacional, ele é denominado de Locomotive Routing Problem (LRP) e, neste caso, define especificamente a rota de cada locomotiva no espaço/tempo considerando abastecimentos e restrições de manutenção. Duas revisões sobre os problemas anteriormente mencionados foram publicadas por Cordeau, Toth e Vigo (1988) e Piu e Speranza (2014).

2.3.1 Revisão Bibliográfica do Problema da Distribuição de Locomotivas

Os primeiros artigos sobre distribuição de locomotivas são propostos e publicados na década de 70. Holt (1973) apresentou um sistema computacional para resolver o LSP em uma ferrovia inglesa permitindo que alterações manuais fossem realizadas. Gohring, Mcbrayer e Mcgaughey (1973) propuseram uma rede espaço-tempo e um algoritmo *out-of-kilter* para encontrar um fluxo ótimo de locomotivas na rede espaço-tempo. Florian et al. (1976) apresentaram um modelo matemático para resolver o LSP aplicado a *Canadian National Railways* (CN), uma ferrovia de carga, com o objetivo de encontrar um conjunto de locomotivas que atendam todos os trens a um custo mínimo

de investimento e de operação. Eles utilizaram pela primeira vez o conceito de *Multi-commodity Flow Network* e propuseram uma solução baseada em Decomposição de Benders.

Ziarati et al. (1997) estenderam o modelo matemático proposto no Florian et al. (1976) incluindo outras restrições operacionais, inclusive a retirada das locomotivas para manutenção. Eles propuseram uma rede espaço-tempo para resolver o modelo proposto e utilizaram um método composto de um procedimento *Branch and Bound* e uma decomposição de *Dantzig–Wolfe*. Apesar de não terem alcançado a otimalidade do modelo, eles relatam ganhos financeiros expressivos correspondentes a US\$ 4 milhões de economia anual para a *Canadian National Railways* (CN). Ziarati et al. (1999) introduziram no modelo de Ziarati et al. (1997) novos planos de *branch and bounds* a fim de buscar a otimalidade do problema, mas mesmo assim, não foi possível ter encontrado o ótimo do problema.

Scholz (2000) tinha por objetivo ao realizar o planejamento da distribuição de locomotivas reduzir o número de locomotivas utilizadas no sistema ferroviário sueco. Os trens possuem uma janela de tempo de partida, não tendo horário específico para a partida. Eles usaram uma abordagem como um Problema *Two-Dimensional Bin-Packing* onde o eixo vertical representa as locomotivas e o eixo horizontal representa o tempo, sendo cada trem representado por um retângulo onde o comprimento de representa o tempo de viagem. Noble et al. (2001) analisaram a situação da *Australian State of Victoria's Public Transport Corporation* (PTC) onde os trens são cíclicos e deve-se decidir quais locomotivas devem ser designadas a um conjunto de viagens de longa distância. Eles propuseram um modelo de Programação Linear Inteira e como o modelo era difícil de convergir, eles propuseram que cada variável inteira fosse representada uma soma linear de um conjunto ordenado de cobertura mínima de variáveis binárias. Com esta nova abordagem, eles conseguiram chegar a otimalidade do problema.

Ziarati, Chizari e Nezhad (2005) elaboraram um Algoritmo Genético para o LSP baseado no conceito de *Multi-commodity Flow Network*. Eles trataram do problema de distribuição para um conjunto de trens cíclicos. O objetivo principal do problema era reduzir o número de locomotivas utilizadas aplicada à *Canadian National Railways* (CN).

Ahuja et al. (2005) propuseram uma formulação de Programação Linear Inteira para uma rede espaço-tempo aplicada a ferrovia CSX. O objetivo do modelo foi reduzir o

custo total definido como a soma de investimento e os custos de trens *Deadheading* e *Light Traveling*. O modelo considerou diversas restrições práticas. Eles propuseram uma abordagem com CPLEX 7.0 para encontrar uma solução inicial e posteriormente utilizaram uma meta-heurística *Very Large-Scale Neighborhood Search* (VLSN) para resolver o modelo proposto. A solução obtida foi muito melhor que a solução encontrada pela CSX.

Bacelar e Garcia (2006) estudaram a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) para o transporte de minério de ferro e elaboraram um modelo matemático e afirmaram que o planejamento realizado pelo modelo conseguiu resultados melhores que os conseguidos pelo planejamento manual da ferrovia. O modelo proposto por eles foi uma simplificação do modelo de Ahuja et al. (2005) adequando o modelo à realidade da ferrovia estudada na época. Por exemplo, eles não consideraram trens *Light Traveling*.

Vaidyanathan, Ahuja e Orlin (2008a) tinham como objetivo a redução dos custos de distribuição de um conjunto de locomotivas para atender a um conjunto de trens da ferrovia americana CSX. Eles adotaram os mesmos procedimentos de Ahuja et al. (2005), ou seja, solução inicial via CPLEX e uma meta-heurística VLSN (*Very Large Scale Neighborhood*). A diferença entre os dois artigos é que Vaidyanathan et al. (2008a) trataram a questão de um conjunto de locomotivas ser desmembrado ao chegar em um pátio para atender a mais de um trem. Eles afirmaram que conseguiram reduzir até 400 locomotivas para a CSX. No mesmo ano, Vaidyanathan et al. (2008b) propuseram um método denominado *consist flow formulation* que se mostrou muito mais rápido do que o método proposto por Ahuja et al. (2005) e Vaidyanathan Ahuja e Orlin (2008a). Este método também incorpora algumas restrições do mundo real, tais como, minimização do desmembramento do conjunto de locomotivas de um trem para atender os outros trens, segundo os autores isto não é desejável para a ferrovia, admitem na frota de locomotivas trens de outras ferrovias e eles consideram conforme regulamentação americana que somente locomotivas com os equipamentos de sinalização adequados para cada trecho possam ser incorporadas aos trens daquele trecho.

Piu (2011) propôs um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista que considera vários aspectos operacionais que ainda não haviam sido considerados, tais como: abastecimento da locomotiva, manutenção, incertezas quanto ao planejamento dos trens. Noori e Ghannadpour (2012) modelou o problema como o Problema de

Roteamento de Veículos Multi-Depósitos onde os trens representam os clientes que devem ser atendidos em uma janela de tempo (*time window*) fuzzy do tipo *hard* ou *soft*. Eles propuseram uma abordagem de duas fases onde na primeira fase, a atribuição locomotiva multi-depósito é convertida a um conjunto de problemas de depósito individuais, e depois disso, cada depósito único problema é resolvido através de um Algoritmo Genético Híbrido.

Maposa e Swene (2012) apresentaram um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista baseados em Ahuja et al. (2005) e os resolveram utilizando o *solver* Lingo 10. Eles aplicaram os modelos à ferrovia *National Railways of Zimbabwe* (NRZ), sendo que a solução mostrou uma redução de 38 locomotivas comparada com a instância real. Apresentaram ainda um outro modelo que não considera trens *Light Traveling* e um outro modelo que desconsidera os valores dos trens *Deadheading*. Bouzaiene-Ayari et al. (2014) utilizaram a abordagem *Approximate Dynamic Programming* (ADP) e aplicaram à *Norfolk Southern Railroad* and *Burlington Northern Santa Fe Railroad*.

Nascimento e Rosa (2016) propuseram um modelo matemático para o LSP que tem por objetivo a minimização do custo de distribuição de locomotivas para atender a demanda para formação de trens a partir de um plano de trens informado, trazendo três contribuições para o estudo do LSP: 1) uma nova formulação matemática que utiliza um vetor espaço-tempo, sendo a transformação da matriz espaço-tempo em um vetor, o que torna o modelo menor, mais simples; 2) uma análise do desbalanceamento entre oferta e demanda, prevendo a possibilidade de demandas não atendidas, através de locomotivas virtuais e 3) uma aplicação a um caso real de uma ferrovia brasileira comparando os resultados com os resultados alcançados pela ferrovia pelo planejamento manual.

Conforme já apresentado nos subcapítulos anteriores, são encontrados na literatura científica alguns artigos, e inclusive formulações matemáticas, para a distribuição de vagões e locomotivas, contudo de forma desassociada. A integração da distribuição de vagões e locomotivas é algo que ainda não foi encontrado em artigos disponíveis na literatura.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este capítulo engloba a apresentação da 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. Na sequência, o subcapítulo 3.3 apresenta a descrição do problema estudado. O Estudo de Caso utilizado para avaliar o modelo proposto é apresentado no subcapítulo 3.4. Por fim, no subcapítulo 3.5 descreve-se a metodologia empregada no levantamento de dados e criação das instâncias.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA

Para classificar a metodologia de pesquisa adotada, assumiu-se a taxonomia proposta por Silva e Menezes (2005), que a qualifica em relação à natureza, à abordagem, ao objetivo e ao procedimento técnico.

Quanto à natureza, a pesquisa é aplicada, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicações práticas do problema de distribuição de vagões e locomotivas para formação de trens.

No que tange à abordagem, a pesquisa é quantitativa, uma vez que o universo de estudo pode ser quantificável, ou seja, as informações podem ser transformadas em relações numéricas, comparadas e analisadas.

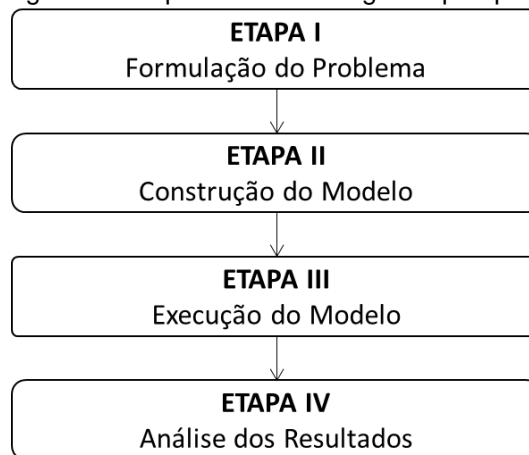
No que concerne aos objetivos, a pesquisa é explicativa, pois identifica os fatores que determinam fenômenos, assumindo em geral as formas de pesquisa experimental.

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 PROPOSTA

Para alcançar o objetivo da dissertação, foi definida uma metodologia de pesquisa a ser seguida, distribuída em quatro etapas, apresentada na Figura 2 e descritas a seguir. Destaca-se que para a fase de construção do modelo são apresentadas as ideias de concepção do modelo e o *software* utilizado para os experimentos. O modelo proposto, por ser o conteúdo mais importante deste trabalho, é destacado em um capítulo à parte (Capítulo 4 - Modelo Matemático Proposto).

Figura 2 - Etapas da metodologia da pesquisa



Fonte: Própria Autora.

Etapa I: Formulação do problema

A etapa de formulação do problema consistiu na identificação dos seguintes elementos: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, objetivos e restrições.

Para garantir a solidez desta formulação, ainda nesta etapa, foram estudadas referências bibliográficas quanto aos modelos de distribuição de vagões vazios e locomotivas, bem como estudos mais aprofundados para conhecer a operação atualmente utilizada para formação 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 vagões vazios e locomotivas, derivados de outros modelos já desenvolvidos isoladamente, quando também foram incorporadas restrições mais próximas à realidade da distribuição de vagões vazios e locomotivas em ferrovias, antes não consideradas. O modelo foi executado usando o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® versão 12.6 (IBM, 2016).

Etapa III: Execução do modelo

Para a operacionalização do modelo proposto, foi necessário criar uma estrutura de dados que representasse adequadamente a dinâmica do modelo. A partir disso, foram realizadas as seguintes etapas:

- Criação de ferramenta automatizada para auxílio na criação de instâncias teste;
- Criação efetiva das instâncias teste;
- 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.

Etapa IV: Análise dos Resultados

Depois da execução do modelo matemático com as instâncias definidas, foi realizada análise dos resultados obtidos entre as variações das instâncias de teste definidas, bem como com as instâncias com dados reais da EFVM.

As considerações finais, contribuições e limitações foram descritas no Capítulo 6 - Conclusões.

3.3 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema analisado trata de uma estratégia para distribuição integrada de vagões e locomotivas que utiliza a folga na capacidade de tração dos trens já programados para acoplar vagões vazios e locomotivas até o limite da folga de tração do trem. Dessa forma, utilizam-se os trens que já iriam circular na via, cuja operação de acoplar mais vagões e locomotivas gera uma diminuição grande de custo, quando comparados à formação de trens apenas de vagões vazios ou de locomotivas viajando sozinhas (escoteiras).

Essa estratégia de distribuição trata também de solucionar o problema quando a demanda solicitada não puder ser atendida na totalidade pela folga de tração dos trens em circulação na ferrovia. Nestes casos, permite-se a introdução de trens formados de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras com custos elevados para determinar a quantidade necessária a ser introduzida para atendimento às demandas solicitadas nos pátios. Desta forma, utiliza-se prioritariamente a folga de tração dos trens que já circulam na ferrovia e, na sequência, permite-se ao distribuidor de recursos obter a quantidade de trens de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras que serão efetivamente necessários para garantir o pleno atendimento à demanda solicitada.

3.4 ESTUDO DE CASO

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 37% do transporte de toda carga ferroviária nacional (CNT, 2017).

A EFVM tem 905 km de extensão, bitola métrica, interconexão com outras ferrovias em Ouro Branco - MG (MRS Logística S.A.), Pedro Nolasco - ES (FCA – Ferrovia Centro-Atlântica S.A.), Eng^o 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, 2015).

A EFVM é uma ferrovia estratégica por interligar o Sudeste e o Centro-Oeste do país. Por ano, são transportadas 130 milhões de toneladas (CNT, 2017), cerca de 30% 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 315 locomotivas e 19.031 vagões atendendo a 13 minas, 34 pátios de formação de trens e 17 pátios de carga geral (CNT, 2017).

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 e locomotivas 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.

Os trens de carga geral são compostos por um número variável de vagões (máximo de 144 vagões). Os vagões são distribuídos de forma aleatória no trem, podendo existir tipos de vagões distintos na formação de um mesmo trem, carregados ou vazios, inclusive a mesma carga em locais diferentes do trem, fato que os torna mais flexíveis.

Os pátios de carga e descarga de vagões de carga geral são apresentados na Figura 3 e listados no Quadro 1.

Figura 3 – Mapa da EFVM com indicação dos terminais de carga geral



Fonte: ANTT, 2015 (adaptado pela autora).

Quadro 1 – Pátios de carga geral EFVM

Nº	Sigla	Pátio	Tipo	
			Carga	Descarga
01	VAB	Aroaba		X
02	VPA	Piraqueaçu		X
03	VGW	Governador Valadares	X	
04	VFS	Frederico Selow	X	
05	VIC	Intendente Câmara	X	X
06	VMR	Mário Carvalho	X	X
07	VDD	Desembargador Drumond		X
08	VBV	Bela Vista de Minas	X	X
09	VJM	João Monlevade	X	
10	VCS	Eng. Costa Lacerda	X	X
11	VFU	Funil	X	
12	VEB	Engenheiro Bandeira	X	X
13	VOB	Ouro Branco	X	X
14	VWI	Pedreira Rio das Velhas	X	X
15	VAZ	Aracruz	X	X
16	VTU	Tubarão	X	X
17	VPN	Pedro Nolasco	X	X

3.5 LEVANTAMENTO DE DADOS E CRIAÇÃO DAS INSTÂNCIAS

Para validação do modelo proposto nesta dissertação, foram levantados os dados do Estudo de Caso descrito no subcapítulo 3.3 e, a partir destes, foram criadas 24 instâncias, as quais serão descritas na sequência. Este subcapítulo é apresentado em três partes. O primeiro refere-se às instâncias de teste para avaliação do comportamento do modelo, o segundo refere-se às instâncias criadas a partir de dados reais do sistema informatizado da EFVM para os trens de carga geral e, por fim, no terceiro, é apresentada uma compilação contendo o resumo de todas as instâncias criadas.

3.5.1 Instâncias de Teste

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 vagões vazios e locomotivas realizadas quando aplicadas variações nos diversos parâmetros que envolvem o problema, mostrando assim como a ferramenta pode ser aplicada como auxílio à tomada de decisão pelo distribuidor de recursos de uma ferrovia.

Para realização dos testes, foram criadas 17 instâncias, a partir da variação de uma instância padrão, considerando o horizonte de planejamento de uma semana. O horizonte de planejamento foi dividido em tempos discretizados em turnos de trabalho de 6 horas, totalizando 28 unidades de tempo, em 10 pátios.

A criação das instâncias de teste para análise do desempenho do modelo matemático foi realizada de forma automatizada, através da elaboração de macros no *software* Excel, ou seja, uma rotina escrita em *Visual Basic for Application* (VBA), a qual é apresentada no APÊNDICE A.

Os dados parametrizados para as macros foram: horizonte de tempo, número de pátios, tipos de vagões, tipos de locomotivas, limite de tonelada livre no trem, custo do vagão, máximo de vagões no trem, quantidade de vagões atual no trem, custo da locomotiva,

máximo de locomotivas no trem, quantidade de locomotivas atual no trem, oferta de vagões, demanda de vagões, oferta de locomotivas e demanda de locomotivas, conforme Figura 4.

Figura 4 – Tela em Excel para criação das instâncias

The image shows an Excel spreadsheet with a dialog box titled "UserForm1" overlaid. The dialog box contains the following fields and controls:

- Nome da Instância:** A text input field.
- Horizonte de Tempo:** A numeric input field.
- Número de Pátios:** A numeric input field.
- Tipos de Vagões:** A text input field.
- Tipos de Locomotivas:** A text input field.
- Limite Inferior / Limite Superior:** A table with two columns for defining value ranges for various parameters.
- Ok:** A button at the bottom of the dialog box.

The background Excel spreadsheet shows a grid with columns A through N and rows 1 through 35. A button labeled "Gerar Tabelas" is visible in cell B3. A tab labeled "Tabela de Nós" is visible at the bottom of the spreadsheet.

Fonte: Própria Autora.

Para garantir uma aleatoriedade na geração das instâncias, a caixa de diálogo de entrada permite a inserção de dados em um intervalo de valores, definido pelo limite inferior e limite superior informados. Para os casos em que não era desejável possibilitar a macro a geração de dados aleatórios, os valores informados nos campos de limite inferior e limite superior foram iguais. O detalhamento dos dados de entrada é apresentado a seguir.

- **Horizonte de Tempo:** tempos discretizados que serão analisados, por exemplo, para uma semana poderiam ser considerados 07 unidades de tempo para dias, ou 168 unidades de tempo para horas, ou ainda 28 unidades de tempo para turnos de 6h;
- **Número de Pátios:** quantidade de pátios analisados onde os vagões vazios e/ou locomotivas podem ser ofertados ou demandados;

- Tipos de Vagões: quantidade de tipos de vagões vazios disponíveis;
- Tipos de Locomotivas: quantidade de tipos de locomotivas disponíveis;
- Limite de Tonelada Livre no Trem: folga de tração disponível de um trem em um trecho;
- Custo do Vagão: custo para transportar um vagão vazio em um trecho;
- Máximo de Vagões no Trem: quantidade máxima de vagões permitida por trem em um trecho;
- Quantidade de Vagões Atual no Trem: quantidade de vagões já alocados no trem programado em um trecho;
- Custo da Locomotiva: custo para transportar uma locomotiva em um trecho;
- Máximo de Locomotivas no Trem: quantidade máxima de locomotivas permitida por trem em um trecho;
- Quantidade de Locomotivas Atual no Trem: quantidade de locomotivas já alocadas para tracionar o trem programado em um trecho;
- Oferta de Vagões: quantidade de vagões vazios ofertada em um pátio e um tempo específico;
- Demanda de Vagões: quantidade de vagões vazios demandada em um pátio e um tempo específico;
- Oferta de Locomotivas: quantidade de locomotivas ofertada em um pátio e um tempo específico;
- Demanda de Locomotivas: demanda por potência de tração de locomotivas em um pátio e um tempo específico.

Ao final, a macro retorna um arquivo texto com extensão *dat* na formatação apropriada para entrada no *solver* CPLEX.

Outros parâmetros de entrada, como extensão de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas, peso e comprimento de cada tipo de vagão e peso e comprimento de cada tipo de locomotiva, que também serão necessários para resolução do problema, foram incluídos manualmente nas instâncias após a saída automatizada dos demais parâmetros pela macro.

Sabe-se que os custos de transporte de vagões e locomotivas envolvem uma série de despesas, as quais não foram levantadas e consideradas nesta dissertação. Desta forma, entendeu-se que a criação da matriz de custo pela macro resultaria em uma

aleatoriedade que não reflete a realidade no âmbito ferroviário. Desta forma, visando uma melhor aproximação para realização das análises de maneira comparativa, as matrizes de custos de transporte de vagões vazios e locomotivas foram criadas manualmente, sendo definidas em função do deslocamento entre pátios (Tabelas 1 e 2). Assim sendo, para cada intervalo entre pátios foi atribuído o valor 10 para o transporte de vagões vazios e 50 para o transporte de locomotivas. Para os casos em que os vagões vazios e locomotivas ficaram estacionados nos pátios, o custo foi atribuído como zero, ainda que algumas operações internas no pátio possam ser necessárias.

Tabela 1 – Matriz de custos para transporte de vagões vazios entre pátios

	Pátio 01	Pátio 02	Pátio 03	Pátio 04	Pátio 05	Pátio 06	Pátio 07	Pátio 08	Pátio 09	Pátio 10
Pátio 01	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Pátio 02	10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Pátio 03	20	10	0	10	20	30	40	50	60	70
Pátio 04	30	20	10	0	10	20	30	40	50	60
Pátio 05	40	30	20	10	0	10	20	30	40	50
Pátio 06	50	40	30	20	10	0	10	20	30	40
Pátio 07	60	50	40	30	20	10	0	10	20	30
Pátio 08	70	60	50	40	30	20	10	0	10	20
Pátio 09	80	70	60	50	40	30	20	10	0	10
Pátio 10	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0

Tabela 2 - Matriz de custos para transporte de locomotivas entre pátios

	Pátio 01	Pátio 02	Pátio 03	Pátio 04	Pátio 05	Pátio 06	Pátio 07	Pátio 08	Pátio 09	Pátio 10
Pátio 01	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Pátio 02	50	0	50	100	150	200	250	300	350	400
Pátio 03	100	50	0	50	100	150	200	250	300	350
Pátio 04	150	100	50	0	50	100	150	200	250	300
Pátio 05	200	150	100	50	0	50	100	150	200	250
Pátio 06	250	200	150	100	50	0	50	100	150	200
Pátio 07	300	250	200	150	100	50	0	50	100	150
Pátio 08	350	300	250	200	150	100	50	0	50	100
Pátio 09	400	350	300	250	200	150	100	50	0	50
Pátio 10	450	400	350	300	250	200	150	100	50	0

As 17 instâncias criadas para avaliar o desempenho do modelo foram separadas em seis grupos (Grupos A a E), os quais serão detalhados a seguir.

O Grupo A é composto apenas da Instância 01 e refere-se à Instância Padrão, a partir da qual todas as variações de parâmetros foram realizadas. Pela Instância 01, será avaliado o comportamento do modelo para um segmento ferroviário contendo 10 pátios, considerando turnos de 6h durante uma semana, ou seja, 28 unidades de tempo, utilizando-se três tipos de vagões e dois tipos de locomotivas. Os dados de entrada desta instância foram gerados pela macro descrita anteriormente, com padronização dos seguintes parâmetros:

- O limite máximo de vagões na formação de um trem foi atribuído em 120 vagões;
- O limite máximo de locomotivas na formação de um trem foi atribuído igual a 3 locomotivas;
- A extensão máxima de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões vazios e locomotivas foi igual para todos os pátios, atribuída em 620 metros.

No Grupo B, as instâncias tomaram por base a Instância Padrão, alterando-se apenas o parâmetro de extensão de linhas disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas no pátio. As Instâncias 02 a 05 consideram um aumento de 10%, 20%, 30% e 40%, respectivamente, na disponibilidade do pátio para comportar maior quantidade de vagões e locomotivas estacionadas nos dez pátios em análise. Dessa forma, as novas extensões de linhas de pátios disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas passam a ser 682m, 744m, 806m e 868m, respectivamente.

No Grupo C, as instâncias tomam por base a Instância Padrão, alterando-se apenas o parâmetro de limite máximo de vagões em cada trem. As Instâncias 06 a 09 consideram o limite máximo de 132, 144, 156 e 168 vagões, respectivamente, na formação de cada trem.

De maneira análoga, no Grupo D, as instâncias tomam por base a Instância Padrão, alterando-se apenas o parâmetro de limite máximo de locomotivas em cada trem. Na Instância 10, considera-se a diminuição de duas locomotivas nos trens, ou seja, como na Instância Padrão, o limite máximo era de três locomotivas, implica em dizer que nenhum trem poderá acoplar novas locomotivas, já que minimamente uma locomotiva já estará rebocando os vagões do trem programado. O objetivo desta instância é testar o modelo quanto ao não atendimento à demanda por locomotivas. A Instância 11 considera a diminuição de uma locomotiva no limite máximo de locomotivas por trem,

ou seja, permite-se o máximo de duas locomotivas por trem. Já nas Instâncias 12 e 13, avalia-se o modelo quando aumentado o limite máximo de locomotivas em cada trem, adotando-se o máximo de quatro e cinco locomotivas, respectivamente, em cada trem.

O Grupo E, também baseado na Instância Padrão, é composto das Instâncias 14 a 16 e servirá para avaliar o comportamento do modelo quanto à distribuição de vagões vazios e locomotivas quando aumentada a oferta de vagões vazios nos pátios em 10%, 15% e 20%, respectivamente. O aumento de ofertas foi aplicado apenas nos nós (um pátio e um tempo específicos) onde já havia oferta disponível, ou seja, onde não havia oferta na Instância Padrão, assim foi mantido. Para suportar este aumento de oferta nos pátios, fez-se necessário aumentar a extensão de linhas disponíveis nos pátios em 20%. Ainda neste grupo, a Instância 17 foi criada com objetivo comparativo à Instância 16, onde as ofertas são majoradas em 20%, contudo aumentando-se a extensão de linhas disponíveis nos pátios para 30%. Desta forma, espera-se que o custo de distribuição total da Instância 17 seja inferior à Instância 16, uma vez que vagões vazios e locomotivas terão maior disponibilidade nos pátios para permanecer estacionados e atender solicitações dos próprios pátios onde estão localizados.

Para complementar as análises para validação do modelo proposto, foi criado o Grupo F, composto por outras três instâncias (Instâncias 18 a 20). O objetivo deste grupo foi avaliar o comportamento do modelo quanto ao tempo de processamento para instâncias maiores, permitindo assim futuras aplicações a uma ferrovia real. Tomou-se, portanto, para exemplificação dos testes, 34 pátios de formação de trens, ou seja, baseando-se na configuração da EFVM.

No Grupo F, foi considerado horizonte de planejamento de 10 dias (Instância 18), 20 dias (Instância 19) e 30 dias (Instância 20) para análise da distribuição de vagões vazios e locomotivas.

Os dados de oferta e demanda, assim como dados referentes à extensão de linhas disponíveis nos pátios, tamanho e peso do material rodante, e custos não consideram dados reais, uma vez que objetivo aqui é avaliar o desempenho do modelo para instâncias de teste maiores, sem finalidade comparativa dos resultados ao planejamento real de uma ferrovia.

Da mesma forma que os grupos relatados anteriormente, a criação destas instâncias de teste também foi feita de forma automatizada, com utilização de macros do *software* Excel, utilizando a rotina escrita em VBA.

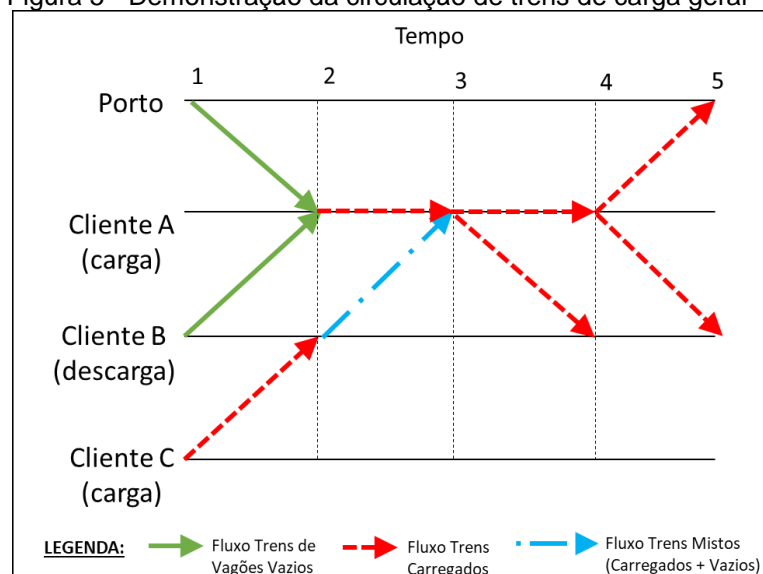
3.5.2 Instâncias EFVM – Carga Geral

O levantamento de dados inicial realizado junto à EFVM, pertencente à Vale S/A, foi realizado por meio do Projeto FAPES/Vale 75528452/2016 e abrangeu algumas reuniões e conversas com a equipe de planejamento operacional que, por sua vez, resultaram na disponibilização de alguns dados do sistema informatizado da Vale que apresentam as matrizes de distribuição de vagões e locomotivas ocorridas diariamente.

Com base nos dados do sistema informatizado da EFVM, verificou-se que os trens de carga geral desta ferrovia apresentam fluxo de trens carregados tanto no sentido Cliente – Porto, quanto vice-versa e, portanto, esta classe de trem foi adotada para aplicação de um caso real, de forma a comparar a distribuição de vagões vazios e locomotivas realizada pelo modelo proposto àquela efetivamente realizada pelos distribuidores de recursos da ferrovia no período em que será analisado.

Como os pontos de carga e descarga são diversos, o fluxo de trens carregados e de vagões vazios ocorre em ambos os sentidos da malha (Figura 5), sendo este um dos motivos pelo qual os trens de carga geral serão alvo das análises no modelo proposto.

Figura 5 - Demonstração da circulação de trens de carga geral



Fonte: Própria Autora.

Os dados para esta pesquisa são provenientes de dados reais de circulação de trens de carga geral nos 17 pátios de carga e descarga da EFVM listados no Quadro 1, no período de 01 a 28 de Janeiro de 2017.

Por questões de confidencialidade dos dados da Vale, os dados obtidos foram somados a uma constante não divulgada para análise dos resultados do modelo.

Desta forma, a partir dos dados do sistema informatizado da Vale S/A, somados à constante não divulgada, obteve-se a quantidade de trens formados pelo Centro de Controle Operacional – CCO exclusivamente por vagões vazios para atendimento à demanda de carga geral no período analisado (Tabela 3).

Tabela 3 - Quantidade de trens criados pelo CCO

Período	Total de Trens de Vagões Vazios
Semana 01 (01/01/17 a 07/01/17)	38
Semana 02 (08/01/17 a 14/01/17)	47
Semana 03 (15/01/17 a 21/01/17)	39
Semana 04 (22/01/17 a 28/01/17)	37

Nota-se que, semanalmente, são formados vários trens exclusivamente de vagões vazios para atendimento às demandas de clientes, sendo que no mês de Janeiro de 2017 totalizou-se a formação de 161 trens, sendo uma média de 6 trens de vagões vazios por dia.

Com utilização do sistema informatizado da EFVM, foram extraídas as principais informações das viagens efetivamente realizadas para formação dos trens (plano de trens), tais como: data da viagem, classe do trem, origem do trem, destino do trem, classificação da viagem, horário de saída do trem na origem, horário de chegada do trem no destino, tipo e quantidade de locomotivas tracionando, tipo e quantidade de locomotivas rebocadas, tipo e quantidade de vagões carregados, tipo e quantidade de vagões vazios, e peso bruto do trem.

Os dados de oferta e demanda de vagões vazios para carregamento nas minas foram obtidos junto ao CCO da EFVM.

Desta forma, o Grupo G, composto das Instâncias 21 a 24, refere-se às instâncias criadas com base em dados reais do CCO EFVM para os trens de carga geral no mês de Janeiro de 2017, tomando as seguintes considerações:

- São utilizados cinco tipos de vagões (Gôndola para descarga em *Car Dumper* - GDE, Gôndola com descarga inferior - GFE, Hopper, Plataforma e Fechado);
- É utilizado apenas um tipo de locomotiva (Dash 9);
- A distribuição será analisada para os 17 pátios apresentados no Quadro 1;
- Cada semana do mês de Janeiro/17 representa uma Instância do Grupo, sendo Instância 21 a semana 01 (01/01/17 a 07/01/17), Instância 22 a semana 02 (08/01/17 a 14/01/17), Instância 23 a semana 03 (15/01/17 a 21/01/17) e Instância 24 a semana 04 (22/01/17 a 28/01/17);
- O horizonte de planejamento de cada semana foi segmentado em turnos de 6h, ou seja, discretizado em 28 unidades de tempo (7 dias vezes 4 turnos de 6h cada);
- Foi estabelecido o limite máximo de seis trens que podem chegar ou sair de um pátio em um determinado tempo, ou seja, uma média de um trem por hora;
- A folga de tração disponível nos trens foi permitida na capacidade máxima do maior trem (5 locomotivas e 144 vagões);
- Para os segmentos entre pátios onde não existe previsão de entrega de trens programados pelos responsáveis pelo CCO, a folga de tração foi zero;
- A extensão máxima de linhas disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas nos pátios foi de 2.000 metros, dada pela média obtida a partir de entrevistas com os responsáveis pelo CCO;
- Os dados de oferta e demanda de vagões vazios e locomotivas foram obtidos do planejamento informado pelos responsáveis pelo CCO para os pátios;
- O custo de transporte de um vagão vazio foi igual a 1 quando acoplado em trens de vagões carregados e 100 quando acoplado em trens de vagões vazios;
- O custo de transporte de uma locomotiva foi igual a 50 quando acoplada em trens de vagões carregados e 5.000 quando acoplada em trens de vagões vazios.

Inicialmente as análises serão realizadas utilizando apenas a folga de tração disponível nos trens carregados. As demandas que não puderem ser atendidas pelos trens com folga de tração utilizarão as variáveis de folga do modelo. Desta forma, numa segunda

análise, serão introduzidos os trens de vagões vazios, com os custos apresentados anteriormente, objetivando obter a quantidade de trens de vagões vazios que será utilizada pelo modelo proposto.

Assim sendo, com a criação das Instâncias 21 a 24, considerando a distribuição de trens realizada pelo CCO Vale, será possível comparar a quantidade de trens exclusivamente formados por vagões vazios criados pelo CCO e aqueles resultantes do modelo matemático proposto após ter utilizado toda a folga de tração de trens de vagões carregados que já circulariam na ferrovia.

3.5.3 Resumo das Instâncias Criadas

A Tabela 4 apresenta o resumo das 24 instâncias geradas no desenvolvimento desta dissertação.

Tabela 4 - Instâncias de teste executadas no modelo

Grupo	Instância	Tempo (h)	Pátios	Tipos Vagões	Tipos Locos	Descrição
A	01	28	10	3	2	Instância Padrão
B	02	28	10	3	2	Padrão + 10% Extensão de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas
	03					Padrão + 20% Extensão de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas
	04					Padrão + 30% Extensão de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas
	05					Padrão + 40% Extensão de linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas
C	06	28	10	3	2	Padrão + 10% Limite máximo de vagões em um trem
	07					Padrão + 20% Limite máximo de vagões em um trem
	08					Padrão + 30% Limite máximo de vagões em um trem
	09					Padrão + 40% Limite máximo de vagões em um trem
D	10	28	10	3	2	Padrão - 1 Locomotiva no limite máximo de locomotivas em um trem
	11					Padrão - 2 Locomotivas no limite máximo de locomotivas em um trem
	12					Padrão + 1 Locomotiva no limite máximo de locomotivas em um trem
	13					Padrão + 2 Locomotivas no limite máximo de locomotivas em um trem
E	14	28	10	3	2	Padrão + 10% Oferta de vagões vazios
	15					Padrão + 15% Oferta de vagões vazios
	16					Padrão + 20% Oferta de vagões vazios
	17					Padrão + 20% Oferta de vagões vazios
F	18	10	34	1	1	Teste em ferrovia com 34 pátios – 10 dias
	19	20				Teste em ferrovia com 34 pátios – 20 dias
	20	30				Teste em ferrovia com 34 pátios – 30 dias
G	21	28	17	5	1	Semana 01 (01 a 07/01/17) EFVM – Carga Geral
	22					Semana 02 (08 a 14/01/17) EFVM - Carga Geral
	23					Semana 03 (15 a 21/01/17) EFVM - Carga Geral
	24					Semana 04 (22 a 28/01/17) EFVM - Carga Geral

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

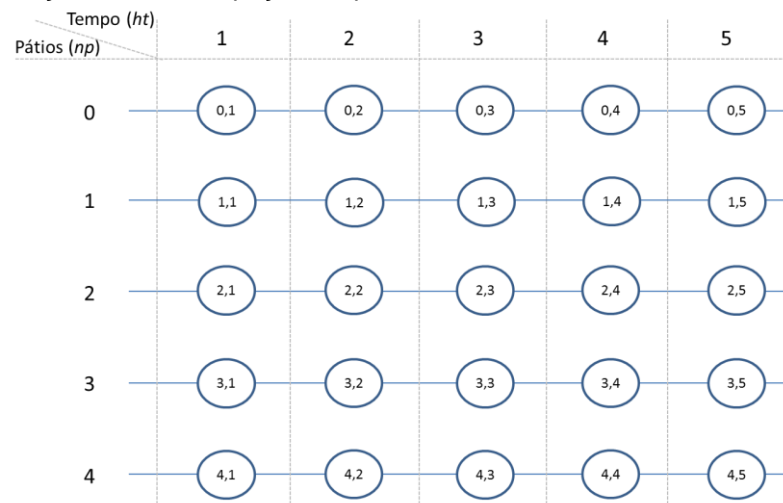
Neste capítulo, é descrito o modelo matemático proposto baseado numa rede espaço-tempo para distribuição de vagões vazios e locomotivas em uma ferrovia. Nos modelos de rede espaço-tempo propostos na literatura, cada nó é representado por um par ordenado (pátio, tempo) (Figura 6). Nesta dissertação, é considerado para cada nó um índice único, criando um vetor espaço-tempo, visando simplificar a estrutura de dados do problema (Figura 7).

Para realizar a transformação da matriz espaço-tempo em vetor espaço-tempo, foi utilizada a metodologia proposta por Nascimento e Rosa (2016), onde define-se np como o número de pátios da ferrovia e p um pátio específico da ferrovia, sendo que p varia de 0 a $np - 1$, ht o horizonte de planejamento e t um tempo específico e discretizado variando de 1 até ht . Têm-se então duas situações: 1) quando se está no pátio p no tempo $t = 1$; e 2) quando se está no pátio p no tempo $t > 1$. Tomando as duas situações apresentadas anteriormente, pode-se transformar a rede espaço-tempo da Figura 6 no vetor espaço-tempo da Figura 7 por meio da Equação (1).

$$\omega = (t + (p \cdot ht)) \quad (1)$$

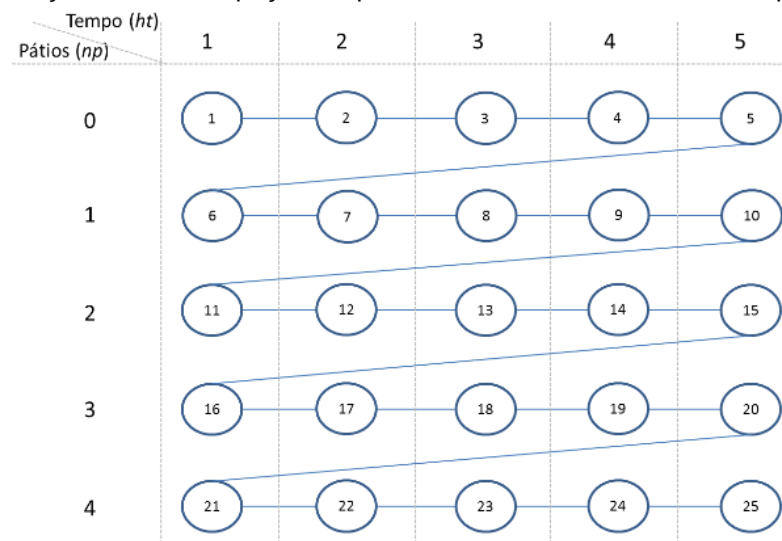
Nas Figuras 5 e 6 é apresentado um exemplo com cinco pátios e um horizonte de planejamento de cinco dias e são apresentados dois exemplos, um para cada uma das duas situações apresentadas. Primeiro, analisando o pátio 0 no tempo 1 da Figura 6 chega-se à posição 1 do vetor espaço-tempo da Figura 7 calculada pela fórmula $\omega = (t + (p \cdot ht)) = (1 + (0 \cdot 5)) = 1$. Segundo exemplo, analisando o pátio 2 no tempo 3 da Figura 6 chega-se à posição 13 do vetor espaço-tempo da Figura 7 calculada pela fórmula $\omega = (t + (p \cdot ht)) = (3 + (2 \cdot 5)) = 13$. Assim, após toda a transformação, conforme exemplificado anteriormente, chega-se, então, à Figura 7 que representa o vetor espaço-tempo do problema da Figura 6.

Figura 6 - Representação da Rede Espaço-Tempo usualmente utilizada na literatura (par ordenado)



Fonte: Nascimento e Rosa, 2016.

Figura 7 - Representação da Rede Espaço-Tempo utilizada no modelo matemático proposto (vetor)

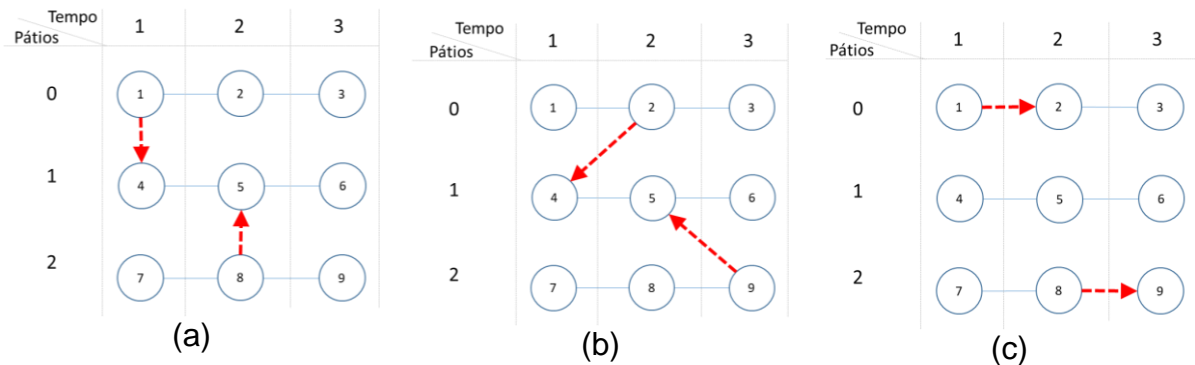


Fonte: Nascimento e Rosa, 2016.

Nesta dissertação, os arcos representam o trem carregado e sua folga na capacidade de tração entre os pátios i (nó de partida) e j (nó de chegada). Como premissas da rede espaço-tempo, em especial no âmbito ferroviário, tem-se que: 1) um trem não pode realizar viagens entre pátios no mesmo período de tempo (Figura 8a), ou para períodos de tempo anteriores (Figura 8b); 2) para os casos em que deve ser restringida a possibilidade de circulação de trens, o parâmetro folga na capacidade para estes arcos deve ser igual a zero, de modo que, onde houver folga na capacidade de tração entende-se que há algum trem planejado para o trajeto correspondente; 3) em cada

arco só pode trafegar um trem, correspondente a uma seção de bloqueio na ferrovia;
4) não existem viagens dentro de um mesmo pátio, neste caso o trem manteve-se estacionado nas linhas de pátio (Figura 8c).

Figura 8 – Representação dos arcos que assumem valor zero. a) viagens entre pátios no mesmo período de tempo, b) viagens para períodos de tempo anteriores e c) viagens dentro de um mesmo pátio



Fonte: Própria Autora.

No modelo proposto, são adotadas para cada pátio variáveis de folga para vagões e locomotivas que representam o não atendimento da demanda em um tempo específico. Desta forma, quando utilizadas estas variáveis de folga, o modelo permite que sejam introduzidos trens formados de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras com custos elevados para suprir a demanda solicitada nos pátios. Assim sendo, este artifício possibilita o distribuidor de recursos da ferrovia a programar a quantidade de trens formados somente de vagões vazios e/ou locomotivas escoteiras que serão efetivamente necessários para atender a demanda solicitada caso a folga na capacidade de tração dos trens em circulação na ferrovia não sejam suficientes.

Outro ponto de destaque refere-se à utilização de locomotivas rebocadas e escoteiras, onde a primeira apresenta um custo muito mais baixo do que a segunda. No modelo aqui proposto, o tipo da locomotiva é considerado no custo do arco de viagem em referência. Como a função objetivo visa minimizar os custos de transporte, prioriza-se o tráfego com utilização das locomotivas rebocadas.

Como o horizonte de planejamento é dado por unidade de tempo, onde estes podem ser analisados em horas, dias, semanas, meses, ou ainda turnos de trabalho, então em um pátio em um momento de tempo discretizado podem sair e/ou chegar mais de um trem. Isto significa dizer, por exemplo, que em uma análise onde o horizonte de

planejamento é dado em dias, o modelo permite que seja restringida a quantidade máxima de trens que podem sair e/ou chegar nos pátios por dia.

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.

O modelo matemático está baseado em uma rede espaço-tempo, conforme Figura 7. A rede espaço-tempo é constituída de np pátios e horizonte de planejamento de ht tempos. O conjunto de nós da rede espaço-tempo, portanto, é definido por $N = (1, \dots, np \ ht)$. São considerados v tipos de vagões e m tipos de locomotivas disponíveis.

Conjuntos

P	Pátios da ferrovia, variando de $0 \dots (np - 1)$;
T	Tempos discretizados, variando de $1 \dots ht$;
N	Nós do vetor espaço-tempo, variando de $1 \dots (np \ ht)$;
V	Tipos de vagões, variando de $1 \dots v$;
M	Tipos de locomotivas, variando de $1 \dots m$.

Parâmetros

- Geral

$l_{tt_{ij}}$	Folga de tração disponível do trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
c_{pp_p}	Extensão das linhas de pátio disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas no pátio $p \in P$;
n_{tp_i}	Número de trens que podem chegar e/ou sair do nó $i \in N$ em um período de tempo;
θ	Parâmetro para definição da lógica do modelo que recebe um valor alto, igual a 9999;
α	Parâmetro para definição da lógica do modelo que recebe um valor baixo, igual a 0,001;

- Vagões

cv_{ij}	Custo de transportar um vagão vazio no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
sv_v	Peso do tipo de vagão $v \in V$;
lv_v	Comprimento do tipo de vagão $v \in V$;
ov_{vi}	Oferta de vagões vazios do tipo $v \in V$ no nó $i \in N$;

dv_{vi}	Demanda de vagões vazios do tipo $v \in V$ no nó $i \in N$;
mvt_{ij}	Limite máximo de vagões em um trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
vat_{ij}	Quantidade atual de vagões no trem percorrendo o trecho $i \in N$ a $j \in N$.
β	Parâmetro de penalização da Função Objetivo para evitar o não atendimento da demanda de vagões vazios.
- Locomotivas	
cl_{ij}	Custo de transportar uma locomotiva no trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
sl_m	Peso do tipo de locomotiva $m \in M$;
ll_m	Comprimento do tipo de locomotiva $m \in M$;
ol_{mi}	Oferta de locomotivas do tipo $m \in M$ no nó $i \in N$;
dl_i	Demanda de locomotivas em HP no nó $i \in N$;
hpm	Potência em HP da locomotiva do tipo $m \in M$;
mlt_{ij}	Limite máximo de locomotivas em um trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
lat_{ij}	Quantidade atual de locomotivas no trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$.
μ	Parâmetro da Função Objetivo para priorizar a utilização de locomotivas de maior potência;
δ	Parâmetro de penalização da Função Objetivo para evitar o não atendimento da demanda por locomotivas.

Variáveis de Decisão

- Geral

$fluxo_{ij}$	Variável binária que assume o valor igual a 1 se existe fluxo de locomotivas e/ou vagões entre os nós $i \in N$ e $j \in N$. E assume valor igual a 0 caso contrário;
--------------	--

- Vagões

yv_{vij}	Quantidade de vagões vazios do tipo $v \in V$ transportados acoplados em um trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
ev_{vi}	Número de vagões vazios do tipo $v \in V$ estacionados no nó $i \in N$;
nav_{vi}	Demanda por vagões vazios do tipo $v \in V$ que não pode ser atendida no nó $i \in N$;

- Locomotivas

yl_{mij}	Quantidade de locomotivas do tipo $m \in M$ transportadas acopladas em um trem no trecho $i \in N$ a $j \in N$;
el_{mi}	Número de locomotivas do tipo $m \in M$ estacionadas no nó $i \in N$;

atd_{mi}	Quantidade de locomotivas do tipo $m \in M$ designadas para atender a demanda no nó $i \in N$;
nal_i	Demanda por potência de tração, em HP, que não pode ser atendida no nó $i \in N$.

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

Função Objetivo

Minimizar

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(cv_{ij} \sum_{v \in V} yv_{vij} \right) + \quad (2a)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left(cl_{ij} \sum_{m \in M} yl_{mij} \right) + \quad (2b)$$

$$\mu \sum_{m \in M} \sum_{i \in N} atd_{mi} + \quad (2c)$$

$$\beta \sum_{v \in V} \sum_{i \in N} nav_{vi} + \quad (2d)$$

$$\delta \sum_{i \in N} nal_i \quad (2e)$$

Sujeito a:

$$\sum_{v \in V} yv_{vij} sv_v + \sum_{m \in M} yl_{mij} sl_m \leq ltt_{ij} \quad \forall i, j \in N | \quad (3)$$

$$i \neq j$$

$$ev_{v(t+(p ht))} = ov_{v(t+(p ht))} - \sum_{j \in N} yv_{v(t+(p ht))j} \quad \forall v \in V, p \in P, \quad (4)$$

$$t \in T | t = 1$$

$$\begin{aligned}
ev_{v(t+(p ht))} &= ev_{v(t+(p ht)-1)} + ov_{v(t+(p ht))} \\
&\quad - \sum_{j \in N} yv_{v(t+(p ht))j} + \sum_{j \in N} yv_{vj(t+(p ht))} \\
&\quad - dv_{v(t+(p ht))} + nav_{v(t+(p ht))}
\end{aligned}
\quad \begin{array}{l} \forall v \in V, p \in P, \\ t \in T \mid t > 1 \end{array} \quad (5)$$

$$el_{m(t+(p ht))} = ol_{m(t+(p ht))} - \sum_{j \in N} yl_{m(t+(p ht))j} \quad \begin{array}{l} \forall m \in M, p \in P, \\ t \in T \mid t = 1 \end{array} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
el_{m(t+(p ht))} &= el_{m(t+(p ht)-1)} + ol_{m(t+(p ht))} \\
&\quad - \sum_{j \in N} yl_{m(t+(p ht))j} + \sum_{j \in N} yl_{mj(t+(p ht))} \\
&\quad - atd_{m(t+(p ht))}
\end{aligned}
\quad \begin{array}{l} \forall m \in M, p \in P, \\ t \in T \mid t > 1 \end{array} \quad (7)$$

$$dl_i \leq nal_i + \sum_{m \in M} atd_{mi} hp_m \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$yv_{vii} = 0 \quad \forall v \in V, i \in N \quad (9)$$

$$yv_{vij} + vat_{ij} \leq mvt_{ij} \quad \begin{array}{l} \forall v \in V, i, j \in N \mid \\ i \neq j \end{array} \quad (10)$$

$$yl_{mii} = 0 \quad \forall m \in M, i \in N \quad (11)$$

$$yl_{mij} + lat_{ij} \leq mlt_{ij} \quad \begin{array}{l} \forall m \in M, i, j \in N \mid \\ i \neq j \end{array} \quad (12)$$

$$\sum_{v \in V} ev_{v(t+(p ht))} lv_v + \sum_{m \in M} el_{m(t+(p ht))} ll_m \leq cpp_p \quad \forall p \in P, t \in T \quad (13)$$

$$\sum_{v \in V} yv_{vij} + \sum_{m \in MT} yl_{mij} \leq fluxo_{ij} \theta \quad \forall i, j \in N \quad (14)$$

$$\sum_{v \in V} yv_{vij} + \sum_{m \in MT} yl_{mij} \geq fluxo_{ij} \alpha \quad \forall i \in N, j \in N \quad (15)$$

$$\sum_{i \in N} fluxo_{ji} + \sum_{j \in N} fluxo_{ij} \leq ntp_i \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$yv_{vij} \in Z^+ \quad \forall v \in V, i, j \in N \quad (17)$$

$$yl_{mij} \in Z^+ \quad \forall m \in M, i, j \in N \quad (18)$$

$$ev_{vi} \in Z^+ \quad \forall v \in V, i \in N \quad (19)$$

$$el_{mi} \in Z^+ \quad \forall m \in M, i \in N \quad (20)$$

$$atd_{mi} \in Z^+ \quad \forall m \in M, i \in N \quad (21)$$

$$nav_{v(t+(pht))} = 0 \quad \forall v \in V, p \in P, \quad (22)$$

$$t \in T | t = 1$$

$$nal_{(t+(pht))} = 0 \quad \forall p \in P, t \in T | \quad (23)$$

$$t = 1$$

$$nav_{vi} \in Z^+ \quad \forall v \in V, i \in N \quad (24)$$

$$nal_i \in Z^+ \quad \forall i \in N \quad (25)$$

$$fluxo_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N, j \in N \quad (26)$$

$$fluxo_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in N | \quad (27)$$

$$i = t + (p ht)$$

$$j = t + ((p + 1) ht)$$

$$fluxo_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in N | \quad (28)$$

$$i = t + (p ht)$$

$$j = (t + 1) + (p ht)$$

$$fluxo_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in N | \quad (29)$$

$$i = t + (p ht)$$

$$j = (t - 1) + (p ht)$$

$$fluxo_{ij} = 0 \quad \forall i, j \in N | \quad (29)$$

$$i = t + (p ht)$$

$$j = (t - 1) + (p ht)$$

$$fluxo_{ii} = 0 \quad \forall i \in N \quad (30)$$

A função objetivo expressa os custos de distribuição de vagões vazios, parcela (2a), de locomotivas, parcela (2b), a quantidade de locomotivas utilizadas, parcela (2c), a quantidade de vagões não atendidos, parcela (2d), e a quantidade de locomotivas não atendidas, parcela (2e). Ressalta-se que a função objetivo não possui uma unidade, ou seja, é adimensional. A função objetivo deve ser minimizada.

A parcela (2a) calcula o custo total da movimentação de vagões vazios, multiplicando o custo unitário de um vagão $v \in V$ no trecho $i \in N$ a $j \in N$. A parcela (2b) calcula o custo total da movimentação de locomotivas, multiplicando o custo unitário de uma locomotiva $m \in M$ no trecho $i \in N$ a $j \in N$. A parcela (2c) calcula a quantidade de locomotivas $m \in M$ utilizadas para atender a demanda no nó $i \in N$ e, com isso, como a função objetivo é de minimização, busca-se utilizar locomotivas maiores, pois haverá a redução do número de locomotivas utilizadas para atender à demanda, sendo adotado um coeficiente $\mu = 0,001$ para diminuir o impacto desta parcela na função objetivo.

As parcelas (2d) e (2e) representam o não atendimento à demanda de vagões e locomotivas, respectivamente. Para tanto, são adotados fatores de penalização altos, para que o modelo evite ao máximo a utilização dos mesmos. A parcela (2d) representa que este nó, pátio x tempo, não terá sua demanda por vagão atendida, com aplicação de fator de penalização $\beta = 10.000,0$, e a parcela (2e) representa que este nó, pátio x tempo, não terá sua demanda por locomotiva atendida, com fator de penalização $\delta = 2,5$.

As Restrições (3) garantem que o peso total de vagões e locomotivas transportadas para atendimento à demanda respeite o limite de tonelada disponível do trem no trecho.

As Restrições (4) garantem a manutenção da quantidade de vagões vazios estacionados no nó correspondente no tempo $t = 1$, considerando o balanceamento entre oferta e demanda, bem como os vagões que foram enviados para outros nós. Nestas restrições, ocorre o momento inicial de planejamento de cada pátio, ou seja, ainda não existem vagões que podem chegar via trem para tais nós.

As Restrições (5) diferem das Restrições (4), pois representam os outros tempos, $t > 1$, no vetor espaço-tempo de certo pátio e, assim, consideram também os vagões vazios que chegam de outros pátios em tempos anteriores via trem para o cálculo da continuidade de fluxo, o que não ocorre nas Restrições (4).

As Restrições (6) garantem a manutenção da quantidade de locomotivas estacionadas no nó correspondente no tempo $t = 1$, considerando o balanceamento entre oferta e demanda, bem como as locomotivas que foram enviados para outros nós. Nestas restrições, ocorre o momento inicial de planejamento de cada pátio, ou seja, ainda não existem locomotivas que podem chegar via trem para tais nós.

As Restrições (7) diferem das Restrições (6), pois representam os outros tempos, $t > 1$, no vetor espaço-tempo de certo pátio e, assim, consideram também as locomotivas que chegam de outros pátios em tempos anteriores via trem para o cálculo da continuidade de fluxo.

As Restrições (8) garantem que a demanda no nó i em HP seja atendida. Ou seja, o número de locomotivas do tipo $m \in M$ para atender à demanda no nó i multiplicado pela quantidade de HP por locomotivas do tipo $m \in M$ deve ser maior ou igual à demanda solicitada, dl .

As Restrições (9) garantem que não haja fluxo de vagões vazios para a condição $i = j$. As Restrições (10) garantem que a quantidade de vagões vazios transportados para atendimento à demanda, somada à quantidade de vagões atuais, no trecho $i \in N$ a $j \in N$, respeite a quantidade máxima de vagões permitida no trecho.

As Restrições (11) garantem que não haja fluxo de locomotivas para a condição $i = j$. As Restrições (12) garantem que a quantidade de locomotivas transportadas para atendimento à demanda, somada à quantidade de locomotivas atuais, no trecho $i \in N$ a $j \in N$, respeite a quantidade máxima de locomotivas permitida no trecho.

As Restrições (13) garantem que a quantidade de vagões e locomotivas estacionadas no pátio $p \in P$ respeite a capacidade de metros de linha disponíveis no tempo $t \in T$ sem prejuízo à operacionalidade do pátio.

As Restrições (14) e (15) definem o valor da variável de decisão $fluxo_{ij}$. As Restrições (16) garantem que não haja chegada e saída de mais de um número específico de trens no nó $i \in N$, ou seja, em um pátio em um momento de tempo discretizado pode chegar e sair ntp trens, pois só há uma entrada / saída do pátio.

As Restrições (17) e (18) garantem que a quantidade de vagões vazios e locomotivas transportados, respectivamente, seja maior ou igual a zero. As Restrições (19) e (20) garantem a não negatividade da quantidade de vagões e locomotivas estacionadas,

respectivamente, em cada nó. As Restrições (21) garantem a quantidade de locomotivas para atender a demanda no nó i seja maior ou igual à zero. As Restrições (22) e (23) garantem que não existam demanda de vagões e locomotivas, respectivamente, no tempo $t = 1$, já que não existem vagões e/ou locomotivas chegando nestes nós. Isso refere-se a uma etapa de pré-processamento do modelo matemático.

As Restrições (24) e (25) garantem que as variáveis de folga adotadas sejam maiores ou iguais a zero. Vale destacar que, caso a variável nav_{vi} seja maior que zero, isso implica que a demanda no nó i pelo vagão do tipo v não foi atendida exatamente no valor de nav_{vi} . Analogamente, o mesmo ocorre para locomotivas, sendo que a variável nal_i representa a quantidade de HP demandada no nó i que não pode ser atendida.

As Restrições (26) definem o domínio da variável $fluxo_{ij}$, podendo assumir o valor igual a 1, quando existe fluxo de vagões e/ou locomotivas no trecho $i \in N$ a $j \in N$, ou valor 0, caso contrário. O fluxo de vagões e/ou locomotivas no trecho assume valor zero quando considerado: transporte entre pátios no mesmo período de tempo (Restrições 27), transporte dentro de um mesmo pátio (Restrições 28), transporte entre pátios para períodos de tempo anteriores (Restrições 29) e transporte no mesmo pátio e mesmo período de tempo (Restrições 30).

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas 24 instâncias descritas no Subcapítulo 3.5. Ressalta-se que os dados das Instâncias 01 a 20 são testes para avaliação do comportamento do modelo, enquanto as Instâncias 21 a 24 foram obtidas de dados reais de sistema informatizado da EFVM no período de Janeiro de 2017 para os trens de carga geral.

Em todos os testes que serão apresentados, o modelo foi executado usando o *solver* IBM® ILOG® CPLEX® versão 12.6 (IBM, 2016) em um computador com processador Intel i7 com 16 GB de memória RAM.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados obtidos pelos testes computacionais para cada instância, listando-se as instâncias, tempo de execução, GAP e o valor da função objetivo.

Tabela 5 – Resultados alcançados pelo CPLEX (continua)

Grupo	Instância	Tempo de Execução (s)	GAP (%)	Função Objetivo
A	1 (Padrão)	20,97	0,0	1.052.960
B	2	18,99	0,0	1.052.410
	3	19,23	0,0	1.052.380
	4	19,06	0,0	1.052.300
	5	19,09	0,0	1.052.300
C	6	19,05	0,0	883.930
	7	19,24	0,0	703.690
	8	19,38	0,0	703.610
	9	18,7	0,0	703.610
D	10	19,21	0,0	1.072.860
	11	19,02	0,0	1.052.960
	12	19,32	0,0	1.052.960
	13	19,17	0,0	1.052.960
E	14	19,23	0,0	603.320
	15	19,59	0,0	393.340
	16	18,97	0,0	253.840
	17	19,16	0,0	203.730
F	18	279,01	0,0	828.127
	19	517,02	0,0	1.543.423
	20	837,95	0,0	2.340.626

Tabela 5 – Resultados alcançados pelo CPLEX (conclusão)

Grupo	Instância	Tempo de Execução (s)	GAP (%)	Função Objetivo
G	21	292,81	0,0	2.584.869
	22	294,55	0,0	1.803.878
	23	295,51	0,0	2.384.835
	24	294,54	0,0	2.252.854

De acordo com a Tabela 5, para as instâncias de teste de 01 a 17 (Grupos A a E), o *solver* CPLEX conseguiu resolver otimamente todas as instâncias em um tempo de execução muito pequeno, menos de 20 segundos. Para o Grupo F, referente às instâncias de teste maiores, o modelo foi capaz de resolver otimamente todas as instâncias em tempo máximo de aproximadamente 14 minutos. Já o Grupo G, referente às instâncias teste com dados semanais do transporte de carga geral da EFVM, o *solver* CPLEX conseguiu resolver otimamente todas as instâncias em um tempo de execução inferior a cinco minutos.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados operacionais alcançados pelo CPLEX para cada instância, listando-se a quantidade de trens com folga na capacidade de tração utilizados, a quantidade de solicitações atendidas por vagões vazios e locomotivas (uma solicitação refere-se ao pedido por vagões vazios ou locomotivas em um pátio em um determinado tempo), quantidade de solicitações não atendidas por vagões vazios e locomotivas, quantidade de vagões vazios e locomotivas transportada em trens com folga de tração para atender as demandas, quantidade de vagões vazios e locomotivas indisponíveis para atender as demandas, custo total de vagões vazios e locomotivas transportados (custo de distribuição) e custo de não atendimento à demanda por vagões vazios e locomotivas.

Importante destacar que os vagões vazios e locomotivas indicados como indisponíveis nas explanações a seguir, referem-se à quantidade de variáveis de folga que foram utilizadas pelo modelo para obtenção da solução ótima. Isso significa que, nesses casos, deverão ser formados trens exclusivamente de vagões vazios ou enviadas locomotivas escoteiras para atender as solicitações dos pátios que tiveram suas demandas atendidas pela folga de tração dos trens em circulação na ferrovia.

Tabela 6 - Resultados apresentados pelo CPLEX para as instâncias criadas

Grupo	Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados	Vagões Vazios				Locomotivas				Custos Totais		
			Solicitações Atendidas	Solicitações Não Atendidas	Qnt Transportados	Indisponíveis (demanda não atendida)	Solicitações Atendidas	Solicitações Não Atendidas	Qnt Transportadas	Indisponíveis (demanda não atendida)	Distribuição	Não Atendimento por Vagões	Não Atendimento por Locos
A	1 (Padrão)	16	29	7	158	105	19	0	2	0	2.960	1.050.000	0
B	2	15	29	7	134	105	19	0	2	0	2.410	1.050.000	0
	3	12	26	10	129	105	19	0	2	0	2.380	1.050.000	0
	4	11	26	10	127	105	19	0	2	0	2.300	1.050.000	0
	5	11	28	8	127	105	19	0	2	0	2.300	1.050.000	0
C	6	19	30	6	189	88	19	0	3	0	3.930	880.000	0
	7	18	30	6	165	70	19	0	3	0	3.690	700.000	0
	8	18	30	6	157	70	19	0	3	0	3.610	700.000	0
	9	18	30	6	157	70	19	0	3	0	3.610	700.000	0
D	10	16	29	7	158	105	17	2	0	2	2.860	1.050.000	20.000
	11	16	29	7	158	105	19	0	2	0	2.960	1.050.000	0
	12	16	28	8	158	105	19	0	2	0	2.960	1.050.000	0
	13	16	29	7	158	105	19	0	2	0	2.960	1.050.000	0
E	14	18	31	5	155	60	19	0	3	0	3.320	600.000	0
	15	20	33	3	155	39	19	0	3	0	3.340	390.000	0
	16	20	33	3	179	24	18	1	3	1	3.840	240.000	10.000
	17	21	33	3	171	20	19	0	3	0	3.730	200.000	0
F	18	43	28	519	4.452	73.658	18	173	19	174	4.547	736.580	87.000
	19	95	69	982	11.088	137.718	29	308	31	310	11.243	1.377.180	155.000
	20	134	101	1490	16.296	207.514	36	491	38	498	16.486	2.075.140	249.000
G	21	39	72	0	3.402	0	10	0	11	0	2.584.869	0	0
	22	36	73	0	3.405	0	15	0	19	0	1.803.878	0	0
	23	32	61	0	3.161	0	13	0	16	0	2.384.835	0	0
	24	37	69	0	3.420	0	14	0	17	0	2.252.854	0	0

O Grupo A possui somente a Instância 01, denominada Instância Padrão. Nesta Instância, a solução ótima foi encontrada utilizando-se 16 trens que já estavam previstos na circulação da ferrovia para transportar um total de 158 vagões e duas locomotivas para atendimento às solicitações de demandas necessárias no horizonte de tempo de 7 dias, em turnos de 6 horas. Nessa Instância, observa-se que toda a demanda por locomotivas foi atendida, enquanto que 105 vagões não foram disponibilizados para atendimento à demanda em sete solicitações.

5.1 ANÁLISES QUANTO À EXTENSÃO DAS LINHAS DE PÁTIO

O Grupo B, composto pelas Instâncias 02 a 05, foi criado para avaliar a distribuição de vagões e locomotivas quando aumentada a disponibilidade, em extensão, das linhas dos pátios para estacionamento de vagões e locomotivas. As Instâncias 02 a 05 consideram um aumento de 10%, 20%, 30% e 40%, respectivamente, na disponibilidade do pátio para comportar maior quantidade de vagões e locomotivas estacionadas nos pátios em análise. Desta forma, as novas extensões de linhas de pátios disponíveis para estacionamento de vagões e locomotivas passam a ser 682m, 744m, 806m e 868m, respectivamente.

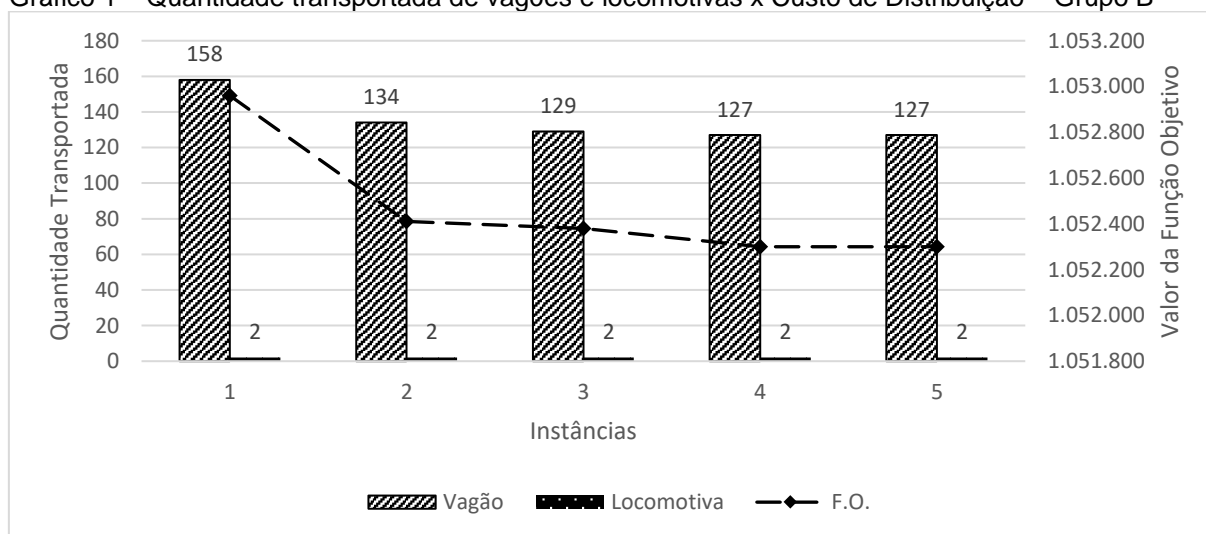
A Tabela 7 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos para este grupo de análise, comparados à Instância Padrão.

Tabela 7 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo B

Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados			Qnt Estacionada para Atender Demandas dos Pátios		Demanda Não Atendida	
	Quantidade	Total de Vagões Vazios Transportados	Total de Locomotivas Transportadas	Vagões Vazios	Locomotivas	Vagões Vazios Indisponíveis	Locomotivas Indisponíveis
1 (Padrão)	16	158	2	535	35	105	0
2	15	134	2	559	35	105	0
3	12	129	2	564	35	105	0
4	11	127	2	566	35	105	0
5	11	127	2	566	35	105	0

Observa-se no Gráfico 1 que, em todos os casos, quando aumentada a disponibilidade de linhas nos pátios, a quantidade de vagões transportados para atendimento às demandas solicitadas diminui. Nota-se que, enquanto que a Instância Padrão transportou 158 vagões, os aumentos de 10% e 20%, referente às Instâncias 02 e 03, respectivamente, reduziram a quantidade transportada para 134 e 129 vagões. Contudo, a partir do aumento da disponibilidade de linhas nos pátios em 30% (Instância 04), o modelo se estabiliza, resultando em 127 vagões transportados para atendimento à demanda por vagões vazios. Percebe-se também que, a variação deste parâmetro não impactou em redução na quantidade de locomotivas transportadas, sendo um total de duas locomotivas para todas as instâncias deste grupo. Nota-se, portanto, que a diminuição do custo total de distribuição deste grupo está atribuída à redução na quantidade de vagões vazios transportados.

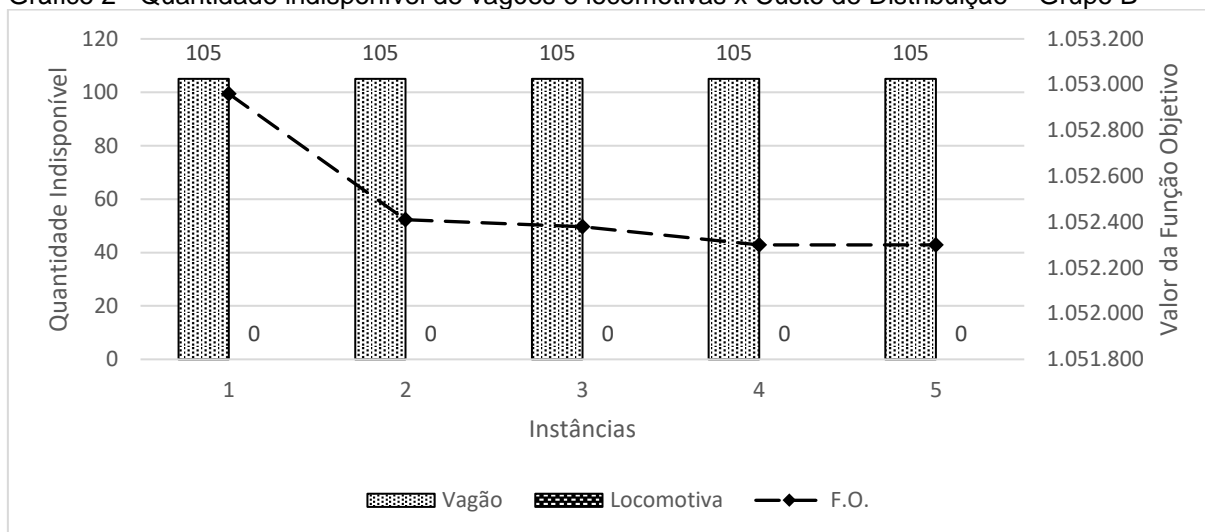
Gráfico 1 – Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo B



Fonte: Própria Autora.

No Gráfico 2, observa-se que a quantidade de vagões indisponíveis para atendimento às demandas nos pátios é igual para todas as instâncias do Grupo B. Contudo, na Tabela 6, é possível perceber que, ainda que a quantidade total de vagões vazios indisponíveis é igual a 105 vagões para todas as instâncias, a quantidade de pátios com demandas não atendidas em um determinado tempo, ou seja, solicitações não atendidas, foi variável.

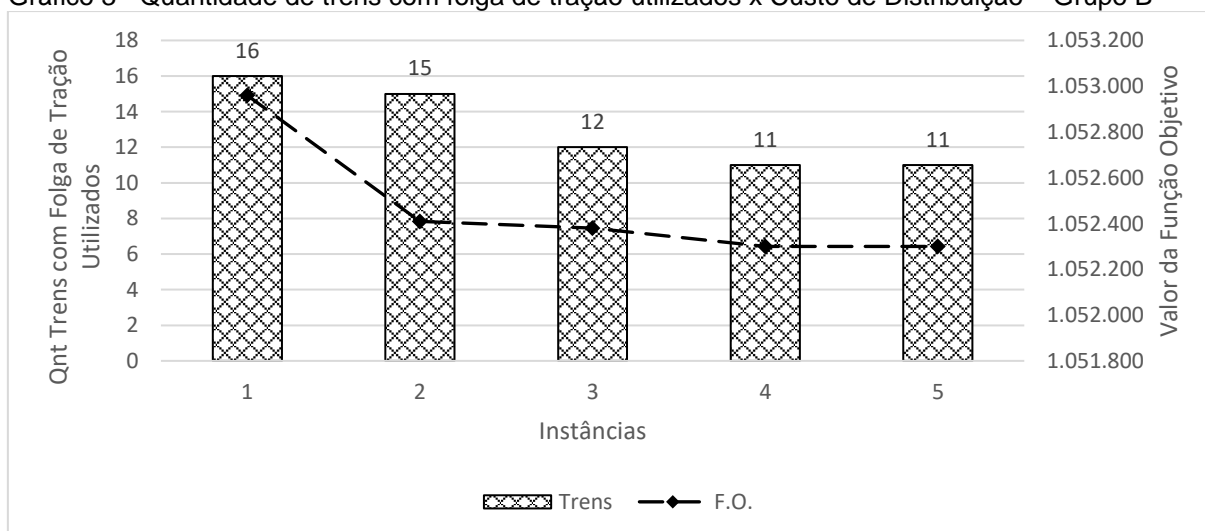
Gráfico 2 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo B



Fonte: Própria Autora.

No Gráfico 3 é apresentada a quantidade de trens com folga na capacidade de tração em circulação na ferrovia que foram utilizados para realizar a distribuição de vagões vazios e locomotivas. A Instância Padrão utilizou 16 trens com folga de tração, enquanto que as Instâncias 02 a 04 utilizaram 15, 12 e 11 trens com folga de tração, respectivamente. Nota-se novamente que, a partir do aumento da disponibilidade de linhas nos pátios em 30% (Instância 04), o modelo se estabiliza, resultando em 11 trens com folga de tração utilizados para acoplar vagões vazios.

Gráfico 3 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição – Grupo B



Fonte: Própria Autora.

Com isso, conclui-se que, quando aumentada a extensão de linhas disponíveis nos pátios, menos trens com folga de tração em circulação na ferrovia são necessários para atender as demandas dos pátios. Isto ocorre pois, quando aumentada a extensão de linhas disponíveis nos pátios, vagões e locomotivas podem permanecer por mais tempo estacionados nestes pátios, podendo assim suprir futuras demandas dos pátios onde estão estacionados. Além disso, evita-se que sejam acoplados vagões e locomotivas em trens com folga na capacidade de tração cuja operação se faça necessária apenas para desocupação do pátio por indisponibilidade de linhas.

Os testes realizados nesta pesquisa mostraram que o aumento de 30% na extensão das linhas dos pátios atingiu o menor custo total de distribuição do Grupo B, não sendo necessárias alterações nos pátios para garantir disponibilidades de linhas maiores que esta, já que a partir do aumento de 30%, o modelo estabilizou-se.

5.2 ANÁLISES QUANTO AO LIMITE MÁXIMO DE VAGÕES EM CADA TREM

No Grupo C, composto das Instâncias 06 a 09, são avaliados os impactos na distribuição de vagões e locomotivas quanto aumentado o limite máximo de vagões permitidos para acoplar em cada trem, sendo um total de 120 vagões na Instância Padrão, 132 vagões na Instância 06, 144 vagões na Instância 07, 156 vagões na Instância 08 e 168 vagões na Instância 09; ou seja, foram aplicados incrementos de 10%, cumulativos com base na Instância Padrão, em cada instância do grupo.

A Tabela 8 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos para este grupo de análise, comparados à Instância Padrão.

Tabela 8 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo C

Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados		Demanda Não Atendida por Vagões	
	Quantidade	Total de Vagões Vazios Transportados	Total de Solicitações	Total de Vagões
1 (Padrão)	16	158	7	105
6	19	189	6	88
7	18	165	6	70
8	18	157	6	70
9	18	157	6	70

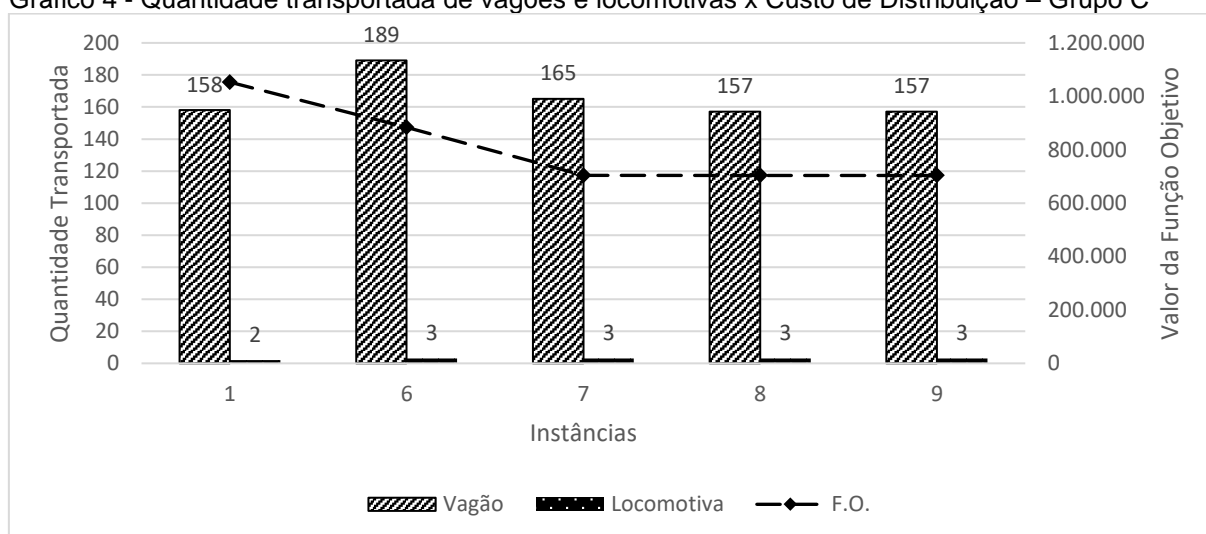
Na Instância 06, a demanda solicitada foi atendida acoplando-se um total de 189 vagões vazios e três locomotivas em 19 trens com folga de tração em circulação na ferrovia. Ou seja, quando comparada à Instância Padrão, o aumento de 10% no limite máximo de vagões em cada trem, implicou em aumento na quantidade de vagões vazios e locomotivas transportadas. Vale destacar que, o aumento deste parâmetro permitiu uma redução na quantidade de solicitações não atendidas, de sete para seis solicitações com demandas por vagões não atendidas, diminuindo de um total de 105 vagões vazios indisponíveis para 88, o que gerou redução no custo total de distribuição.

Na Instância 07, onde o limite máximo de vagões em cada trem aumentou de 120 para 144 vagões, também houve acréscimo na quantidade de trens com folga de tração utilizados, bem como no total de vagões e locomotivas acoplados a estes trens, quando comparada à Instância Padrão. Este aumento de 20% no limite máximo de vagões em cada trem permitiu uma redução de vagões vazios indisponíveis de 105 para 70, quando comparados à Instância Padrão, ou ainda de 88 para 70 vagões vazios indisponíveis, quando comparados à Instância 06. Desta forma, a Instância 07 apresentou um custo total de distribuição inferior à Instância 06.

Nas Instâncias 08 e 09, quando os limites máximos de vagões em cada trem foram de 156 e 168 vagões, respectivamente, a quantidade de vagões vazios indisponíveis para atender às solicitações dos pátios foi mantida em 70 vagões, assim como na Instância 07. No entanto, vale destacar que o incremento no limite máximo de vagões por trem na Instância 08 atendeu a mesma demanda da Instância 07, contudo acoplando-se menos vagões nos trens com folga de tração e, portanto, seu custo é ligeiramente inferior à Instância 07. Já na Instância 09, nenhum ganho financeiro é observado, quando comparada à Instância 07. Ou seja, nota-se que a partir do limite de 156 vagões acoplados por trem (Instância 08), o modelo se estabilizou.

O Gráfico 4 apresenta o impacto do parâmetro em análise quanto à quantidade total de vagões e locomotivas transportada em trens com folga na capacidade de tração.

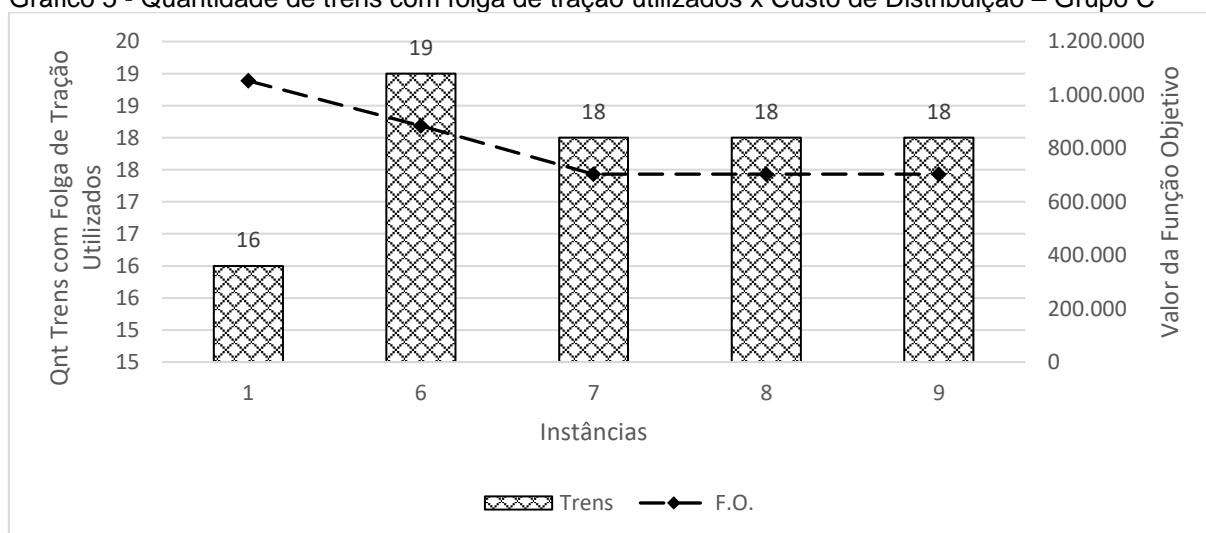
Gráfico 4 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo C



Fonte: Própria Autora.

O Gráfico 5 apresenta o aumento na quantidade de trens com folga de tração utilizados para transportar a quantidade total de vagões e locomotivas apresentadas no Gráfico 4.

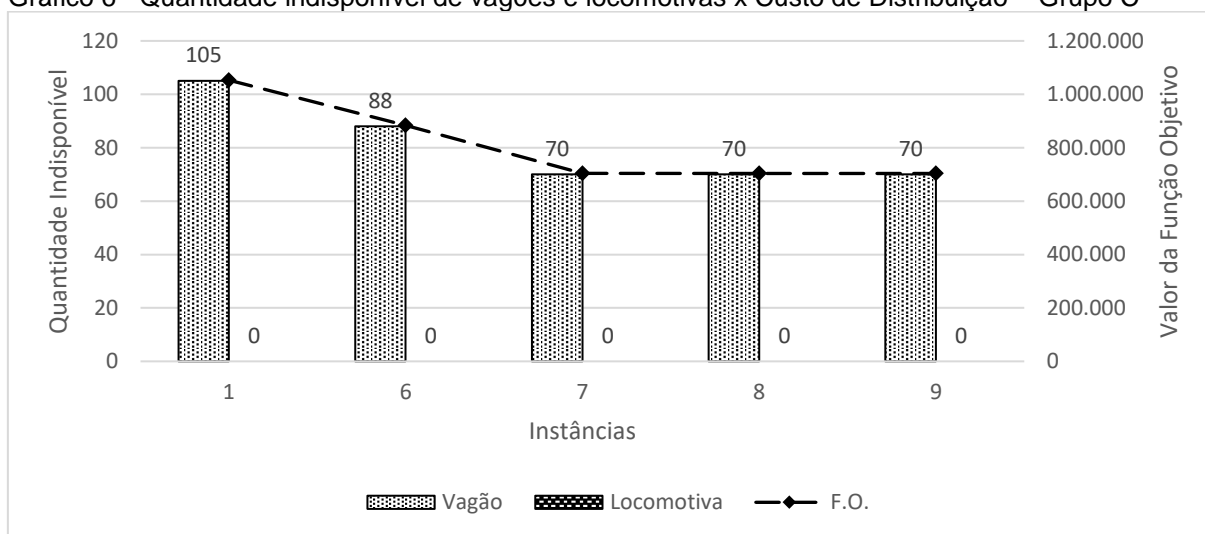
Gráfico 5 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição – Grupo C



Fonte: Própria Autora.

No Gráfico 6 é apresentada a redução na quantidade de vagões indisponíveis para atender às demandas dos pátios considerando o impacto do aumento no parâmetro em análise.

Gráfico 6 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo C



Fonte: Própria Autora.

Assim sendo, nota-se que o aumento no limite máximo de vagões por trem permitiu que mais trens com folga de tração pudessem ser utilizados para realizar a distribuição de vagões e locomotivas, podendo assim acoplar maior quantidade de vagões e locomotivas para atender às solicitações dos pátios. Associado a isso, a quantidade de solicitações não atendidas nos pátios foi reduzida.

Os testes realizados nesta pesquisa mostraram que o aumento a partir de 30% no limite máximo de vagões em cada trem não impactou no custo total de distribuição.

5.3 ANÁLISES QUANTO AO LIMITE MÁXIMO DE LOCOMOTIVAS EM CADA TREM

No Grupo D, as instâncias tinham como objetivo verificar o comportamento do modelo quando variada a quantidade máxima de locomotivas permitidas nos trens com folga na capacidade de tração. Vale lembrar que a Instância Padrão permitia um total de três locomotivas em cada trem.

Com isso, na Instância 10, a quantidade foi reduzida para o máximo de uma locomotiva por trem, ou seja, a análise considerou que não pudesse ser acoplada nenhuma locomotiva nos trens em circulação, ainda que com folga na capacidade de tração. Na Instância 11, a quantidade foi reduzida para o máximo de duas locomotivas

por trem, enquanto nas Instâncias 12 e 13 foi aumentada para quatro e cinco locomotivas por trem, respectivamente.

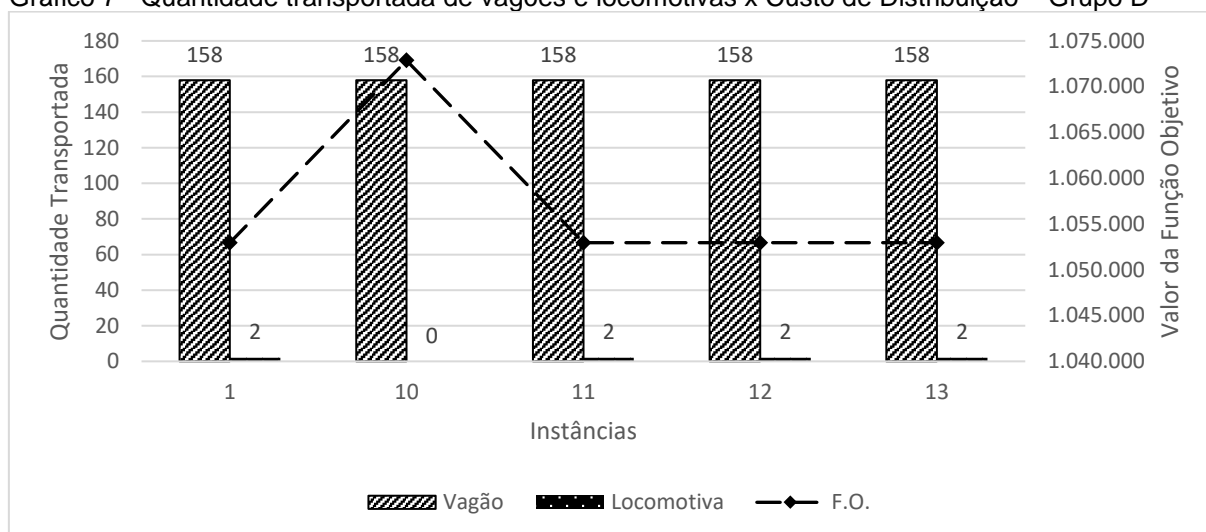
A Tabela 9 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos para este grupo de análise, comparados à Instância Padrão.

Tabela 9 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo D

Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados		Demanda Não Atendida por Locomotivas	
	Quantidade	Total de Locomotivas Transportadas	Total de Solicitações	Total de Locomotivas
1 (Padrão)	16	2	0	0
10	16	0	2	2
11	16	2	0	0
12	16	2	0	0
13	16	2	0	0

Na Instância 10, quando considerada a redução do limite máximo de locomotivas para apenas uma locomotiva em cada trem, esperava-se que somente as demandas nos próprios pátios que continham oferta de locomotivas poderiam ser atendidas. Isso porque todos os trens com folga de tração em circulação já tinham uma locomotiva tracionando os vagões no trem, ou seja, não permitindo acoplar nenhuma outra locomotiva para ser transportada para atendimento às demandas de outros pátios. Assim sendo, no Gráfico 7, observa-se que duas locomotivas não puderam ser transportadas para atender duas solicitações de pátios e, com isso, o custo total de distribuição desta instância aumentou, quando comparada à Instância Padrão.

Gráfico 7 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo D



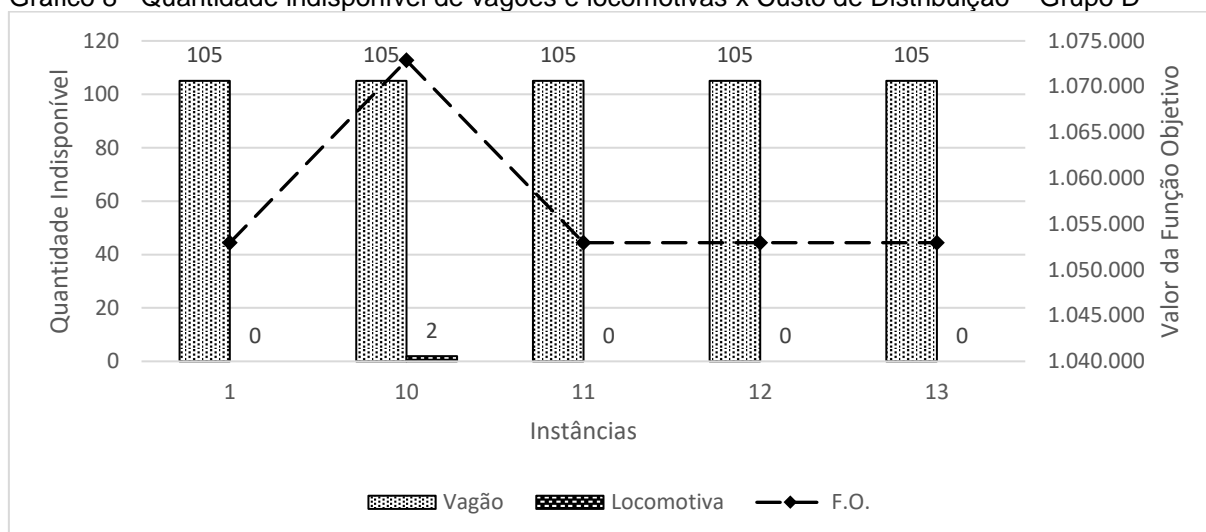
Fonte: Própria Autora.

Na Instância 11, considerou-se o limite máximo de duas locomotivas por trem, reduzindo-se assim uma locomotiva quando comparada à Instância Padrão. Quando restringido este parâmetro, não se observou nenhuma alteração na distribuição realizada anteriormente na Instância Padrão. Isto ocorre pois, na distribuição da Instância Padrão, foi rebocada apenas uma locomotiva por trem para atendimento das solicitações dos pátios. Portanto, de fato, nenhuma alteração poderia ser observada neste teste.

Da mesma forma, os testes realizados nas Instâncias 12 e 13 que consideram o aumento para quatro e cinco locomotivas, respectivamente, como o limite máximo em cada trem, também não implicou em alterações operacionais e financeiras, conforme já explicado na Instância 11.

No Gráfico 8 é apresentada a quantidade de vagões e locomotivas indisponíveis para atender às demandas dos pátios, com destaque à Instância 10, a única que resultou no não atendimento à demanda por locomotivas.

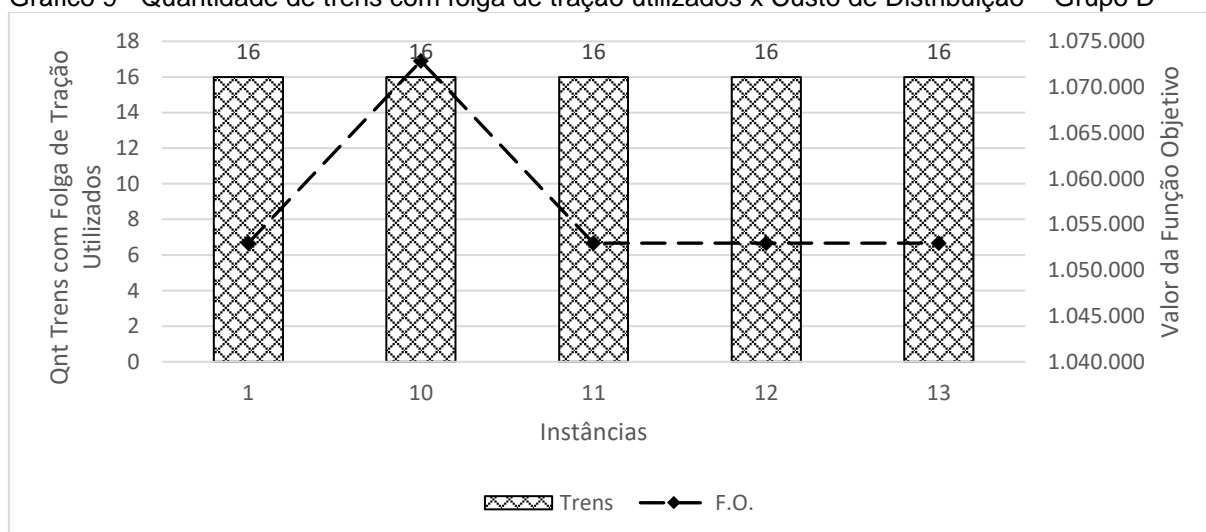
Gráfico 8 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo D



Fonte: Própria Autora.

Observa-se no Gráfico 9 que a quantidade de trens com folga de tração utilizados em todas as instâncias do grupo equivale à quantidade resultante da Instância Padrão.

Gráfico 9 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição – Grupo D



Fonte: Própria Autora.

Assim sendo, para os testes realizados nesta pesquisa, como na Instância Padrão a solução ótima do problema foi obtida considerando-se acoplar uma locomotiva por trem, o aumento no limite máximo de locomotivas em cada trem não gerou nenhum impacto no custo total de distribuição, tal como já era esperado.

5.4 ANÁLISES QUANTO À OFERTA DE VAGÕES VAZIOS NOS PÁTIOS

O Grupo E avaliou a distribuição de vagões e locomotivas quando aumentada a oferta de vagões vazios nos pátios. Conforme já explanado anteriormente, onde não havia oferta na Instância Padrão, a oferta de vagões foi mantida em zero, majorando-se apenas nos nós, pátio x tempo, que já continham alguma oferta.

As Instâncias 14 a 16 consideram o aumento da oferta de vagões vazios nos pátios em 10%, 15% e 20%, respectivamente. Vale lembrar que, para suportar este aumento de oferta nos pátios, fez-se necessário aumentar a extensão de linhas disponíveis nos pátios em 20%. A Instância 17 considera as ofertas majoradas em 20%, conforme Instância 16, contudo aumentando-se a extensão de linhas disponíveis nos pátios para 30%.

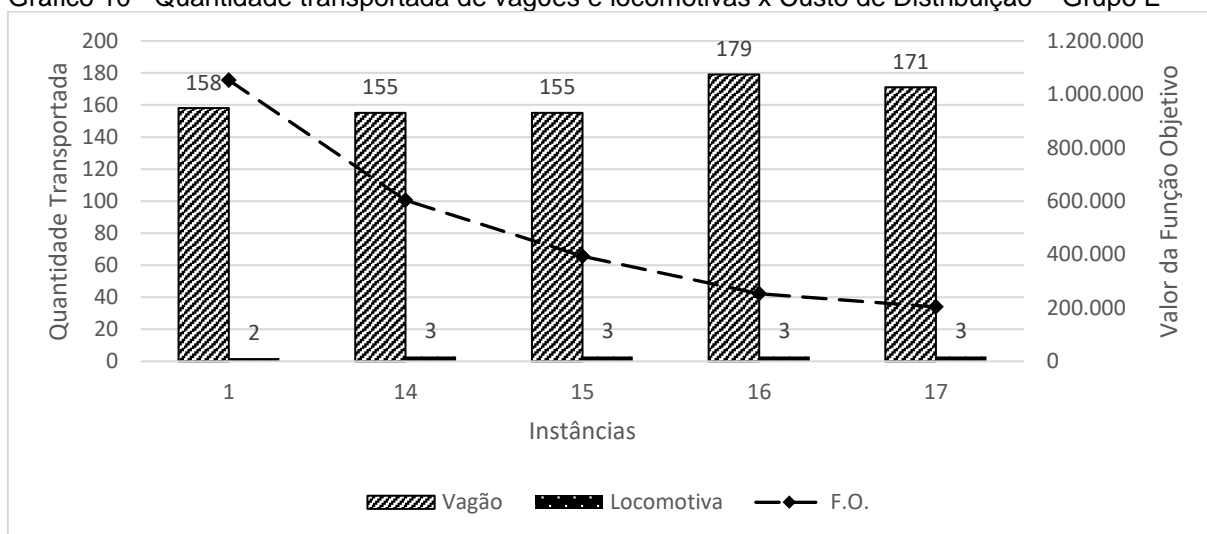
A Tabela 10 apresenta o resumo dos principais resultados obtidos para este grupo de análise, comparados à Instância Padrão.

Tabela 10 – Resumo dos resultados apresentados pelo CPLEX – Grupo E

Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados		Demanda Não Atendida por Vagões	
	Quantidade	Total de Vagões Vazios Transportados	Total de Solicitações	Total de Vagões
1 (Padrão)	16	158	7	105
14	18	160	5	60
15	20	160	3	39
16	20	179	3	24
17	21	171	3	20

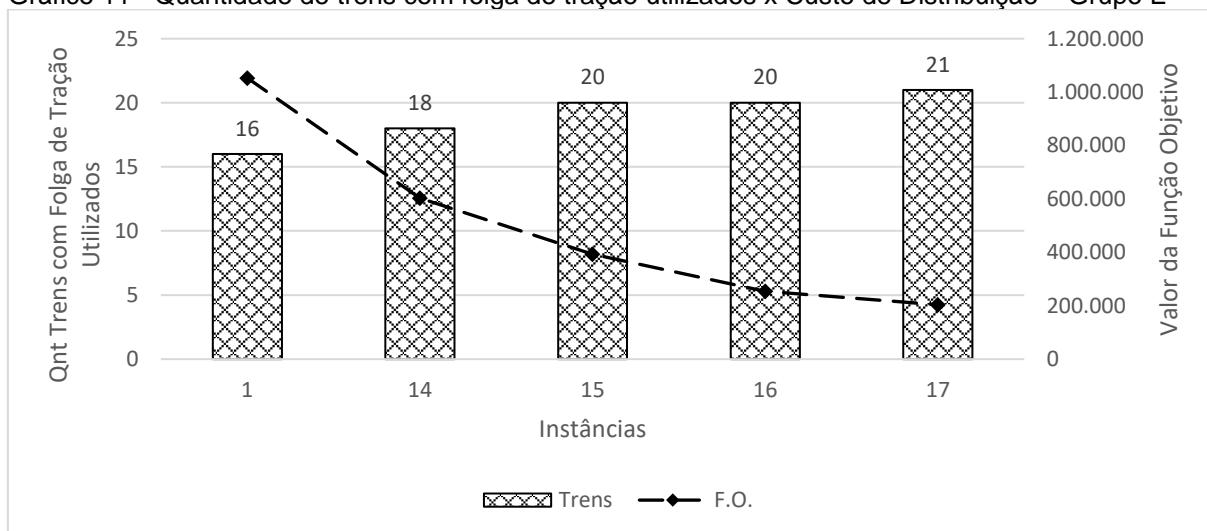
De forma geral, analisando o Gráfico 10, nota-se que, com o aumento da oferta de vagões vazios, o custo total de distribuição é reduzido, o que já era esperado, uma vez que mais vagões vazios podem ser transportados utilizando mais trens com folga na capacidade de tração (Gráfico 11) e, com isso, reduzindo a quantidade de solicitações não atendidas (Gráfico 12).

Gráfico 10 - Quantidade transportada de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo E



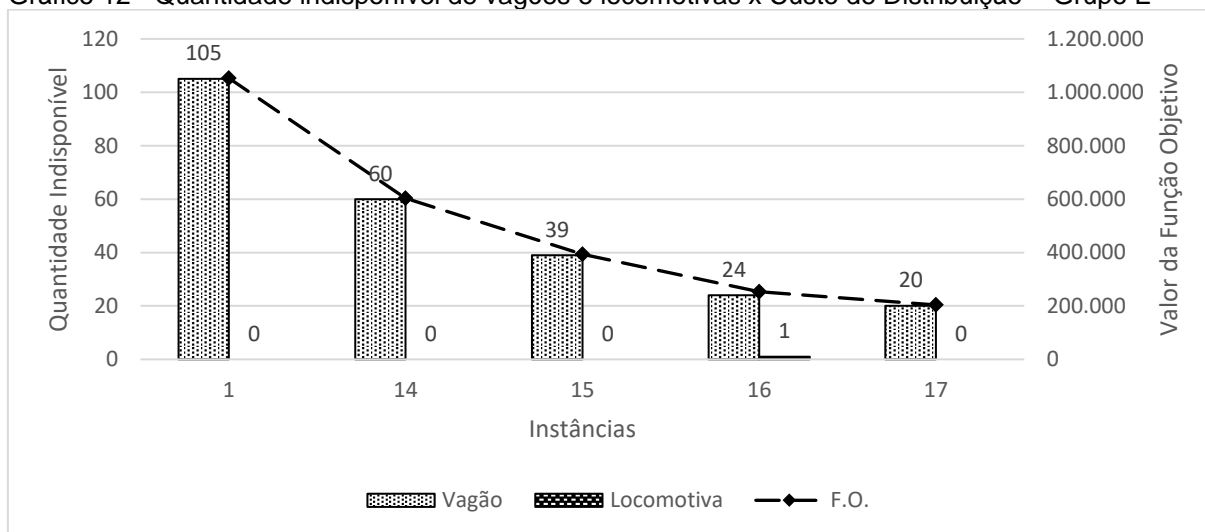
Fonte: Própria Autora.

Gráfico 11 - Quantidade de trens com folga de tração utilizados x Custo de Distribuição – Grupo E



Fonte: Própria Autora.

Gráfico 12 - Quantidade indisponível de vagões e locomotivas x Custo de Distribuição – Grupo E



Fonte: Própria Autora.

Na Instância 14, a oferta de vagões nos pátios foi majorada em 10%, o que resultou na diminuição de 105 para 60 vagões vazios indisponíveis para atendimento às demandas dos pátios, quando comparado à Instância Padrão, conseguindo atender outras duas solicitações anteriormente não atendidas pela Instância Padrão. Para isso, a quantidade de trens com folga de tração utilizada aumentou de 16 para 18 trens.

Já na Instância 15, quando a oferta de vagões vazios foi majorada em 15% baseando-se na Instância Padrão, a quantidade de vagões vazios indisponíveis de 105 diminuiu para 39, ou seja, redução de 63%, comparada à Instância Padrão. Novamente, para isso, houve aumento da quantidade de trens com folga de tração utilizados, passando de 16 para 20 trens. Com este incremento de oferta de vagões vazios, foi possível atender outras quatro solicitações anteriormente não atendidas pela Instância Padrão.

Na Instância 16, a oferta de vagões vazios foi majorada em 20% e, com isso, a quantidade de vagões vazios indisponíveis diminuiu de 105 para 24, ou seja, redução de 77%. Contudo, observou-se que a nova distribuição realizada deixou de atender uma solicitação por locomotivas de 4000hp em um pátio e tempo específicos. O modelo, portanto, encontrou a solução ótima com minimização dos custos totais, priorizando a distribuição de uma maior quantidade de vagões vazios, em detrimento do atendimento de 4000hp, referente a uma locomotiva.

Com base nas análises realizadas na Instância 16, percebeu-se que a solicitação por locomotiva não atendida ocorreu por falta de disponibilidade nas linhas dos pátios para

estacionamento de vagões e locomotivas. Por isso, na Instância 17, foram mantidas as ofertas de vagões vazios da Instância 16 e majorada em 10% a extensão de linhas disponíveis nos pátios. Com isso, observou-se que a demanda por locomotivas foi 100% atendida e, além disso, reduziu-se a quantidade de vagões vazios indisponíveis de 24, na Instância 16, para 20 vagões vazios, na Instância 17. Nota-se também que o aumento na disponibilidade dos pátios permitiu que vagões vazios e locomotivas permanecessem estacionados por mais tempo e, portanto, menos vagões vazios foram acoplados em trens com folga de tração em circulação, fato este que gerou redução no custo total de distribuição da Instância 17, comparada à Instância 16, conforme era esperado.

Pelos testes realizados no Grupo E, nota-se que o aumento na oferta de vagões vazios nos pátios permitiu que mais trens com folga de tração pudessem ser utilizados para realizar a distribuição de vagões e locomotivas, podendo assim acoplar maior quantidade de vagões vazios para atender às solicitações dos pátios. Desta forma, a quantidade de solicitações não atendidas nos pátios foi reduzida.

5.5 ANÁLISES PARA INSTÂNCIAS DE TESTE MAIORES

No Grupo F, composto das Instâncias 18 a 20, foi avaliado o comportamento operacional do modelo para instâncias maiores, permitindo assim futuras aplicações a uma ferrovia real. Tomou-se, portanto, para exemplificação dos testes, 34 pátios de formação de trens, um tipo de vagão e um tipo de locomotiva, ou seja, baseando-se na configuração da EFVM para o transporte de minério de ferro. Os horizontes de planejamento das instâncias foi de 10, 20 e 30 dias, respectivamente.

Na Instância 18, para horizonte de planejamento de 10 dias, considerando-se o planejamento diário dos recursos, a solução ótima foi encontrada com tempo de menos de 5 minutos, apresentando-se compatível com as necessidades de pronto atendimento dos centros de controle operacional, já que alterações na programação podem ocorrer e, portanto, a ferramenta poderia ser utilizada como apoio à tomada de decisão pelo distribuidor de recursos da ferrovia.

A avaliação de desempenho da Instância 19 considerou o horizonte de tempo de 20 dias. Desta forma, quando comparado à Instância 18, com aumento do horizonte de planejamento de 10 para 20 dias, considerando-se o planejamento diário dos recursos, observa-se que a solução ótima foi encontrada em aproximadamente 9 minutos.

A Instância 20 refere-se à avaliação do modelo para o horizonte de planejamento mensal, 30 dias. Nessa configuração, a solução ótima foi encontrada com aproximadamente 14 minutos. O tempo de resposta do modelo proposto apresenta-se, portanto, aderente ao planejamento mensal de uma ferrovia, o qual é realizado uma única vez antes do início do mês corrente, de forma a subsidiar o programador da ferrovia quanto à distribuição de recursos necessária para atender às solicitações dos programadores dos pátios.

Ao longo do mês de planejamento corrente, em função de novos eventos que demandem reprogramações, poderá ser utilizado o modelo proposto com horizontes de planejamento reduzidos, como aquele apresentado na Instância 18 (com menos de cinco minutos de processamento), para obtenção de resposta rápida, de forma a subsidiar novas tomadas de decisões.

5.6 ANÁLISES DO ESTUDO DE CASO EFVM – CARGA GERAL

O Grupo G refere-se à avaliação da estratégia proposta considerando os dados da EFVM no transporte de carga geral no período de 01 a 28 de Janeiro de 2017. Importante lembrar que, por questões de confidencialidade da Vale, os fornecidos foram somados a uma constante não divulgada.

Cada semana do mês de Janeiro/17 representa uma Instância do Grupo, sendo:

- Instância 21 - Semana 01 (01/01/17 a 07/01/17);
- Instância 22 - Semana 02 (08/01/17 a 14/01/17);
- Instância 23 - Semana 03 (15/01/17 a 21/01/17);
- Instância 24 - Semana 04 (22/01/17 a 28/01/17).

A Tabela 11 apresenta quantos trens com folga de tração foram utilizados e quantos trens de vagões vazios foram formados pelo CCO da Vale para distribuição de vagões

vazios e locomotivas para atendimento às demandas, comparando às quantidades de trens com folga de tração que o CPLEX utilizou e aqueles que foram criados exclusivamente de vagões vazios após ter otimizado o uso da folga de tração dos trens em circulação na ferrovia.

Tabela 11 - Comparação das instâncias reais para avaliação da estratégia proposta

Instância	Trens com Folga de Tração Utilizados		Trens de Vagões Vazios		Redução
	CCO Vale (un)	Modelo Proposto (un)	CCO Vale (un)	Modelo Proposto (un)	
21	39	39	38	35	-8%
22	38	36	47	39	-17%
23	44	32	39	31	-21%
24	38	37	37	31	-16%

Na Instância 21, referente à 1ª Semana de Janeiro/17, observa-se que o CCO utilizou a folga de tração de 39 trens carregados para distribuir vagões vazios e locomotivas nos pátios solicitantes, sendo 26 trens somente acoplando-se vagões vazios, 9 trens acoplando-se somente locomotivas rebocadas e 4 trens acoplando-se vagões vazios e locomotivas rebocadas. No modelo proposto, o CPLEX utilizou a mesma quantidade de trens com folga de tração, ou seja, 39 trens, considerando uma distribuição diferente daquele realizada pelo CCO, sendo 29 trens somente acoplando-se vagões vazios, 6 trens acoplando-se somente locomotivas rebocadas e 4 trens acoplando-se vagões vazios e locomotivas rebocadas.

Para suprir as solicitações de demandas nos pátios, além da folga de tração dos trens utilizada, o CCO necessitou criar 38 trens de vagões vazios. No modelo proposto, após analisar as variáveis de folga utilizadas, as quais indicam que as solicitações não foram atendidas nos pátios, foram introduzidos trens de vagões vazios com custos elevados (cem vezes maior). Com isso, foram utilizados 35 trens exclusivamente formados de vagões vazios para suprir a demanda não atendida pela folga de tração nos trens em circulação. Nota-se, portanto, que poderiam ser reduzidos 3 trens de vagões vazios na primeira semana de análise, correspondente a uma redução percentual de 8%.

Na Instância 22, referente à 2ª Semana de Janeiro/17, observa-se que o CCO utilizou a folga de tração de 38 trens carregados para distribuir vagões vazios e locomotivas nos pátios solicitantes, sendo 17 trens somente acoplando-se vagões vazios, 15 trens acoplando-se somente locomotivas rebocadas e 6 trens acoplando-se vagões vazios e locomotivas rebocadas. No modelo proposto, o CPLEX utilizou 36 trens com folga de tração para realizar distribuição da mesma quantidade de vagões e locomotivas, fazendo com que fossem acoplados mais vagões vazios nos trens com folga de tração, limitados à quantidade máxima de 144 vagões e cinco locomotivas por trem.

Além dos 38 trens com folga de tração utilizados, para suprir as solicitações de demandas nos pátios, o CCO necessitou criar 47 trens de vagões vazios. No modelo proposto, após analisar os pátios que não tiveram suas solicitações atendidas, a introdução de trens de vagões vazios com custos elevados fez com que o modelo utilizasse 39 trens exclusivamente formados de vagões vazios para suprir a demanda não atendida pela folga de tração nos trens em circulação. Nota-se, portanto, que poderiam ser reduzidos 8 trens de vagões vazios na segunda semana de análise, correspondente a uma redução percentual de 17%.

Na 2ª Semana de Janeiro/17, referente à Instância 23, o modelo proposto utilizou 32 trens com folga de tração para distribuir os vagões vazios e locomotivas demandas nos pátios, enquanto que o CCO utilizou a folga de tração de 44 trens carregados. Novamente, nota-se que o modelo aproveitou melhor do limite máximo de vagões e locomotivas por trem, posto que menos trens foram necessários para atender as solicitações dos programadores dos pátios.

Como ainda haviam solicitações não atendidas pela folga de tração dos trens programados, nesse período o CCO necessitou criar outros 39 trens formados exclusivamente de vagões vazios. No modelo proposto, após analisar as solicitações que não foram atendidas nos pátios, foram introduzidos trens de vagões vazios que resultaram na utilização de 31 trens exclusivamente formados de vagões vazios para suprir a demanda não atendida pela folga de tração nos trens em circulação. Nota-se, portanto, que poderiam ser reduzidos 8 trens de vagões vazios na terceira semana de análise, correspondente a uma redução percentual de 21%.

Na Instância 24, referente à 4ª Semana de Janeiro/17, sabe-se que o CCO utilizou a folga de tração de 38 trens carregados para distribuir vagões vazios e locomotivas nos

pátios solicitantes, enquanto que no modelo proposto, o CPLEX utilizou 37 trens com folga de tração para realizar distribuição dos vagões e locomotivas demandados.

Além dos 38 trens com folga de tração utilizados, para suprir as solicitações de demandas nos pátios, o CCO necessitou criar 37 trens de vagões vazios. No modelo proposto, após analisar os pátios que não tiveram suas solicitações atendidas, a introdução de trens de vagões vazios com custos elevados fez com que o modelo utilizasse 31 trens exclusivamente formados de vagões vazios para suprir a demanda não atendida pela folga de tração nos trens em circulação. Nota-se, portanto, que poderiam ser reduzidos 6 trens de vagões vazios na quarta semana de análise, correspondente a uma redução percentual de 16%.

Vale destacar que em nenhuma das instâncias analisadas no Grupo F foram utilizadas locomotivas escoteiras, nem na distribuição realizada pelo CCO da ferrovia, nem pelo modelo proposto. Isto porque, as locomotivas demandas nos pátios foram todas distribuídas sendo rebocadas em trens de vagões vazios.

Tendo analisado os resultados do Grupo F, referentes ao Estudo de Caso da EFVM para o transporte de carga geral, pode-se ver que em todas as instâncias o modelo conseguiu formar menos trens exclusivamente de vagões vazios do que a quantidade efetivamente criada pelo CCO no período em análise. Analisando todo o mês de Janeiro, o CCO Vale totalizou a formação de 161 trens de vagões vazios, sendo uma média de 6 trens de vagões vazios por dia, enquanto o modelo, após ter otimizado toda a folga de tração disponível nos trens em circulação, utilizou um total de 136 trens para atendimento às demandas de clientes no período em análise, representando uma redução global de 15,5%, a qual reflete no custo total de operação da ferrovia.

Além do custo ser inferior, por formar menos trens exclusivos de vagões vazios, a diminuição de trens na ferrovia permite liberar segmentos na via para a circulação de mais trens de vagões carregados, que são efetivamente os trens que geram receita para a ferrovia.

Vale ressaltar que distribuir vagões por meio de trens exclusivamente de vagões vazios gera um custo muito alto para a ferrovia, pois deverá ser alocada uma locomotiva e um maquinista para um trem que não gera receita. Em contrapartida, a estratégia proposta nesta pesquisa, distribui os vagões vazios e as locomotivas para

atender a demanda com um custo muito inferior, por aproveitar a folga de capacidade dos trens carregados que já circulam na malha.

Assim sendo, a estratégia de distribuição de vagões vazios e locomotivas proposta se mostrou viável e pode trazer resultados significativos para a Vale. Mais ainda, esta estratégia pode ser adotada por qualquer outra ferrovia e, para instâncias de médio porte testadas.

6 CONCLUSÕES

Foi proposto nessa dissertação, um modelo matemático que tem por objetivo minimizar o custo total da distribuição integrada de vagões e locomotivas para formação de trens, utilizando ao máximo a folga na capacidade de tração dos trens em circulação na ferrovia.

Em relação aos modelos existentes na literatura, essa pesquisa se destaca por construir um modelo matemático que integra, ao mesmo tempo, a distribuição de vagões e locomotivas para formação de trens, utiliza a folga na capacidade dos trens em circulação para realizar a distribuição de vagões e locomotivas, permite o balanceamento entre oferta e demanda por meio da utilização das variáveis de folga, considera a disponibilidade de linhas nos pátios para estacionamento de vagões e locomotivas e limita a quantidade máxima de vagões e locomotivas na formação dos trens.

Para avaliar o modelo proposto e os impactos na distribuição integrada de vagões e locomotivas, testes foram realizados considerando-se a variação dos parâmetros: extensão de linhas de pátio disponíveis para manter vagões e locomotivas estacionadas, limite máximo de vagões por trem, limite máximo de locomotivas por trem e oferta de vagões vazios nos pátios.

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 do Brasil no que tange à volume de transporte de carga.

Para realização dos testes, foi utilizado o *solver* CPLEX, o qual conseguiu resolver otimamente todas as instâncias com tempos de execução compatíveis aos horizontes de planejamento propostos.

Os grupos de análise construídos ao longo dessa dissertação mostram que o modelo matemático proposto pode ser aplicado no dia a dia de um centro de controle operacional de ferrovia, pois o mesmo pode auxiliar o distribuidor de recursos nas tomadas de decisão.

O artifício de considerar no modelo matemático as variáveis de folga de vagões e locomotivas possibilita o distribuidor de recursos da ferrovia verificar possíveis

desbalanceamentos entre oferta e demanda em um determinado pátio e em um certo horizonte de tempo, conseguindo se antecipar no planejamento da distribuição de recursos e evitar uma possível falta de recurso ao longo da ferrovia e não atender a demanda dimensionada no plano de trens.

Analisando as instâncias de teste criadas, a variação do limite máximo de locomotivas em um trem em relação à instância denominada Padrão, para fins de comparação, não gerou ganhos operacionais ou redução de custos, porém os incrementos na disponibilidade de linhas de pátio para estacionamento de vagões e locomotivas, no limite máximo de vagões em cada trem e na oferta de vagões em tempos e pátios específicos, apresentou vantagens quanto ao atendimento às demandas solicitadas.

Os testes realizados mostraram que a melhor solução foi obtida quando considerado aumento de 30% na disponibilidade de linhas de pátio para estacionamento de vagões e locomotivas, de 30% no limite máximo de vagões em cada trem e de 20% na oferta de vagões vazios nos pátios. Os testes mostraram ainda que, incrementos maiores que estes indicados de melhor solução, não implicaram em redução no custo total de distribuição.

Desta forma, os testes realizados para a validação do modelo mostram que a estratégia de distribuição proposta também pode ser adotada pelos planejadores de ferrovias para analisar a viabilidade operacional e financeira em alterações nos parâmetros considerados na criação do método. Logo, a ferramenta poderia ser utilizada para avaliar antecipadamente o impacto que seria causado, por exemplo, caso estivesse sendo analisada a possibilidade de ampliação de um pátio. Ou seja, avaliando-se como o modelo realizaria a distribuição dos recursos considerando a nova disponibilidade de linhas do pátio, garantindo assim, a aplicação de investimentos para esse fim.

Da mesma forma, a ferramenta poderia ser adotada para analisar o ganho operacional e financeiro que poderia ser obtido caso substituída as locomotivas utilizadas na ferrovia por locomotivas de maior potência, ou seja, permitindo assim acoplar maior quantidade de trens e aproveitar melhor a folga na capacidade de tração dos trens em circulação.

Pelas exemplificações apresentadas acima, associadas aos testes realizados, conclui-se que modelo proposto poderá subsidiar os planejadores e programadores

de ferrovias quanto às tomadas de decisões, que incluem os investimentos que poderão ser aplicados para melhorar o desempenho das operações ferroviárias.

Tendo analisado as instâncias baseadas em dados reais da EFVM, conclui-se que o modelo matemático proposto pode trazer benefícios para o planejamento operacional de curto prazo, ou seja, auxiliar nas tomadas de decisão do planejamento da distribuição de vagões vazios e locomotivas de diferentes tipos e em pátios distintos com intuito de equilibrar a oferta disponível e a demanda necessária para suportar o volume proposto a ser transportado refletido na formação de trens.

Em todas as instâncias do Estudo de Caso da EFVM para o transporte de carga geral, o modelo proposto utilizou menos trens formados exclusivamente de vagões vazios para distribuir vagões e locomotivas do que os efetivamente criados pelo Centro de Controle Operacional da ferrovia no período analisado, representando uma redução global de 15,5%, a qual reflete diretamente no custo de operação da ferrovia. Além do custo ser inferior, por formar menos trens exclusivos de vagões vazios, a diminuição de trens na ferrovia permite liberar segmentos na via para a circulação de mais trens de vagões carregados, que são efetivamente os trens que geram receita para a ferrovia.

Conclui-se, portanto, que o modelo matemático proposto pode ser aplicado como ferramenta de gestão e planejamento da distribuição de vagões e locomotivas em pátios ferroviários para atendimento à demanda de formação de trens em qualquer ferrovia, tanto no Brasil, quanto no mundo.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A solução apresentada pelo modelo proposto resulta na distribuição integrada de vagões e locomotivas para formação de trens na ferrovia. Para tornar o resultado do modelo proposto ainda mais próximo à realidade do âmbito ferroviário, sugere-se incorporar a equipagem. A equipagem ferroviária é constituída pelos recursos humanos diretamente responsáveis pela condução de trens, capacitados tecnicamente para o exercício desta função, classificados em maquinistas e auxiliares. A alocação destes recursos também gera impacto financeiro à ferrovia e, portanto,

sua distribuição é de grande importância à uma análise global da solução para minimização dos custos operacionais da ferrovia.

Recomenda-se ainda que seja desenvolvida uma heurística e/ou meta-heurística que busque solucionar instâncias para o planejamento operacional de médio prazo com um tempo de resposta aderente às necessidades do distribuidor de recursos do centro de controle operacional da ferrovia, principalmente para ferrovias com um grande volume de circulação de trens.

REFERÊNCIAS

AHUJA, R. K.; LIU, J.; ORLIN, J. B.; SHARMA, D.; SHUGHART, L. A. Solving real-life locomotive-scheduling problems. **Transportation Science**, Vol. 39, Nº 4, p. 503-517, 2005.

AHUJA, R. K.; SHUGHART L. A.; LIU, J. An Optimization-Based Approach for Locomotive Planning. **Innovative Scheduling**, 2006.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Evolução do transporte ferroviário de cargas**. Brasília: ANTT, 2015.

BACELAR, A.; GARCIA, A.S. An optimization approach to the locomotive scheduling problem in brazilian railways. **Proceedings of the Conference on Railway Engineering**, Melbourne Victoria, 2006.

BARROS, A. L. M. **Modelo de Otimização para Distribuição Horária de Lotes de Vagões Ferroviários GDE para Carregamento de Minério de Ferro**. Dissertação de Mestrado, UFES, 2010.

BEKTAS, T.; CRAINIC, T.G.; MORENCY, V. Improving performance of rail yards through dynamic reassignments of empty cars. **Journées de l'Optimisation**. HEC Montréal, 2007.

BOUZAIENE-AYARI, B., CHENG, C., DAS, S., FIORILLO, R., POWELL, W. B. From Single Commodity to Multiattribute Models for Locomotive Optimization: A Comparison of Optimal Integer Programming and Approximate Dynamic Programming. **Transportation Science**, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do Transporte**. Brasília: CNT, 2017.

CORDEAU, J. F.; TOTH, P.; VIGO, D. A survey of optimization models for train routing and scheduling. **Transportation Science**. Vol. 32, Nº 4, p. 380-404, 1998.

COSTA, J. C. **Algoritmo de Distribuição e Alocação Vagões em Tempo Real**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 2010.

CRAINIC, T. G.; LAPORTE, G. Planning Models for Freight Transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 97, p. 409-438, 1997.

DEJAX, P. J.; CRAINIC, T. G. A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation. **Transportation Science**, Vol. 21, Nº 4, p. 227-248, 1987.

FLORIAN, M; BUSHELL, G.; FERLAND, J.; GUERIN, G.; NASTANSKY, L. The Engine Scheduling Problem in a Railway Network, **INFOR** (14), p. 121-138, 1976.

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

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

GOHRING, K.W.; MCBRAYER, R.N.; MCGAUGHEY, R.S. Planning Locomotive and Caboose Distribution. **Rail International**, 3:p.151-158, 1973.

HAGHANI, A. E. 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, 1989.

HOLMBERG, K.; JOBORN, M.; LUNDGREN, J. T. Improved Empty Freight Car Distribution. **Transportation Science**, Vol. 32, N° 2, p. 163-173, 1998

HOLT, J.N. Locomotive scheduling by computer bashpeak. **Rail International** (4), p. 1053- 1058, 1973.

IBM. CPLEX Optimization Studio. Disponível em: <<https://www.ibm.com/br-pt/>>. Acesso em: 6 abr. 2017.

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

MAPOSA, D.; SWENE, S. D. Locomotive Scheduling in Freight Transport at Mpopoma Train Station in Bulawayo for the Southern Region, Zimbabwe. **Internacional Journal of Economics and Management Sciences**. Vol. 1, N°12, p. 104-116, 2012.

MELO, M. C. V.; BARROS NETO, J. F.; NOBRE Jr, E.F. Problema de Planejamento da Alocação de Vagões de Carga: uma Abordagem via Modelagem Matemática. **Transporte em Transformação XIII**, 2008.

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

NASCIMENTO, F.; ROSA, R. A. Mathematical Model for Planning the Locomotive Distribution to meet the demand for Trains Formation. **Revista Gestão e Produção**, arquivo aceito para publicação, no prelo, 2016.

NOBLE, H.; AL-AMIN, M.; MILLS, R. G. J. Production of locomotive rosters for a multi-class multilocomotive problem. **Journal of the Operational Research Society**, 52:1191–1200, 2001.

NOORI, S.; GHANNADPOUR, S. F. Locomotive assignment problem with train precedence using genetic algorithm. **Journal of Industrial Engineering International**, Vol. 8, N° 1, p. 1-13, 2012.

PHILIP, C.E. 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, Cambridge, MA, 1978.

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

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

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

PIU, F. A Mixed Integer Programming Approach to the Locomotive Assignment Problem. **11th Swiss Transport Research Conference**, 2011.

PIU, F.; SPERANZA, M. G. The locomotive assignment problem: a survey on optimization models. **International Transactions in Operational Research**, Vol. 21, N° 3, p. 327-352, 2014.

SCHOLZ, V. **Knowledge-based locomotive planning for the Swedish Railway**. Tech report, Swedish Institute of Computer Science (SICS), 2000.

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

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

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

VAIDYANATHAN, B.; AHUJA, R. K.; ORLIN, J. B. The Locomotive Routing Problem. **Transportation Science**. Vol. 42, p. 492-507, 2008a.

VAIDYANATHAN, B.; AHUJA, R. K.; LIU, J.; SHUGHART, L. A. Real-life locomotive planning: new formulations and computational results. **Transportation Research Part B**. 42, p. 147-168, 2008b.

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

ZIARATI, K.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M.; GÉLINAS, S.; SAINTONGE, A. Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America. **European Journal of Operational Research**, p. 281-292, 1997.

ZIARATI, K.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M. A Branch-First, Cut-Second Approach for Locomotive Assignment. **Management Science**. Vol. 45, N° 8, p. 1156–1168, 1999.

ZIARATI, K.; CHIZARI, H.; NEZHAD, A. M. Locomotive Optimization Using Artificial Intelligence Approach. **Iranian Journal of Science & Technology**. Vol. 29, p. 93-105, 2005.

APÊNDICE A

Código Visual Basic (VBA) para geração de instâncias

```
Sub botao()
```

```
UserForm1.Show
```

```
End Sub
```

```
Sub PreencheExcel()
```

```
Dim Tempos As Integer
```

```
Dim Patios As Integer
```

```
Dim parametro As Double
```

```
Dim LinhaExcel As Integer
```

```
Tempos = UserForm1.ht.Value
```

```
Patios = UserForm1.np.Value
```

```
LinhaExcel = 5
```

```
Cells(LinhaExcel, 1).Value = " // Limite de tonelada livre no trem "
```

```
Cells(LinhaExcel + 1, 1).Value = " Itt = ["
```

```
LinhaExcel = LinhaExcel + 2
```

```
LinhaExcel = MatrizNos(Tempos, Patios, UserForm1.TB_Itt.Value, LinhaExcel)
```

```
End Sub
```

```
Sub MatrizNos(Tempos As Integer, Patios As Integer, parametro As Double, parametro2 As Double,  
fso As Object, oFile As Object, tipoCalc As Integer)
```

```
Dim LinhaNo As Integer
```

```
Dim ColunaNo As Integer
```

```
Dim tempoOrigem As Integer
```

```
Dim patioOrigem As Integer
```

```
Dim tempoDestino As Integer
```

```
Dim patioDestino As Integer
```

```
Dim auxValor As Double
```

```
LinhaNo = 1
```

```
ColunaNo = 1
```

```

Dim strIndiceCol As String
For i = 1 To Patios * Tempos
    If i = 1 Then
        strIndiceCol = "/" & CStr(i)
    Else
        strIndiceCol = strIndiceCol & " " & i
    End If
Next i
oFile.WriteLine strIndiceCol

Dim Matriz() As Integer, strLinha() As String
ReDim strLinha(Tempos * Patios + 10)
ReDim Matriz(Tempos * Patios + 10, Tempos * Patios + 10)

For cont = 0 To Tempos * Patios + 10
    strLinha(cont) = ""
Next cont

For LinhaNo = 1 To Tempos * Patios
    For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios
        'Origem
        tempoOrigem = ((LinhaNo - 1) Mod Tempos) + 1
        patioOrigem = ((LinhaNo - 1) \ Tempos) + 1
        'Destino
        tempoDestino = ((ColunaNo - 1) Mod Tempos) + 1
        patioDestino = ((ColunaNo - 1) \ Tempos) + 1

        Call calcValor(tempoDestino, tempoOrigem, patioOrigem, patioDestino, parametro, parametro2,
auxValor, tipoCalc)

        If ColunaNo = 1 Then
            strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + "[" & CStr(auxValor)
        ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo < Tempos * Patios Then
            strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(auxValor) & ","
        ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo = Tempos * Patios Then
            strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(auxValor) & "]"
        Else
            strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(auxValor)
        End If
    Next ColunaNo
Next LinhaNo

```

```

Next ColunaNo
oFile.WriteLine strLinha(LinhaNo)

```

```

Next LinhaNo

```

```

End Sub

```

```

Sub calcValor(tempoDestino As Integer, tempoOrigem As Integer, patioOrigem As Integer, patioDestino
As Integer, parametro As Double, parametro2 As Double, ByRef auxValor As Double, tipoCalc)

```

```

    If tempoDestino > tempoOrigem And patioOrigem <> patioDestino Then
        Select Case tipoCalc
            Case 1
                auxValor = WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2)
            Case 2
                auxValor = WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2)
                auxValor = WorksheetFunction.MRound(auxValor, 84)
        End Select
    Else
        auxValor = 0
    End If

```

```

End Sub

```

```

Sub OfertaVagao(Tempos As Integer, Patios As Integer, Tipos As Integer, parametro As Double,
parametro2 As Double, fso As Object, oFile As Object, ByRef Matriz() As Integer)

```

```

Dim LinhaNo As Integer
Dim ColunaNo As Integer
LinhaNo = 1
ColunaNo = 1

```

```

Dim strIndiceCol As String
For i = 1 To Patios * Tempos
    If i = 1 Then
        strIndiceCol = "/" & CStr(i)
    Else
        strIndiceCol = strIndiceCol & " " & i
    End If
Next i

```

```
oFile.WriteLine strIndiceCol
```

```
'Dim Matriz() As Integer, strLinha() As String
```

```
ReDim strLinha(Tempos * Patios + 10)
```

```
ReDim Matriz(Tipos + 5, Tempos * Patios + 10)
```

```
For cont = 0 To Tempos * Patios + 10
```

```
    strLinha(cont) = ""
```

```
Next cont
```

```
For LinhaNo = 1 To Tipos
```

```
    For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios
```

```
        If WorksheetFunction.RandBetween(0, 4) > 2 And (ColunaNo - 1) Mod Tempos <> 0 Then
```

```
            Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = CInt(WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2))
```

```
        Else
```

```
            Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = 0
```

```
        End If
```

```
    If ColunaNo = 1 Then
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + "[" & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
```

```
    ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo < Tipos Then
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "],"
```

```
    ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo = Tipos Then
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "]"
```

```
    Else
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
```

```
    End If
```

```
Next ColunaNo
```

```
oFile.WriteLine strLinha(LinhaNo)
```

```
Next LinhaNo
```

```
End Sub
```

```
Sub DemandaVagao(Tempos As Integer, Patios As Integer, Tipos As Integer, parametro As Double,
parametro2 As Double, fso As Object, oFile As Object, MatrizOV() As Integer)
```

```
Dim LinhaNo As Integer
```

```
Dim ColunaNo As Integer
```

```
LinhaNo = 1
```

```
ColunaNo = 1
```

```
Dim strIndiceCol As String
```

```
For i = 1 To Patios * Tempos
```

```
    If i = 1 Then
```

```
        strIndiceCol = "/" & CStr(i)
```

```
    Else
```

```
        strIndiceCol = strIndiceCol & " " & i
```

```
    End If
```

```
Next i
```

```
oFile.WriteLine strIndiceCol
```

```
Dim Matriz() As Integer, strLinha() As String
```

```
ReDim strLinha(Tempos * Patios + 10)
```

```
ReDim Matriz(Tipos + 5, Tempos * Patios + 10)
```

```
For cont = 0 To Tempos * Patios + 10
```

```
    strLinha(cont) = ""
```

```
Next cont
```

```
For LinhaNo = 1 To Tipos
```

```
    For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios
```

```
        If MatrizOV(LinhaNo, ColunaNo) = 0 Then
```

```
            If WorksheetFunction.RandBetween(0, 4) > 1 And (ColunaNo - 1) Mod Tempos <> 0 Then
```

```
                Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = CInt(WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2))
```

```
            Else
```

```
                Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = 0
```

```
            End If
```

```
        Else
```

```
            Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = 0
```

```
        End If
```

```
    If ColunaNo = 1 Then
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + "[" & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
```

```
    ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo < Tipos Then
```

```
        strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "],"
```

```

Elseif ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo = Tipos Then
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "]"
Else
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
End If

Next ColunaNo
oFile.WriteLine strLinha(LinhaNo)

Next LinhaNo

End Sub

Sub OfertaLocomotiva(Tempos As Integer, Patios As Integer, Tipos As Integer, parametro As Double,
parametro2 As Double, fso As Object, oFile As Object, ByRef Matriz() As Integer)

Dim LinhaNo As Integer
Dim ColunaNo As Integer
LinhaNo = 1
ColunaNo = 1

Dim strIndiceCol As String
For i = 1 To Patios * Tempos
    If i = 1 Then
        strIndiceCol = "/" & CStr(i)
    Else
        strIndiceCol = strIndiceCol & " " & i
    End If
Next i
oFile.WriteLine strIndiceCol

'Dim Matriz() As Integer, strLinha() As String
ReDim strLinha(Tempos * Patios + 10)
ReDim Matriz(Tipos + 5, Tempos * Patios + 10)

For cont = 0 To Tempos * Patios + 10
    strLinha(cont) = ""
Next cont

For LinhaNo = 1 To Tipos

```

```
For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios
```

```
  If WorksheetFunction.RandBetween(0, 9) > 6 And (ColunaNo - 1) Mod Tempos <> 0 Then
```

```
    Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = CInt(WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2))
```

```
  Else
```

```
    Matriz(LinhaNo, ColunaNo) = 0
```

```
  End If
```

```
  If ColunaNo = 1 Then
```

```
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + "[" & CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
```

```
  ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo < Tipos Then
```

```
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "],"
```

```
  ElseIf ColunaNo = Tempos * Patios And LinhaNo = Tipos Then
```

```
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo)) & "]"
```

```
  Else
```

```
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Matriz(LinhaNo, ColunaNo))
```

```
  End If
```

```
Next ColunaNo
```

```
oFile.WriteLine strLinha(LinhaNo)
```

```
Next LinhaNo
```

```
End Sub
```

```
Sub DemandaLocomotiva(Tempos As Integer, Patios As Integer, Tipos As Integer, parametro As Double, parametro2 As Double, fso As Object, oFile As Object, MatrizOL() As Integer)
```

```
  Dim LinhaNo As Integer
```

```
  Dim ColunaNo As Integer
```

```
  LinhaNo = 1
```

```
  ColunaNo = 1
```

```
  Dim strIndiceCol As String
```

```
  For i = 1 To Patios * Tempos
```

```
    If i = 1 Then
```

```
      strIndiceCol = "/" & CStr(i)
```

```
    Else
```

```
      strIndiceCol = strIndiceCol & " " & i
```

```
    End If
```



```

Next i
oFile.WriteLine strIndiceCol

Dim Vetor() As Integer, strLinha() As String
ReDim strLinha(Tempos * Patios + 10)
ReDim Vetor(Tempos * Patios + 10)

For cont = 0 To Tempos * Patios + 10
    strLinha(cont) = ""
Next cont

Dim checkCol() As Integer
ReDim checkCol(Tempos * Patios)

For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios 'zera vetor checkcol
    checkCol(ColunaNo) = 0
Next ColunaNo

For ColunaNo = 1 To Tempos * Patios
    For LinhaNo = 1 To Tipos
        If MatrizOL(LinhaNo, ColunaNo) <> 0 Then 'checkcol = 1 se houver oferta em alguma linha
da coluna especificada
            checkCol(ColunaNo) = 1
        End If
    Next LinhaNo

    If checkCol(ColunaNo) = 0 And (ColunaNo - 1) Mod Tempos <> 0 Then 'Só registra valor aleatorio
se a oferta for 0
        If WorksheetFunction.RandBetween(0, 7) > 1 Then
            Vetor(ColunaNo) = CInt(WorksheetFunction.RandBetween(parametro, parametro2))
            Vetor(ColunaNo) = WorksheetFunction.MRound(Vetor(ColunaNo), 100)
        Else
            Vetor(ColunaNo) = 0
        End If
    Else
        Vetor(ColunaNo) = 0
    End If

    If ColunaNo = 1 Then

```

```
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + "[" & CStr(Vetor(ColunaNo))
Elseif ColunaNo = Tempos * Patios Then
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Vetor(ColunaNo)) & "]"
Else
    strLinha(LinhaNo) = strLinha(LinhaNo) + " " + CStr(Vetor(ColunaNo))
End If

Next ColunaNo
oFile.WriteLine strLinha(LinhaNo)

End Sub
```