

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**CAIO ALMEIDA ARÊAS REIS**

**ALOCAÇÃO EFICIENTE DE LOCOMOTIVAS NO TRANSPORTE  
FERROVIÁRIO DE CARGAS**

**Rio de Janeiro  
2018**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**CAIO ALMEIDA ARÊAS REIS**

**ALOCAÇÃO EFICIENTE DE LOCOMOTIVAS NO TRANSPORTE  
FERROVIÁRIO DE CARGAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Renata Albergaria de Mello Bandeira - D.Sc.  
Co-orientador: Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc.

**Rio de Janeiro  
2018**

c2018

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

629.04 Reis, Caio Almeida Arêas

R375a Alocação eficiente de locomotivas no transporte ferroviário de cargas / Caio Almeida Arêas Reis; orientado por Renata Albergaria de Mello Bandeira; Luiz Antônio Silveira Lopes – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2018.

94p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

1. Curso de Engenharia de Transportes – teses e dissertações. 2. Locomotivas. 3. Pesquisa operacional. I. Bandeira, Renata Albergaria de Mello. II. Lopes, Luiz Antônio Silveira. III. Instituto Militar de Engenharia. IV. Título.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

CAIO ALMEIDA ARÉAS REIS

**ALOCAÇÃO EFICIENTE DE LOCOMOTIVAS NO TRANSPORTE  
FERROVIÁRIO DE CARGAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Renata Albergaria de Mello Bandeira - D.Sc.

Co-orientador: Prof<sup>º</sup> Luiz Antônio Silveira Lopes – D.Sc.

Aprovada em 29 de novembro de 2018 pela seguinte Banca Examinadora:

*Renata A. M. Bandeira*

Prof<sup>ª</sup>. Renata Albergaria de Mello Bandeira – D. Sc. do IME – Presidente

*Luiz Antônio Silveira Lopes*

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes - D. Sc. do IME

*Orivalde Soares da Silva J.*

Prof. Orivalde Soares da Silva Júnior, D.Sc. do IME

*Fernando M A Nogueira*

Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira, D.Sc. da UFJF

Rio de Janeiro  
2018

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida e pelas diversas oportunidades proporcionadas.

Aos meus familiares, especialmente meus avós Marlene e Manon e minha mãe Liana, pelo apoio e carinho incondicionais, e por sempre acreditarem em mim.

A minha esposa Clara, pelo amor e companheirismo ao longo de todos esses anos, sempre disposta a ajudar e incentivar cada passo e cada nova conquista. Além, é claro, de contribuir tecnicamente para a confecção deste trabalho. Amo você!

A MRS Logística por apoiar e incentivar meu aprendizado e desenvolvimento. A todos os amigos do trabalho pelo apoio, orientação, ajuda e por não medirem esforços para contribuir com este trabalho.

À professora Renata pela orientação, incentivo e correções, sem os quais este trabalho não se realizaria. Ao professor Silveira Lopes pela orientação e colaboração durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores Fernando Nogueira e Orivalde Soares por aceitarem fazer parte da banca e por terem dedicado um pouco do seu tempo para contribuir com meu aprendizado e o engrandecimento deste trabalho.

A todos os professores do Instituto Militar de Engenharia pelos ensinamentos e conhecimentos passados e aos funcionários do curso, que durante esses anos, contribuíram de algum modo para o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos companheiros de turma do IME pela amizade, compartilhamento de experiências, apoio nos estudos e pela boa convivência ao longo desses três anos de curso. Em especial, ao amigo João Junqueira, por estar comigo nesta empreitada de concluir um mestrado no IME.

Aos grandes amigos que estiveram presentes durante toda minha trajetória e que contribuíram, direta ou indiretamente, para que este momento chegasse.

Muito obrigado!

*“If I have seen farther, it is by standing on  
shoulders of giants”.*

SIR ISAAC NEWTON

## Sumário

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	8
LISTA DE TABELAS .....	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	11
RESUMO .....	13
ABSTRACT .....	14
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	17
1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	19
1.3 OBJETIVO .....	21
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	21
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PROCESSO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS.....</b>	<b>23</b>
2.1 METODOLOGIA DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.2 ANÁLISE DOS ARTIGOS .....	26
2.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRABALHOS.....	29
2.2.2 TIPO DE MODELAGEM.....	31
2.2.3 FUNÇÃO OBJETIVO .....	32
2.2.4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	33
2.2.5 PRINCIPAIS RESTRIÇÕES APLICADAS.....	33
2.2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	35
<b>3 PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NA GRADE DE CARGA GERAL.....</b>	<b>38</b>
3.1 TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA GERAL.....	38
3.2 GRADE DE TRENS DE CARGA GERAL .....	40
3.3 PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO.....	43
3.3.1 SELEÇÃO DOS TRENS.....	44
3.3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NOS PÁTIOS .....	45
3.3.3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO DAS LOCOMOTIVAS .....	46

3.3.4	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS LOCOMOTIVAS E CUSTO DE COMBUSTÍVEL.....	48
3.3.5	ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NOS TRENS .....	52
3.3.6	CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	58
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NA GRADE DE CARGA GERAL .....</b>	<b>61</b>
4.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA .....	61
4.2	SELEÇÃO DOS TRENS A SEREM CONSIDERADOS .....	62
4.3	IDENTIFICAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS DISPONÍVEIS .....	64
4.4	DEFINIÇÃO DO CUSTO DE MANUTENÇÃO .....	68
4.5	CÁLCULO DO CUSTO DE COMBUSTÍVEL.....	69
4.6	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	70
4.7	CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> .....	71
4.8	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
4.9	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS.....	75
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1 Evolução do transporte de cargas via ferrovia (em milhões de TU) .....	16
FIG. 3.1 Processo de Planejamento do transporte ferroviário .....	39
FIG. 3.2 Grade de trens de Carga Geral .....	42
FIG. 3.3 Etapas do processo de alocação das locomotivas na grade de trens .....	43
FIG. 4.1 Representação da malha ferroviária.....	61
FIG. 4.2 Representatividade do volume transportado pelos trens selecionados para o modelo.....	63
FIG. 4.3 Pátios de origem e/ou destino dos trens selecionados na malha ferroviária .....	65
FIG. 4.4 Comparação da utilização das locomotivas nos cenários .....	72
FIG. 4.5 Comparação entre os custos de alocação no cenário real e o otimizado (em R\$).....	74
FIG. 4.6 Comparação entre o consumo de diesel no cenário real e o otimizado (em litros).....	74
FIG. 4.7 Comparação entre a emissão de CO <sub>2</sub> no cenário real e o otimizado (em toneladas).....	75
FIG. 4.8 Variação do custo total do transporte em função de variações no custo de combustível (em R\$) .....	76
FIG. 4.9 Variação do custo total do transporte em função de variações no custo de manutenção (em R\$).....	76
FIG. 4.10 Alocação dos grupos de locomotivas para atendimento aos trens em determinado pátio nos dias da semana.....	78
FIG. 4.11 Alocação dos grupos de locomotivas para atendimento aos trens em determinado pátio nos dias da semana com sobra de máquinas.....	79
FIG. 4.12 Comparação da utilização das locomotivas nos cenários real, otimizado e ajustado .....	81
FIG. 4.13 Comparação entre os custos de alocação no cenário real, otimizado e ajustado (em R\$).....	81
FIG. 4.14 Comparação entre o consumo de diesel no cenário real, otimizado e ajustado (em litros) .....	82

FIG. 4.15 Comparação entre a emissão de CO <sub>2</sub> no cenário real, otimizado e ajustado (em toneladas).....	83
FIG. 4.16 Comparação entre o ganho em quantidade de árvores com a redução da emissão de CO <sub>2</sub> nos cenários otimizado e ajustado (em quantidade) .....	84

## LISTA DE TABELAS

TAB 2.1 Artigos selecionados para a revisão bibliográfica.....	25
TAB 2.2 Resumo dos artigos analisados na revisão bibliográfica.....	37
TAB 3.1 Exemplo de informação dos trens selecionados .....	45
TAB 3.2 Exemplo de distribuição inicial da quantidade de locomotivas disponível por grupo e pátio .....	46
TAB 3.3 Exemplo da matriz de eficiência energética dos modelos de locomotivas por tipo de trem .....	51
TAB 3.4 Artigos selecionados para análise do método de resolução e função objetivo .....	53
TAB 3.5 Notação matemática utilizada .....	55
TAB 4.1 Informação dos trens selecionados para a otimização.....	63
TAB 4.2 Relação de origens e destinos entre os pátios considerados no modelo com os tempos de circulação, em dias, entre estes .....	66
TAB 4.3 Resumo dos grupos de locomotivas selecionados.....	67
TAB 4.4 Distribuição inicial da quantidade de locomotivas disponíveis por grupo e pátio.....	68
TAB 4.5 Custo de manutenção por trem e grupo de locomotiva (em R\$) .....	69
TAB 4.6 Custo do diesel por trem e grupo de locomotiva (em R\$) .....	70
TAB 4.7 Valores para o cálculo do fator de emissão de CO <sub>2</sub> .....	71
TAB 4.8 Grupos de locomotivas utilizados por cada um dos trens em cada dia da semana de planejamento .....	73
TAB 4.9 Comparação entre a disponibilidade inicial e a ajustada de locomotivas por grupo e pátio .....	80
TAB 4.10 Comparação dos resultados entre a alocação manual, alocação otimizada e alocação otimizada ajustada das locomotivas .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	<i>American Association Of Railroads</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional dos Transportes Terrestres
C_Manut	Custo médio de manutenção
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
Conrail	<i>Consolidated Rail Corporation</i>
CPR	<i>Canada Pacific Railway</i>
CSX	CSX Transportation
Disp_Loco	Disponibilidade de locomotivas
EE	Eficiência Energética
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
GEE	Gases de Efeito Estufa
HP	<i>Horse Power</i>
i	Pátio de origem de trens que circulam na malha ferroviária
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
j	Pátio de destino de trens que circulam na malha ferroviária
k	Modelo de locomotiva
L	Litros de diesel consumidos;
LAP	<i>Locomotive Assignment Problem</i>
LPP	<i>Locomotive Planning Problem</i>
LRP	<i>Locomotive Routing Problem</i>
MG	Minas Gerais
PO	Pesquisa Operacional
ppm	Partes por milhão
Preço_Litro	preço do litro do óleo diesel
RFFSA	Rede Ferroviária Federal
RJ	Rio de Janeiro
T	conjunto dos dias da semana

TC	tempo de ciclo entre pátios
TKB	Tonelada quilômetro bruto transportado
TKU	Toneladas por Quilômetro Útil
TU	Toneladas Úteis
USP	Universidade de São Paulo

## RESUMO

No contexto do transporte ferroviário de cargas, a alocação de locomotivas é uma operação estratégica para as empresas do setor de transporte ferroviário de cargas, em função do elevado investimento necessário para aquisição, dos diversos custos relacionados e dos impactos ambientais decorrentes de sua utilização. Logo, em um cenário de crescimento da participação do modo ferroviário na economia brasileira, um maior aprimoramento dos meios de gestão e programação, principalmente através de ferramentas que busquem otimização dos processos, torna-se cada vez mais importante quando se buscam vantagens competitivas frente aos demais concorrentes do setor de transportes.

Sendo assim, esta dissertação objetiva desenvolver um modelo de otimização do processo de alocação de locomotivas que seja aplicável num contexto real e que traga ganhos para o processo. Para isso, apresenta um procedimento para direcionar a decisão de alocação de diferentes modelos de locomotivas em diversos tipos de trens da grade de carga geral, focado na redução dos principais custos operacionais e associado a uma diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Inicialmente, é apresentada uma revisão bibliográfica sistemática sobre o tema com o intuito de se identificar, na literatura, os principais aspectos abordados, restrições consideradas, tipos de modelagem e formas de resolução do problema de alocação de locomotivas. Em seguida, o procedimento proposto é descrito passo a passo e considera o levantamento de dados operacionais e análises de locomotivas e trens. Na etapa da alocação das locomotivas, o trabalho propõe um modelo matemático que busca a minimização dos custos de combustível e manutenção.

Foi realizada a aplicação do modelo proposto em uma empresa do setor de transporte ferroviário de cargas, gerando uma redução de 10% nos custos operacionais e 7% nas emissões de CO<sub>2</sub>, quando comparado com o cenário atual praticado pela empresa. Através da análise dos resultados da aplicação realizada, foi possível constatar a consistência e aplicabilidade do procedimento proposto neste trabalho.

## ABSTRACT

Rail transportation has an important role in the Brazilian transport logistics, especially in cargo transportation. In this way, the locomotive assignment problem becomes a strategic decision for all companies in the sector due to the high investment necessary to buy one, the environmental impacts resulting from their use and all the related costs. Therefore, a scenario of increasing participation in the national economy implies an improvement of management and planning processes, mainly through optimization tools, when seeking competitive advantages over the competitors in the transport sector.

Therefore, the present work aims to develop an optimization model of the locomotive allocation process that is applicable in a real context and that brings gains to the process. For this, it proposes a locomotive assignment problem model for rail freight transport aimed at reducing transport costs and CO<sub>2</sub> emissions. Firstly, a systematic literature review is presented on the theme in order to identify in the literature the main aspects addressed, restrictions considered, types of modeling and ways of solving the locomotive allocation problem. Next, the proposed procedure is described step by step and considers the survey of operational data and analyzes of locomotives and trains. In the stage of locomotive allocation, the work proposes a mathematical model that seeks to minimize fuel costs and maintenance.

The proposed model was applied to a company in the sector, generating a 10% reduction in operational costs and a 7% reduction in CO<sub>2</sub> emissions when compared to the real scenario. Through the analysis of the results of the application, it was possible to verify the consistency and applicability of the procedure proposed in this work.

## 1 INTRODUÇÃO

O modo de transporte ferroviário consagrou-se como um veículo de transformação econômica [CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT), 2013], tendo contribuição fundamental para a economia nacional no transporte ferroviário de cargas, segundo dados do Ministério dos Transportes (2012), em seu relatório final do Projeto de reavaliação de estimativas e metas do Plano Nacional de Logística e Transportes.

A principal vantagem que o modo ferroviário oferece refere-se à sua capacidade de carregamento. Cargas de alta tonelagem são preferencialmente transportadas por ferrovias, em especial quando é necessário percorrer longas distâncias. Ainda, o modo ferroviário se destaca por seus menores custos ambientais, em decorrência da menor emissão de poluentes das locomotivas e do menor impacto ambiental na construção de infraestrutura necessária para as cargas (CNT, 2013). No que se refere ao nível de segurança do transporte, o modo ferroviário é superior em comparação ao rodoviário, já que o risco de acidentes envolvendo terceiros ou as próprias locomotivas é proporcionalmente inferior. Tal característica contribui para a redução dos custos sociais do transporte ferroviário (CNT, 2013).

Quando comparados com outros modos e em função de uma utilização mais intensiva dos recursos produtivos, o transporte ferroviário de cargas apresenta ganhos de escala como, por exemplo: (1) economias de rede – a interação entre os diferentes pontos de carga e descarga, os quais definem o padrão de rentabilidade e os retornos de escala da atividade; (2) de densidade – os custos unitários do serviço decrescem como o aumento da densidade; e (3) de escopo – pode ser mais vantajoso uma mesma empresa operar e fornecer a infraestrutura de transporte ou uma mesma operadora atender diferentes linhas ferroviárias (CNT, 2013).

Deste modo, para o modelo econômico brasileiro atual, principalmente de exportação de *commodities*, o modo ferroviário se encaixa perfeitamente, pois as principais cargas movimentadas por trem são os grãos, minério de ferro, cimento, derivados de petróleo, *containers*, produtos siderúrgicos, entre outros. No entanto, o problema consiste no fato de que a malha ferroviária brasileira não cria novos pólos de desenvolvimento socioeconômico, havendo, portanto, uma concentração das vias



férreas na ligação entre os centros econômicos das regiões centro e sul para os portos (FALCÃO, 2013).

O modo ferroviário tem uma participação relativa na matriz nacional de transporte de cerca de 25% (CNT, 2013). Contudo, conforme dados do Anuário CNT (2017), entre 2006 e 2016, o acréscimo no transporte de cargas através do modo ferroviário foi de 43,2%, em TKU (toneladas por quilômetro útil). Em 2006 foram transportados 238,3 bilhões de TKU pelas ferrovias brasileiras, enquanto, no ano de 2016, esse número chegou a 341,2 bilhões de TKU. Em relação a TU (toneladas úteis), o transporte de cargas atingiu o volume de 503,8 milhões de TU em 2016 contra 389,1 milhões de TU em 2006. A Figura 1.1 apresenta a evolução das toneladas úteis transportadas pelo setor ferroviário brasileiro.

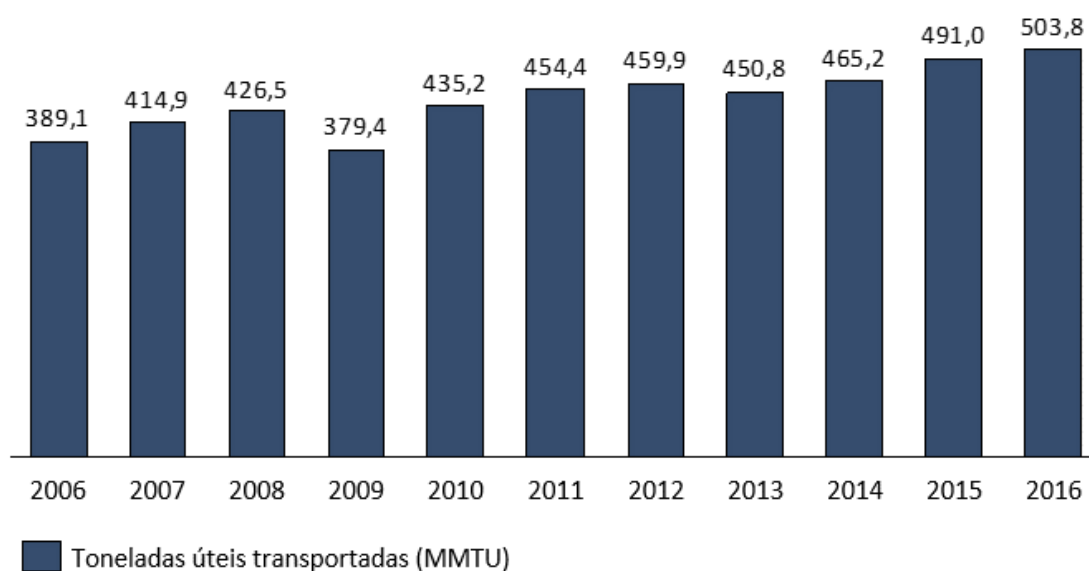


FIG. 1.1 Evolução do transporte de cargas via ferrovia (em milhões de TU)  
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Anuário CNT (2017).

Entretanto, uma gestão mais eficiente dos ativos operacionais é fundamental para que o crescimento do setor se perpetue. Ganhos na otimização de processos que se traduzam em menores custos acabam sendo refletidos na capacidade das empresas de oferecerem serviços de qualidade ao mercado, atraindo, com isso, novas cargas para transporte e gerando um diferencial competitivo em um setor tão concorrido.

Contudo, a gestão eficiente dos ativos das empresas ferroviárias não é uma tarefa simples, uma vez que está diretamente relacionada com o volume de transporte a ser realizado no período. Este, por sua vez, é influenciado por questões mercadológicas,

como cotação do dólar, preço das *commodities* nos mercados internacionais, nível da produção industrial, entre outros fatores. Sendo assim, a alocação dos recursos, principalmente vagões e locomotivas, está sujeita à variação destes fatores e precisa ser realizada cuidadosamente para que os ganhos desse processo sejam, de fato, capturados.

Neste contexto, as locomotivas devem ter um tratamento diferenciado, em função do alto valor necessário para aquisição, dos elevados custos de manutenção e de sua importância no contexto ferroviário. A eficaz alocação deste ativo em uma ferrovia influencia de forma direta nos custos operacionais, tornando uma ferrovia mais ou menos eficiente sob vários pontos de vista (CASSEMIRO, 2017). Deste modo, é fundamental que a alocação das locomotivas nos trens seja realizada da melhor forma possível. No entanto, quando se almeja uma alocação eficiente, algumas questões precisam ser solucionadas, como: (1) Como o processo de alocação de locomotivas é estudado?; (2) Quais os principais métodos de resolução?; (3) Como a alocação de locomotivas pode ser aplicada no contexto do transporte ferroviário de cargas brasileiro?; (4) O que deve ser considerado como direcionador para a alocação de locomotivas?; e (5) Quais ganhos podem ser obtidos através de uma alocação mais eficiente das locomotivas?

Diante deste cenário, a realização de um planejamento eficiente, com a alocação adequada das locomotivas em cada um dos trens, é um desafio que requer amplo planejamento das operações nos níveis estratégico, tático e operacional, configurando uma das grandes alavancas para tornar as ferrovias cada vez mais competitivas no concorrido setor de transportes (CASSEMIRO, 2017). De tal modo, é necessário o desenvolvimento de estudos que contemplem a otimização do processo de alocação de locomotivas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

De acordo com Hamacher *et al* (2005), a alta complexidade de um sistema ferroviário exige que um grande número de decisões inter-relacionadas sejam tomadas permanentemente para garantir a viabilidade da sua operação, procurando também, índices crescentes de eficiência e robustez. Como tais decisões dependem de um grande volume de informações e exigem atenção a inúmeros detalhes técnicos,

a única abordagem viável para controlar, planejar e operar uma ferrovia é dividir o problema de operação global em subproblemas menores, de dimensões, complexidades e estrutura apropriadas para serem resolvidos separadamente.

Aliado a isso, a crescente participação do setor ferroviário na economia nacional implica na necessidade de um maior aprimoramento dos meios de gestão e planejamento, de modo a contribuir com o processo de tomada de decisão das empresas, com respostas mais ágeis e eficientes.

Uma série de fatores influenciam no processo de dimensionamento da operação ferroviária, como por exemplo: formação de cada composição, definição do itinerário dos trens, características da via, frequência dos trens, tamanhos de pátios e terminais de carga e descarga, necessidades de tração, entre outros fatores. Aliado a isso, restrições operacionais como forças máximas de choques de tração, compressão na composição, restrições de velocidade, determinações de segurança, entre outras, influenciam e aumentam a complexidade do planejamento de atendimento aos volumes de transporte demandado pelos clientes para determinado período.

Além disso, a ausência de ferramentas de dimensionamento, principalmente às que busquem otimização, é uma fragilidade significativa do processo. Atualmente, essa tomada de decisão fica nas mãos dos programadores de trens, ou seja, é influenciada pela experiência e conhecimento individual de cada um deles. Na maioria das vezes, esses profissionais ficam focados em solucionar os problemas do dia-a-dia, sem conseguir observar a solução ótima para o todo. Nesse sentido, a sistematização de um processo de planejamento com um viés de produtividade é um diferencial que tem capacidade de gerar diversos ganhos para o processo como um todo.

Com uma frota bastante diversificada, as locomotivas utilizadas pelas ferrovias brasileiras possuem características distintas no que se referem capacidade de tração, consumo energético, gastos com manutenção e disponibilidade dos ativos. Aliado a isso, o elevado investimento necessário para aquisição de uma nova locomotiva para a frota torna este ativo um dos mais importantes e estratégicos para qualquer empresa do setor ferroviário.

A programação de locomotivas está entre as mais importantes atividades do processo de planejamento e programação da operação do transporte ferroviário de carga. A falta de ferramentas de planejamento e programação para suportar as

decisões desta atividade resulta na utilização ineficiente das locomotivas, um dos recursos mais caros das ferrovias (MACHADO, 2006). Dessa forma, a alocação feita da melhor forma possível torna-se uma decisão estratégica para as áreas de planejamento da operação, podendo gerar redução de custos, possibilitar melhor nível de serviço nos transportes e redução de tarifa, atraindo, com isso, mais cargas e clientes.

## 1.2 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

O processo de programação de locomotivas, segundo Ahuja *et al.* (2005), consiste em alocar um conjunto de máquinas para atender aos trens programados em um dado horizonte de tempo, garantindo o fornecimento de tração suficiente para os trens e determinando as rotas de todas as locomotivas desde a origem até o destino.

Desta forma, se faz necessário considerar o número de locomotivas existentes em cada tipo de frota, as necessidades de abastecimento e manutenções, a tração requerida para o deslocamento de cada trem entre uma origem e um destino e a capacidade de tração dos diferentes modelos de locomotivas. Em geral, o objetivo da programação é aumentar a utilização média das locomotivas e, conseqüentemente, reduzir o número total de máquinas necessárias para o transporte ferroviário (MACHADO, 2006).

Com relação aos níveis de decisão existentes no processo de alocação de locomotivas, Rouillon *et al.* (2006) e Ziarati *et al.* (1997) afirmam existir dois:

- Nível Operacional: é definido qual locomotiva deve ser alocada em cada uma das composições que circulam a partir do pátio em que esta se encontra;
- Nível Tático ou Planejamento: avalia os diferentes cenários e tipos de trens podendo definir a melhor forma de atender a demanda de locomotivas nos pátios formadores de trens, dado um determinado intervalo de tempo.

Segundo Machado (2006), o problema de alocação é encontrado tanto em nível tático quanto operacional. No nível tático, deve-se decidir qual conjunto de locomotivas será alocado a cada trem de forma geral, considerando os diversos modelos disponíveis e suas características como potência, capacidade de tração e

custos. Geralmente, é feito através de um plano mensal que considera as demandas e disponibilidades planejadas para o período.

Por sua vez, a circulação dos trens é dividida entre os trens unitários e os trens de grade. Os primeiros têm a característica de serem cíclicos, pois eles partem de determinado local e retornam ao mesmo ponto com a mesma composição, ou seja, o mesmo conjunto de vagões e locomotivas circula por todo o percurso sem necessidade de substituição. Esses trens, em geral, possuem uma lotação maior e não realizam operações de anexação e retirada de vagões ao longo de sua rota de circulação, além de não possuírem horários específicos para circulação, uma vez que tanto os terminais de carga quanto os terminais de descarga funcionam em tempo integral. O principal exemplo desse tipo de circulação é dos trens de *heavy haul*, que transportam, predominantemente, minério de ferro.

Já os trens de grade são caracterizados por terem horários predefinidos para circulação e um itinerário padrão, no qual são realizadas paradas para anexação e retirada de vagões. Os horários de chegada e partida em cada pátio, assim como os locais em que as paradas serão realizadas são definidos na grade e não sofrem alteração. Dessa forma, os trens possuem um itinerário conhecido, com paradas pré-determinadas ao longo de sua circulação. Estes trens realizam o transporte de vários tipos de carga, sendo que estas, em geral, estão alocadas em um mesmo trem.

Quanto à quantidade de tração necessária para cada trem, o cálculo é feito tomando como base o peso bruto a ser tracionado e a geografia do local, que irá exigir maior ou menor quantidade de esforço de tração de acordo com o perfil da via permanente. Para os trens unitários, como não sofrem alteração da composição ao longo do trajeto, a quantidade de locomotivas que sai da origem do trem é a suficiente para fornecer tração durante todo o trajeto. Já para os trens de grade, que podem ter suas composições modificadas durante a circulação, o esforço trator deve ser dimensionado até o pátio em que vá ocorrer uma alteração da formação do trem ou em um pátio que seja possível incluir mais tração para a composição, caso seja necessário um esforço adicional.

A existência dessas paradas dos trens de grade em determinados pátios ao longo de seu itinerário de circulação permite que seja realizada a gestão de locomotivas, ou seja, movimentação das máquinas a partir de locais em que estas não estão sendo demandadas para locais em que há necessidade da utilização destas. Tal

movimentação pode ser realizada com as locomotivas sendo rebocadas por outros trens junto com os vagões ou as locomotivas viajarem escoteiras, que é quando se forma um trem somente de locomotivas, sem vagões.

Atualmente, a alocação de locomotivas para a grade de trens de carga geral não estabelece a real necessidade de máquinas dada uma determinada quantidade de trens previstos para circularem. O dimensionamento é feito de forma *flat*, ou seja, uma quantidade de locomotivas é definida para atender todas as possibilidades de trens previstos na grade.

Contudo, dado um horizonte de planejamento diário, semanal ou mensal, por exemplo, nem sempre todos os trens serão necessários para o cumprimento do volume previsto para o período. Sendo assim, torna-se possível otimizar a alocação de locomotivas para atendimento dos trens realmente necessários, de forma a aumentar a utilização dos recursos, minimizar a quantidade de locomotivas total dedicadas ao atendimento da grade de trens e minimizar os custos do transporte ferroviário.

### 1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um modelo de otimização do processo de alocação de locomotivas para os trens da grade de carga geral com foco na redução dos custos de transporte. Além disso, objetiva-se aplicar este modelo a um caso real, trazendo ganhos para o processo, com uma alocação mais eficiente de um dos principais ativos do modo de transporte ferroviário de cargas.

### 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Considerando todos os aspectos apresentados na introdução e na justificativa, e para atender aos objetivos propostos por este trabalho, a dissertação foi dividida em cinco capítulos:

- **Capítulo 1:** trata da introdução do trabalho, apresentando o contexto da temática estudada; a justificativa, mostrando a importância e a motivação

da pesquisa; a contextualização do problema de pesquisa, seu objetivo e, por fim, a estrutura do trabalho.

- **Capítulo 2:** é apresentada uma revisão bibliográfica sistemática sobre os métodos utilizados nos problemas de alocação de locomotivas, mostrando alguns trabalhos nacionais e internacionais já realizados na área do trabalho em questão.
- **Capítulo 3:** capítulo dedicado à descrição do procedimento desenvolvido, que corresponde à alocação de locomotivas para os trens da grade de carga geral.
- **Capítulo 4:** neste capítulo, é apresentada a aplicação do procedimento proposto como forma de mostrar sua viabilidade. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos, evidenciando as diferenças das técnicas utilizadas atualmente na empresa de transporte ferroviário e os resultados apontados pelo modelo desenvolvido, analisando e comentando as diferenças encontradas entre eles.
- **Capítulo 5:** são apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho. As limitações encontradas durante o desenvolvimento do trabalho são apresentadas, bem como as recomendações necessárias para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas que foram utilizadas na elaboração desta dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO PROCESSO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos e publicados em revistas e periódicos a respeito da alocação de locomotivas. Todos os trabalhos analisados foram elaborados tendo como base técnicas de Pesquisa Operacional (PO). O objetivo desta etapa do estudo é identificar as principais características, ferramentas, similaridades e diferenças entre as técnicas e aplicações da PO para a resolução do problema de alocação de locomotivas.

Inicialmente, é feita a descrição da metodologia estabelecida para esta pesquisa bibliográfica. Em seguida, os artigos selecionados são analisados considerando-se os seguintes aspectos: tipo de modelagem matemática, função objetivo, aplicação dos modelos e principais restrições observadas. Por fim, o capítulo é concluído com a apresentação de uma tabela comparativa entre os modelos estudados.

### 2.1 METODOLOGIA DE PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica, seguiu-se o procedimento proposto por Thomé *et al.* (2014). Assim, as buscas foram realizadas nas bases de dados *Web of Science*, *Science Direct* e *Scopus*, sem delimitação de período. A busca inicial foi realizada através das seguintes palavras-chave: “(*locomotive and (assignment or distribution or logistic\* or allocation) and (problem or model\* or optimization or algorithim) and timetable*)”. Contudo, um número pequeno de artigos foi identificado. Analisando as variações de resultados com a mudança de palavras-chave, percebeu-se que a inclusão da palavra *timetable* restringia os limites de pesquisa bibliográfica. Dessa forma, uma segunda busca foi feita, porém não mais considerando a palavra *timetable* com uma palavra-chave, o que resultou em uma quantidade maior de artigos do que na primeira pesquisa. Os artigos resultantes de ambas pesquisas foram consolidados e avaliados da seguinte forma: (i) análise do título e do resumo dos trabalhos; (ii) exclusão de artigos duplicados; (iii) aplicação no transporte ferroviário de cargas; (iv) preferencialmente relacionado com *timetable*; e (v) relacionados com a alocação de locomotivas.



Como resultado das buscas, foram identificados 151 artigos inicialmente e os critérios de avaliação foram eliminando os trabalhos da seguinte forma: 43 eram relacionados com a otimização no transporte de passageiros; 79 tratavam de outros temas ferroviários que não a alocação de locomotivas; 12 não apresentavam aplicação do modelo proposto; e 2 apresentavam apenas revisões bibliográficas sobre modelos matemáticos para o problema de alocação de locomotivas. Dessa forma, 15 artigos foram selecionados e serão abordados neste trabalho, servindo como base para a revisão bibliográfica apresentada nesta etapa do estudo, conforme apresentado na Tabela 2.1.

TAB 2.1 Artigos selecionados para a revisão bibliográfica.

<b>Autor (ano)</b>	<b>Título</b>	<b>Periódico</b>
Ziarati <i>et al.</i> (1997)	Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America	European Journal of Operational Research
Ziarati, Chizari e Nezhad (2005)	Locomotive optimization using artificial intelligence approach	Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B: Engineering
Ahuja <i>et al.</i> (2005)	Solving real-life locomotive-scheduling problems	Transportation Science
Rouillon <i>et al.</i> (2006)	An extended branch-and-bound method for locomotive assignment	Transportation Research Part B
Kuo e Nicholls (2007)	A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad	Omega 35
Vaidyanathan <i>et al.</i> (2008)	The locomotive routing problem	Transportation Science
Aronsson <i>et al.</i> (2010)	An efficient MIP model for locomotive routing and scheduling	WIT Transactions on The Built Environment
Ghoseiri e Ghannadpour (2010)	A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows	Applied Soft Computing 10
Su <i>et al.</i> (2015)	Locomotive schedule optimization for da-qin heavy haul railway	Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering
Teichmann <i>et al.</i> (2015)	Locomotive assignment problem with heterogeneous vehicle fleet and hiring external locomotives	Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering
Zhang <i>et al.</i> (2015)	Graph partition based decomposition approach for large-scale railway locomotive assignment	The Open Cybernetics & Systemics Journal
Azanov <i>et al.</i> (2016)	Algorithm and software development to allocate locomotives for transportation of freight trains	Mathematical Modelling, Programming & Computer Software
Ivanov <i>et al.</i> (2016)	Stochastic optimization model of locomotive assignment to freight trains	Automation and Remote Control
Jaumard e Tian (2016)	Multi-column generation model for the locomotive assignment problem	16th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems
Xu e Li (2016)	Cooperation research for locomotives assignment and train scheduling problems	4th International Conference on Computer Science and Network Technology

## 2.2 ANÁLISE DOS ARTIGOS

Ziarati *et al.* (1997) consideram o problema de como garantir potência suficiente para tracionar os trens com planejamento de horários fixos e usando uma frota heterogênea de locomotivas. O trabalho de programação é baseado nos recursos disponíveis, na demanda solicitada e na lista de locomotivas preferenciais, baseada em critérios técnicos da própria ferrovia, para cada segmento de transporte analisado. O trabalho é modelado como um problema de rede *multicommodity* e a aplicação foi feita na Canadian National, trazendo uma melhoria de 7% em relação ao método utilizado pela empresa.

Ahuja *et al.* (2005) apresentam um estudo de caso da CSX Transportation, uma ferrovia de carga norte americana. O trabalho foca em um planejamento estratégico semanal da alocação das locomotivas em trens, tendo sido feita a estruturação como um problema de rede em espaço e tempo de *multicommodity*, em que cada modelo de locomotiva é um produto diferente. Como o problema considera a grade de horários de circulação dos trens, cada arco no fluxo de rede representa um trem e os nós representam eventos como, por exemplo, chegadas e partidas. O custo total é definido como a soma dos custos de propriedade dos ativos, custo de viagens das locomotivas sem tracionar, custo da capacidade de tração excedente, entre outros. O objetivo do modelo proposto é a redução de custos totais da alocação dos ativos. Apesar da utilização de dados reais, a formulação do problema não considera algumas restrições mapeadas, uma vez que a aplicação destas aumentaria o tamanho do problema consideravelmente a ponto de tornar a solução computacionalmente inviável. Mesmo assim, a modelagem deixou o problema grande demais para que uma solução ótima fosse encontrada, mesmo aplicando previamente um método de programação linear de relaxação. Foi proposta então uma decomposição baseada em heurística, através da utilização do software CPLEX, que possibilita soluções próximas da solução ótima.

Em 2005, Ziarati *et al.* (2005) propõem a mesma formulação de problema de rede *multicommodity* para um problema de alocação de frota heterogênea para trens cíclicos e com horários de circulação predefinidos. O principal objetivo é alocar o número suficiente de locomotivas para tracionar os trens, porém usando a menor quantidade possível de unidades disponíveis em um horizonte de planejamento semanal. O problema é resolvido por um método heurístico, através da aplicação de

algoritmos genéticos. O trabalho é aplicado novamente com dados da Canadian National.

Rouillon *et al.* (2006) consideraram que o *Locomotive Assignment Problem* (LAP) encontrado durante o planejamento das operações de uma ferrovia de carga, consiste em fornecer tração suficiente para puxar um conjunto de trens programados a um custo mínimo, satisfazendo a disponibilidade de locomotivas e de manutenção. Também é proposto avaliar diferentes métodos de ramificação que impõem múltiplas decisões sobre rotas de locomotivas em cada nó de ramificação, incluindo uma decisão que proíbe a circulação por determinadas rota.

Kuo e Nicholls (2007) apresentam um estudo de caso da Consolidated Rail Corporation (Conrail), uma ferrovia norte americana, com o objetivo de aumentar a utilização da frota de locomotivas da companhia, a qual é composta por cerca de 2.187 locomotivas. O trabalho destaca que a alocação das locomotivas é feita pelo conhecimento dos programadores, sem um método automático, o que gera uma alocação não ótima dos ativos. Os autores ressaltam ainda que uma utilização mais eficiente desses ativos tão caros pode resultar na redução do tamanho da frota, assim como melhorar o desempenho na entrega das cargas transportadas.

Vaidyanathan *et al.* (2008) elaboram um modelo para resolução do *Locomotive Routing Problem* (LRP) que considera dois principais grupos de condições para cada rota de locomotiva planejada: a primeira de que cada locomotiva deve abastecer pelo menos uma vez após determinada distância percorrida e a segunda que determina uma parada para manutenção também após certa quilometragem viajada. O problema é resolvido via programação inteira e implementado num caso real de uma ferrovia norte americana.

Aronsson *et al.* (2010) apresentam um modelo de programação inteira mista aplicado na empresa sueca Green Cargo. O algoritmo é utilizado para a resolução do problema de alocação de locomotivas de maneira exata e eficiente. O objetivo do modelo é minimizar a quantidade de locomotivas utilizadas. O trabalho ainda aborda o viés de horários de circulação dos trens e a gestão estratégica das locomotivas, respeitando tanto as necessidades dos clientes quanto os custos de utilização dos recursos pelo operador ferroviário.

Ghoseiri e Ghannadpour (2010) apresentam a utilização de um algoritmo genético para alocação de um modelo de locomotiva em um único depósito, o qual é

responsável por atender trens que possuem horários predeterminados de circulação. Caso a locomotiva esteja na origem antes do horário de necessidade do trem, uma penalidade na forma de custo é aplicada no modelo. Além disso, uma quantidade inicial de locomotivas está alocada em cada depósito e, após a aplicação do modelo proposto, obtêm-se a quantidade ótima em cada localidade.

Su *et al.* (2015) desenvolvem um modelo de otimização da alocação de múltiplos tipos de locomotivas da ferrovia chinesa Da-quin Railway. O objetivo com o modelo proposto é minimizar a quantidade de locomotivas utilizadas no transporte. Os autores conseguem converter o problema de alocação de múltiplas locomotivas em um problema mais simples a partir de regras de blocagem pré-determinadas. Um Algoritmo Húngaro é aplicado para a obtenção de um resultado exato da alocação das locomotivas na grade padrão de horários da ferrovia. Foram estudados o sistema de tração para os trens de 20 Kton e 30 Kton, onde o modelo tem capacidade de economizar cerca de 62 e 47 locomotivas, respectivamente, de um total de 356 locomotivas.

Teichmann *et al.* (2015) aplicam programação linear para resolução do problema de alocação de locomotivas no transporte ferroviário da República Checa. São considerados diferentes tipos de locomotivas próprias para alocação nos transportes, além da possibilidade de utilização de locomotivas alugadas de outros operadores/companhias para realização de determinadas circulações. O objetivo do modelo proposto é minimização dos custos totais de operação.

Zhang *et al.* (2015) resolvem o problema de alocação de locomotiva para uma malha ferroviária de larga escala, com centenas de locomotivas e mais de mil trens. A modelagem é feita por meio de uma programação inteira mista e para obtenção da solução, o problema original é decomposto por meio de uma partição gráfica e utilização de uma rede espaço-tempo em múltiplos subproblemas interconectados. A abordagem proposta pelos autores é aplicada no transporte ferroviário da China.

Azanov *et al.* (2016) sugerem um modelo matemático de alocação de locomotivas no transporte ferroviário de carga. O objetivo é minimizar o número de locomotivas utilizadas no transporte através da definição de rotas tanto para as locomotivas quanto para os trens, sendo que estes circulam em intervalos de tempo previamente definidos, e maximizar a utilização das locomotivas que já estão em uso antes de indicar a necessidade de outra. O algoritmo desenvolvido contém três estágios de

solução: o primeiro constrói uma solução básica inicial e os outros dois vão aprimorando a primeira solução até obter-se a solução ótima.

Ivanov *et al.* (2016) resolvem o problema de alocação de locomotivas para trens de carga através da programação estocástica, ou seja, inserindo o conceito de aleatoriedade para algumas variáveis e considerando a posição das locomotivas e dos trens em cada instante de tempo. Condições como uma locomotiva só pode estar associada a um trem, a circulação ocorre apenas em um único sentido e inicia-se em uma estação em um instante aleatório e a movimentação das locomotivas fora de trem é indesejável são assumidas para o desenvolvimento do modelo proposto. Um algoritmo híbrido de dois estágios é desenvolvido para a obtenção da solução ótima.

Jaumard e Tian (2016) focam na otimização do *Locomotive Assignment Problem* (LAP) de modo a satisfazer a necessidade de tração dos trens e os horários de circulação. Para tal, utilizam um modelo baseado num agrupamento do conjunto de trens que são tracionados por um mesmo grupo de locomotivas de modo a reduzir o número de trens considerados. Além disso, um algoritmo de geração de colunas é aplicado para a realização da alocação das locomotivas. O trabalho desenvolvido é aplicado com dados da Canada Pacific Railway (CPR).

Por fim, Xu e Li (2016) consideram um corredor ferroviário composto por uma via singela e dois terminais que são tanto origem quanto destino dos trens. Dois tipos de trens são considerados no estudo, um grupo classificado como *inbound* e o outro como *outbound*, que se diferenciam uns dos outros por terem origem/destino em terminais contrários. Nesse cenário, a alocação de locomotivas é feita para o par de trens, ou seja, a mesma locomotiva atende a ida e a volta de um trem. O objetivo do trabalho é alocar as locomotivas em todos os trens previstos para circular de modo a minimizar o tempo total de atraso na circulação.

## 2.2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TRABALHOS

A partir da análise dos artigos, algumas características puderam ser identificadas como sendo comuns em diversos trabalhos. Como existe um inter-relacionamento entre os artigos selecionados, ou seja, os autores usam os trabalhos uns dos outros como referência, é de se esperar que tal situação aconteça. A seguir serão apresentadas algumas destas similaridades.

No que diz respeito ao horizonte de planejamento para o qual os modelos foram desenvolvidos, autores como Rouillon *et al.* (2006) e Kuo e Nicholls (2007) utilizam uma visão de planejamento semanal para a melhor alocação das locomotivas. Já Ahuja *et al.* (2005) aplicam para um planejamento diário, com trens cíclicos que são formados pelo menos cinco vezes por semana. Jaumard e Tian (2016), por sua vez, consideram um horizonte de seis semanas na aplicação do modelo proposto na Canada Pacific Railway. Os demais autores, não definem um horizonte de planejamento, realizando a otimização da alocação a partir dos dados considerados em cada trabalho.

Em relação ao nível de planejamento em que os modelos são desenvolvidos e em que sua aplicação é esperada, os autores classificam entre estratégico, tático ou operacional. Em geral, atividades de programação de curto prazo e roteamento de locomotivas estão inseridas no nível operacional, enquanto que o planejamento da alocação trata dos níveis estratégico e tático. Sendo assim, é possível avaliar o nível de atuação de alguns dos trabalhos. Ziarati *et al.* (1997), Vaidyanathan *et al.* (2008) e Azanov *et al.* (2016) tem uma abordagem de nível operacional, atuando no roteamento dos trens segundo os horários de circulação e levando em conta a disponibilidade de recursos no momento da alocação. Enquanto isso, Ziarati *et al.* (2005), Ahuja *et al.* (2005), Aronsson *et al.* (2010) e Su *et al.* (2015) atuam em nível estratégico, na elaboração de um planejamento da alocação que considere tanto as necessidades dos clientes quanto os custos de utilização dos recursos do operador ferroviário.

Um fator que tem influência tanto na elaboração do modelo quanto em seu desempenho é a quantidade de diferentes tipos de locomotivas considerados no problema de alocação. Restrições na associação de tipos específicos para determinados trens também são fatores de influência. Nesse sentido, Ghoseiri e Ghannadpour (2010) e Xu e Li (2016) trabalham com um único modelo de locomotiva que deve ter sua alocação otimizada. Por outro lado, Teichmann *et al.* (2015) e Zhang *et al.* (2015) consideram múltiplos modelos que podem ser alocados para tracionar os trens. Dos trabalhos analisados, Ahuja *et al.* (2005) e Su *et al.* (2015) trabalham com blocagem de locomotivas de modo a simplificar a complexidade do modelo proposto. Já Jaumard e Tian (2016) realizam um agrupamento dos diferentes tipos de trens que são atendidos por um mesmo modelo de locomotiva, também com o mesmo intuito de simplificação.

Por fim, uma ferramenta utilizada por alguns autores como Ahuja *et al.* (2005), Ziarati *et al.* (2005), Su *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2015) e Azanov *et al.* (2016) é a rede espaço-tempo. Esta é aplicada como uma forma de representação gráfica das inter-relações existentes entre os trens no que diz respeito tanto a localização quanto ao intervalo de tempo necessário para deslocamento de trens e locomotivas. A partir dela, os autores exemplificam o modelo proposto e representam as possibilidades de relação para se alcançar a solução ótima.

## 2.2.2 TIPO DE MODELAGEM

Em geral, os artigos analisados apresentam a utilização de programação inteira, heurística ou até uma combinação de ambos na modelagem do problema de alocação de locomotivas. Aplicação de decomposição Dantzig-Wolfe, *branch-and-bound* e algoritmo genético são as principais ferramentas utilizadas pelos autores dos trabalhos selecionados. Algumas características específicas da modelagem elaborada em determinados artigos serão apresentadas a seguir.

Kuo e Nicholls (2007) sugerem a aplicação de programação inteira mista para solucionar o problema de alocação de locomotivas. A função objetivo é formulada com o intuito de minimizar os custos fixos, em que são considerados os gastos com a tripulação dos trens, e os custos variáveis, que por sua vez são identificados como os gastos em combustível para as locomotivas. Além disso, é levado em consideração para a resolução do problema a distribuição inicial das locomotivas e a necessidade de movimentação das máquinas fora de trem entre os pátios.

Vaidyanathan *et al.* (2008) utilizaram programação inteira para a resolução do problema. Primeiramente, o *locomotive planning problem* (LPP) foi resolvido para a obtenção da alocação das locomotivas em todos os trens. Na sequência o *locomotive routing problem* (LRP) foi obtido através da decomposição da alocação das locomotivas em problemas individuais, de acordo com cada modelo de máquina, levando as necessidades de abastecimento e manutenção em consideração para a definição das rotas de cada ativo.

Aronsson *et al.* (2010) utilizam a programação inteira mista para modelar o problema de alocação de locomotiva em larga escala para trens que possuem horários



determinados de circulação. Variações nos horários dos trens entre 15 e 90 minutos foram feitas a fim de serem avaliados diferentes resultados do modelo.

Azanov *et al.* (2016) aplica a teoria dos grafos para determinar as rotas de circulação dos trens e locomotivas entre as estações ferroviárias, utiliza a heurística para definição da solução básica inicial aproximada a ser inserida no algoritmo, o qual, por programação inteira, determina a máxima utilização das locomotivas disponíveis.

Para a resolução do problema, Ivanov *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo híbrido de dois estágios: no primeiro é feita uma otimização não ótima da alocação de cada locomotiva a um determinado trem, considerando apenas o impacto que esta solução gera em um número limitado de outras soluções; no segundo um algoritmo genético analisa as soluções propostas no primeiro estágio, o impacto destas no todo e define qual é a solução ótima.

Por fim, Xu e Li (2016) resolvem o problema proposto através de uma otimização cooperativa, que envolve a alocação de locomotivas, por meio programação inteira, e a otimização dos horários de circulação dos trens, com a utilização da heurística, como *local branching* e *relaxation induced neighborhood search*.

### 2.2.3 FUNÇÃO OBJETIVO

A classificação dos trabalhos de acordo com a função objetivo revela uma concentração da literatura em dois principais objetivos: minimização dos custos operacionais totais ou minimização da quantidade de locomotivas utilizadas no transporte. Autores como Ziarati *et al.* (1997), Ahuja *et al.* (2005), Rouillon *et al.* (2006), Kuo e Nicholls (2007), Vaidyanathan *et al.* (2008), Ghoseiri e Ghannadpour (2010) e Teichmann *et al.* (2015) buscaram a minimização dos custos operacionais totais. Já Ziarati *et al.* (2005), Aronsson *et al.* (2010), Su *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2015), Azanov *et al.* (2016) e Jaumard e Tian (2016) focaram na minimização do uso da quantidade de locomotivas.

Dois trabalhos se diferenciaram dos demais por abordarem a questão temporal na função objetivo de seus modelos. Ivanov *et al.* (2016), têm o objetivo de maximização do tempo de utilização das locomotivas no transporte enquanto que Xu e Li (2016) buscam a redução do tempo total de atraso na circulação dos trens.

## 2.2.4 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Em relação à aplicação dos modelos propostos, a maioria dos autores utilizam dados de empresas reais do transporte ferroviário, o que, de certa forma, aproxima a modelagem dos desafios e da realidade do setor. Ziarati *et al.* (1997), Ziarati *et al.* (2005) e Rouillon *et al.* (2006) desenvolveram o modelo com dados da Canadian National, Ahuja *et al.* (2005) com da CSX Transportation, Kuo e Nicholls (2007) com a Consolidated Rail Corporation (Conrail), Aronsson *et al.* (2010) com da sueca Green Cargo, Su *et al.* (2015) com da ferrovia chinesa Da-quin Railway, Azanov *et al.* (2016) com da Moscow Railway e Jaumard e Tian (2016) com da Canada Pacific Railway.

Outros três autores reportam o uso de dados reais, porém não especificam de qual empresa seriam os dados utilizados. Vaidyanathan *et al.* (2008) apresentam a aplicação do modelo desenvolvido em uma ferrovia norte-americana classe I, Zhang *et al.* (2015) reportam a aplicação no transporte ferroviário chinês, enquanto que Teichmann *et al.* (2015) aplicam na malha ferroviária da República Checa.

Por fim, Ghoseiri e Ghannadpour (2010), Ivanov *et al.* (2016) e Xu e Li (2016) não utilizam dados reais na aplicação dos modelos propostos. Estes se utilizam de dados gerados de maneira aleatória para uma exemplificação numérica dos modelos.

## 2.2.5 PRINCIPAIS RESTRIÇÕES APLICADAS

As restrições consideradas nos trabalhos analisados são, de maneira geral, similares, variando de acordo com a abordagem de cada autor. O fornecimento de tração de modo a atender a demanda de trens é a principal consideração feita, estando presente em todos os trabalhos. Alguns outros tipos de considerações, que distinguem os diversos trabalhos, serão apresentados a seguir.

Ahuja *et al.* (2005) adotam uma abordagem de divisão das restrições em dois grupos. O primeiro grupo, chamado de *hard constraints*, traz restrições que todos os trens devem cumprir: capacidade de tração, potência necessária para tracionar, alocação de acordo com lista de locomotivas preferenciais para cada tipo de trem, quantidade máxima de eixos ativos por trem, disponibilidade de locomotivas e quantidade máxima de locomotivas no trem. O segundo, chamado de *soft constraints*, traz um grupo de restrições que são desejáveis de serem cumpridas, mas nem sempre

é preciso que sejam satisfeitas, sendo que uma penalidade é introduzida para cada restrição não satisfeita. Neste grupo de restrições, Ahuja *et al.* (2005) considera o grau de estabilidade da alocação (por exemplo: se determinado trem viaja diariamente, então as locomotivas alocadas podem ser mantidas constantemente naquela formação), estabilidade das conexões trem-a-trem (por exemplo: grau de aproveitamento da chegada da locomotiva em uma estação de um trem e utilização no próximo), similaridade dos trens ao retirar a locomotiva de um e alocar em outro trem e grau de manobra ou fracionamento de composições.

Ziarati *et al.* (2005) consideram que deve ser fornecida tração suficiente para os trens, sendo que estes devem respeitar seus horários de circulação predeterminados. Além disso, a movimentação de locomotivas fora de trem não está presente no modelo proposto assim como as necessidades de manutenção. Apenas locomotivas cíclicas, ou seja, que iniciam e terminam sua circulação no mesmo pátio são consideradas na modelagem.

Por sua vez, Kuo e Nicholls (2007) aplicaram o modelo desenvolvido considerando a existência de apenas três pátios na malha ferroviária, o que não corresponde à realidade de centenas de origens e destinos dos trens. Alguns custos com a tripulação não foram considerados na função objetivo como gastos com hotéis e movimentação das equipes fora de trem, por exemplo. Variações nos horários de circulação e no peso dos trens, que poderiam gerar uma necessidade adicional de locomotivas, assim como as necessidades de manutenção também não foram considerados no modelo.

Aronsson *et al.* (2010) aplicam uma penalização de custo na função objetivo caso sejam utilizadas locomotivas adicionais para atendimento das demandas. Também são feitas restrições quanto ao tempo de ciclo (tempo entre a repetição de um mesmo tipo de viagem), ao tempo de viagem dos trens e ao tempo de *setup* para uma locomotiva atender ao próximo trem.

Já Teichmann *et al.* (2015) definem que são necessárias pelos menos duas locomotivas para cada trem e que essas locomotivas se encontram, originalmente, em depósitos, sendo movimentadas destes para os destinos. Além disso, existe um número limitado de locomotivas próprias e que caso seja necessário, locomotivas podem ser alugadas. Por fim, os autores restringem que algumas rotas devem ser atendidas por um grupo específico de locomotivas.

Azanov *et al.* (2016) definiram os conceitos de rota de trem e rota de locomotiva, além de um conjunto de rotas consideradas viáveis para a aplicação do algoritmo sendo que estas são exclusivas de um determinado trem, ou seja, dois trens não circulam pela mesma rota. Além disso, não foram considerados limites de peso para os trens nem desvios nos horários de circulação destes.

Xu e Li (2016) destacam que é possível a realização de ultrapassagem entre os trens no corredor ferroviário estudado e a circulação pode ser feita em ambos os sentidos. Além disso, em cada trem deve ser alocada somente uma locomotiva, os terminais de origem e destino estão nos extremos do corredor e as estações intermediárias tem capacidade para estocagem de três trens simultaneamente.

Restrições como capacidade tratora das locomotivas alocadas, potência mínima necessária para deslocar o trem em sua rota específica, restrições relacionadas ao peso e comprimento dos trens, quantidades máximas ou mínimas de locomotivas ou de grupos tratores por trem, disponibilidade de locomotivas de cada modelo e quantidade de eixos ativos por grupo trator estão presentes nos trabalhos de Ziarati *et al.* (1997), Rouillon *et al.* (2006), Vaidyanathan *et al.* (2008) e Jaumard e Tian (2016). Vaidyanathan *et al.* (2008) inclui ainda a necessidade de existência de locais de abastecimento e manutenção das locomotivas ao longo da rota de cada trem.

## 2.2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Em resumo, os trabalhos analisados apresentam modelos de otimização que geram ganhos para os processos estudados, apesar das simplificações existentes em cada um deles. Tais limitações estão presentes em função tanto de simplificações do contexto de cada ferrovia estudada quanto da complexidade existente na aplicação de modelos matemáticos relacionados com a otimização de processos de alocação de locomotivas. A Tabela 2.2 apresenta um resumo dos artigos selecionados para realização desta revisão.

Todos os trabalhos analisados nesta revisão bibliográfica utilizam-se de algum método para buscar a otimização da alocação de locomotivas, tomando como base dados numéricos. O capítulo a seguir propõe, de forma estruturada, um procedimento para a alocação das locomotivas na grade de carga geral de uma empresa ferroviária brasileira. Um dos diferenciais do procedimento proposto é que este não busca

resolver o problema de alocação de locomotivas totalmente através de um modelo de otimização, como verificado em alguns dos estudos apresentados na revisão bibliográfica sistemática. Em geral, essas modelagens esbarraram em altos tempos de soluções e se tornaram extremamente complicadas para o contexto de aplicação.

TAB 2.2 Resumo dos artigos analisados na revisão bibliográfica.

<b>Autor (ano)</b>	<b>Modelo de Otimização</b>	<b>Método de resolução</b>	<b>Função Objetivo</b>	<b>Aplicação</b>
Ziarati et al. (1997)	Modelo de Redes	Exata - Dantzig-Wolfe decomposition	Min Custos Operacionais Totais	Canadian National (Canadá)
Ziarati, Chizari e Nezhad (2005)	Modelo de Redes	Heurística	Min Quantidade de Locomotivas	Canadian National (Canadá)
Ahuja et al. (2005)	Modelo de Redes	Heurística	Min Custos Operacionais Totais	CSX Transportation (EUA)
Rouillon et al. (2006)	Algoritmo Branch-and-Bound	Heurística	Min Custos Operacionais Totais	Canadian National (Canadá)
Kuo e Nicholls (2007)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Custos Operacionais Totais	Consolidated Rail Corporation (EUA)
Vaidyanathan et al. (2008)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Custos Operacionais Totais	Ferrovias Norte Americana (EUA)
Aronsson et al. (2010)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Quantidade de Locomotivas	Green Cargo (Suécia)
Ghoseiri e Ghannadpour (2010)	Algoritmo Genético	Heurística	Min Custos Operacionais Totais	Aplicação Acadêmica
Su et al. (2015)	Modelo de Redes	Exata - Algoritmo Húngaro	Min Quantidade de Locomotivas	Da-quin Railway (China)
Teichmann et al. (2015)	Modelo de Redes	Exata - Programação Linear	Min Custos Operacionais Totais	Malha ferroviária da República Checa
Zhang et al. (2015)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Quantidade de Locomotivas	Transporte ferroviário chinês (China)
Azanov et al. (2016)	Modelo de Redes	Heurística e Programação Inteira	Min Quantidade de Locomotivas	Moscow Railway (Rússia)
Ivanov et al. (2016)	Algoritmo Genético	Heurística	Máx Tempo de Utilização de Locomotivas	Aplicação Acadêmica
Jaumard e Tian (2016)	Algoritmo de geração de colunas	Exata - Decomposição	Min Quantidade de Locomotivas	Canada Pacific Railway (Canadá)
Xu e Li (2016)	Modelo de Redes	Heurística e Programação Inteira	Min do Atraso Total dos Trens	Aplicação Acadêmica

### **3 PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NA GRADE DE CARGA GERAL**

O presente capítulo apresenta o procedimento de alocação das locomotivas na grade de trens de carga geral, bem como os principais conceitos envolvidos nesse processo.

#### **3.1 TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA GERAL**

O atendimento à demanda em uma empresa de logística ferroviária depende da disponibilidade de ativos, como locomotivas e vagões, quantidade de maquinistas habilitados para condução dos trens nos respectivos trechos, densidade de trens na malha ferroviária, horários de funcionamento dos terminais, tempos de carga e descarga dos clientes e ciclo dos vagões, que é definido como tempo decorrido entre a carga, trânsito carregado, descarga, e trânsito vazio até retornar ao ponto inicial (MELO, 2008). Esses fatores compõem a capacidade possível de ser transportada para cada tipo de carga, bem como determinam o modo de operação de cada um dos diversos tipos de transportes.

No que diz respeito ao dimensionamento dos transportes, diversos setores das empresas de transporte ferroviário estão envolvidos diretamente. Inicialmente, as áreas comerciais prospectam as cargas e estabelecem as premissas operacionais dos clientes, como origem e destino dos produtos, horários de funcionamento, restrições de terminais, entre outras. A partir de então, as áreas de planejamento da operação elaboram como será feito o transporte propriamente dito em termos de tipos de locomotivas e vagões a serem utilizados, qual trem a carga irá circular, tempo de ciclo, posicionamento dos vagões para carga e descarga, entre outros fatores.

Tendo sido estabelecido o volume a ser transportado, este é solicitado para o período, seja ele anual, mensal ou semanal, por exemplo, e os recursos são alocados para que este seja realizado de acordo com os parâmetros determinados no dimensionamento do transporte. Nesse momento, áreas como as de manutenção são envolvidas, uma vez que são responsáveis pela garantia da disponibilidade dos ativos ferroviários utilizados. A Figura 3.1 ilustra esse processo de planejamento.

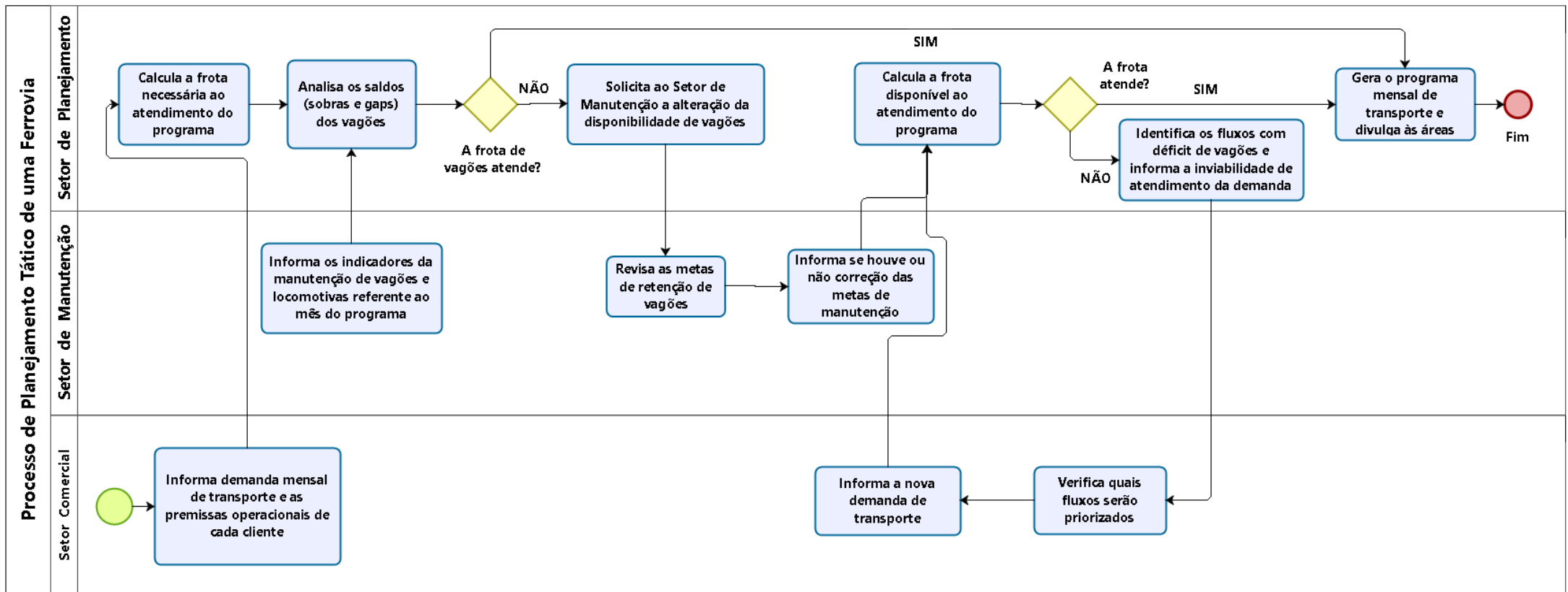


FIG. 3.1 Processo de Planejamento do transporte ferroviário

Fonte: Elaborado pelo autor utilizando o *software* Bizagi Modeler



O tipo da carga a ser transportada é um fator determinante tanto para a definição do tipo de transporte a ser realizado quanto para o modelo de trem adotado. Em geral, a divisão é feita em dois grupos: *Heavy Haul* ou Carga Geral.

Os trens de *heavy haul* iniciam sua circulação dos terminais de origem da rota a partir do momento em que os vagões estão carregados. Em sua grande maioria circulam com uma quantidade de vagões definida e são cíclicos, uma vez que partem de determinado local e retornam a este com a mesma composição, ou seja, o mesmo conjunto de vagões e locomotivas circulam juntos por todo o percurso do trem. Dessa forma, não realizam paradas para anexação e retirada de vagões ao longo de suas rotas, mantendo a mesma formação do início ao fim do transporte. Cargas como minério de ferro e carvão, por exemplo, são os produtos que se enquadram nesse tipo de transporte.

Já o transporte de carga geral tem foco na movimentação de lotes de vagões com origens e destinos diversos dentro da malha ferroviária. Através de uma combinação dos lotes de vários clientes torna-se possível atingir um tamanho da composição ferroviária que seja viável economicamente. Cargas como produtos siderúrgicos, grãos, contêineres, cimentos, agrícolas, bauxita, entre outras, são os produtos que se enquadram nesse tipo de transporte.

O transporte de carga geral é direcionado pela necessidade de redução e balanceamento entre os tempos dos diversos terminais, além da maximização do tamanho dos trens. Por se tratar de um serviço flexível quanto às variabilidades de tempos e rotas, este tipo de transporte apresenta muitas oportunidades para a gestão de vagões e locomotivas, como roteamento e movimentação e para minimizar os custos operacionais, sem perder o foco no atendimento e nível de serviço esperado pelos clientes. A movimentação dessas cargas é feita tanto em trens que circulam sem horários pré-definidos e com frequência variando conforme a demanda de transporte, quanto em trens de grade, que possuem horários de circulação e frequência previamente determinados.

### 3.2 GRADE DE TRENS DE CARGA GERAL

A grade de trens de carga geral representa a organização da circulação dos trens, uma vez que estes são caracterizados por terem horários predefinidos e um itinerário

padrão de circulação, no qual são realizadas paradas para anexação e retirada de vagões. Os horários de chegada e partida em cada pátio, assim como os locais em que as paradas serão realizadas estão presentes na grade e não sofrem alteração. Dessa forma, os trens possuem um itinerário conhecido, com paradas pré-determinadas, o que permite o transporte de vários tipos de cargas para vários clientes em um mesmo trem.

Segundo Pachi (2008), as principais funções da grade de trens são:

1. Planejar o trajeto de circulação dos trens de modo a otimizar a utilização da infraestrutura ferroviária;
2. Permitir a previsibilidade da circulação dos trens;
3. Fornecer informação dos horários dos trens para clientes e passageiros;
4. Permitir uma melhor coordenação do controle de tráfico, melhor alocação de locomotivas e vagões e melhor planejamento da tripulação dos trens.

Na elaboração da grade, diversos fatores precisam ser analisados em conjunto, uma vez que influenciam e sofrem influência das decisões tomadas a respeito dos trens. Fatores como tamanho dos trens, possibilidade de cruzamento entre trens no trecho, horários de funcionamento de terminais, tamanho dos pátios, prioridade de determinadas cargas, cadência da circulação, horário de apresentação das equipes de trens e pátios, restrições de circulação e compartilhamento de trechos com outras ferrovias são alguns dos elementos analisados para a definição dos horários de partida e chegada de cada um dos trens. Todos esses fatores são analisados de modo que a organização dos trens seja feita com o objetivo de reduzir o ciclo e a necessidade de vagões, além de aumentar a utilização dos recursos, sempre com o foco em atender à demanda solicitada.

Considerando os fatores citados, pode-se então elaborar uma grade que respeite as restrições e garanta o atendimento solicitado pelos clientes. A Figura 3.2 apresenta um exemplo de grade de trens no transporte ferroviário, na qual é possível observar a identificação do trem, seu itinerário de circulação, com os pátios por onde este irá passar, bem como os horários de chegada e partida em cada um destes pátios, tempos de permanência nos pátios e tempos de circulação entre estes.

1			KPC01				2			KCP01				3			KCR01				4			KRC01				5			KPS01			
Transit Time			33:25				Transit Time			29:30				Transit Time			31:40				Transit Time			33:40				Transit Time			24:05			
Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida					
IEF	-	-	-	16:30	FDM	-	-	-	12:00	FDM	-	-	-	22:10	FAR	-	-	-	02:50	IEF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	05:15				
FST1	00:45	00:55	17:25	18:10	FJC 2,3,7	01:30	02:00	14:00	15:30	FJC1,2,3,7	02:00	01:45	23:55	01:55	HRS1,2,7	05:45	01:20	04:10	09:55	FST1,7	00:40	00:55	06:10	06:50	FST1,7	00:40	00:55	06:10	06:50					
FSJ1	00:45	02:30	20:40	21:25	FJO	00:50	00:20	15:50	16:40	FJO	01:45	00:20	02:15	04:00	FQ2*	00:10	01:20	11:15	11:25	FSJ1	01:05	01:45	08:35	09:40	FSJ1	01:05	01:45	08:35	09:40					
FCT1,7	00:55	01:55	23:20	00:15	FOJ2	00:20	04:30	21:10	21:30	FOJ2	00:20	04:30	08:30	08:50	FBP2	00:10	02:00	13:25	13:35	FCT1	01:00	02:15	11:55	12:55	FCT1	01:00	02:15	11:55	12:55					
FRA2	00:10	00:15	00:30	00:40	FSE2,6,7	01:50	02:45	00:15	02:05	FEU1,2,7	04:40	02:20	11:10	15:50	FBN	01:15	02:55	16:30	17:45	FRA2	00:10	00:15	13:10	13:20	FRA2	00:10	00:15	13:10	13:20					
FCZ1,5	02:05	01:30	02:10	04:15	FCZ1	01:20	03:00	05:05	06:25	FBB1,7	02:15	00:30	16:20	18:35	FDT1,2,7	02:20	03:50	21:35	23:55	FCZ1,5	01:55	01:45	15:05	17:00	FCZ1,5	01:55	01:45	15:05	17:00					
FVR2	02:40	04:00	08:15	10:55	FRA2	00:10	02:00	08:25	08:35	FPU2,7	00:45	01:45	20:20	21:05	FBC	01:40	02:25	02:20	04:00	FBB1,2	01:50	02:45	19:45	21:35	FBB1,2	01:50	02:45	19:45	21:35					
FBN	00:00	05:05	16:00	16:00	FCT1	00:40	00:20	08:55	09:35	FQ2*	00:20	02:45	23:50	00:10	FPE1,2,7	02:45	03:15	07:15	10:00	FPU1,7	01:40	01:35	23:10	00:50	FPU1,7	01:40	01:35	23:10	00:50					
FDC2	00:10	02:25	18:25	18:35	FSJ1,2,3,7	01:30	02:15	11:50	13:20	HRS1,2,7	02:40	01:30	01:40	04:20	FDM	-	02:30	12:30	-	FBA	-	04:30	05:20	-	FBA	-	04:30	05:20	-					
FDM	-	07:20	01:55	-	FST1	00:45	01:50	15:10	15:55	FAR	-	01:30	05:50	-																				
					IEF	-	01:35	17:30	-																									

6			KER01				7			KRP01				8			KPE01				9			KSC01				10			KSV01			
Transit Time			32:05				Transit Time			35:35				Transit Time			61:40				Transit Time			27:10				Transit Time			06:45			
Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida	Pátio	Perm	TT	Chegada	Partida					
FBO	-	-	-	15:45	FAR	-	-	-	20:40	IEF	-	-	-	18:15	FBA	-	-	-	00:50	FBA	-	-	-	-	-	FBA	-	-	-	21:15				
FJC1,2,3,7	02:40	05:45	21:30	00:10	HRS	00:10	01:30	22:10	22:20	FST1	01:00	00:40	18:55	19:55	FOS3	00:30	00:25	01:15	01:45	FOS3	00:30	00:25	21:40	22:10	FOS3	00:30	00:25	21:40	22:10					
FJO	02:00	00:20	00:30	02:30	FQ2*	00:10	01:20	23:40	23:50	FSJ1,2	01:10	02:20	22:15	23:25	FDC2	00:10	06:55	08:40	08:50	FPU1	00:30	03:15	01:25	01:55	FPU1	00:30	03:15	01:25	01:55					
FOJ2	00:20	04:30	07:00	07:20	FPU1,2,7	01:50	02:20	02:10	04:00	FCT1,7	03:00	01:55	01:20	04:20	FDT1,7	01:30	01:30	10:20	11:50	FBB	-	02:05	04:00	-	FBB	-	02:05	04:00	-					
FEU	00:00	02:20	09:40	09:40	FVR1	01:40	01:10	05:10	06:50	FRA2	00:10	00:20	04:40	04:50	FBC1,2,7	05:00	03:40	15:30	20:30															
FBB1,7	02:10	00:30	10:10	12:20	FBB1,2,7	02:10	00:30	07:20	09:30	FCZ1,2,5	02:30	01:50	06:40	09:10	FPE1	02:30	02:30	23:00	01:30															
FVR1	00:45	00:30	12:50	13:35	FCZ1	01:00	03:10	12:40	13:40	FBB1,2,7	02:15	03:50	13:00	15:15	FDM	-	02:30	04:00	-															
FPU1,2,7	01:35	01:20	14:55	16:30	FRA2	00:15	03:35	17:15	17:30	FPU1,2,7	01:45	01:45	17:00	18:45																				
FQ2*	00:20	01:50	18:20	18:40	FCT1,7	01:20	00:40	18:10	19:30	FBJ1	01:30	01:30	20:15	21:45																				
HRS1,7	02:00	01:40	20:20	22:20	FSJ1,2,3	01:45	04:30	00:00	01:45	FDC2	00:10	04:45	02:30	02:40																				
FAR	-	01:30	23:50	-	FST1,7	02:30	02:15	04:00	06:30	FDT1,2,7	03:00	02:00	04:40	07:40																				
					IEF	-	01:45	08:15	-	FPE1,2,7	03:05	04:50	12:30	15:35																				
										FPK1,7	01:50	02:15	17:50	19:40																				
										FDM1,2,7	02:15	03:00	22:40	00:55																				
										FBO	-	07:00	07:55	-																				

Legenda: 1- Anexar/Desanexar vagões 2-Trocar Equipagem 2\*-Troca de equipagem gerenciável 3- Abastecer 4- Anexar/Desanexar Auxílio 5- Inspeccionar Composição 6- Reversão de Locomotiva 7- Anexar/Desanexar Locos 8- Aguardar faixa de subúrbio 9- Pesar Composição

FIG. 3.2 Grade de trens de Carga Geral

Fonte: Adaptado pelo autor da MRS Logística S.A.

### 3.3 PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO

Conforme apresentado no Capítulo 2, o problema de alocação de locomotivas possui uma série de abordagens de resolução apresentadas por diversos autores. Horizonte de planejamento, níveis de planejamento e variados tipos de locomotivas são alguns dos fatores que influenciam e determinam como será a aplicação dos modelos propostos. Tomando como base essas referências e o contexto de aplicação deste trabalho, a proposta é a de realização da alocação em nível operacional, com a programação das locomotivas em cada um dos trens selecionados da grade de carga geral. Essa abordagem se torna relevante no contexto operacional da ferrovia uma vez que permite um melhor aproveitamento das oportunidades na programação dos ativos, além da melhor alocação dos recursos disponíveis de acordo com a demanda de trens. A Figura 3.3 descreve cada etapa do procedimento proposto e suas relações de dependência. Nas seções seguintes, as etapas do processo são descritas de forma mais detalhada.

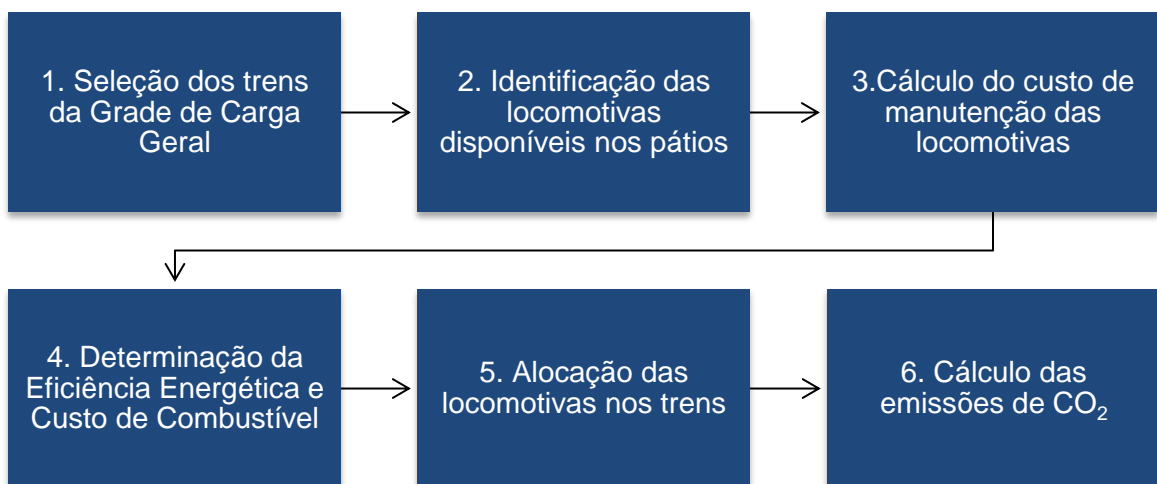


FIG. 3.3 Etapas do processo de alocação das locomotivas na grade de trens

Fonte: Elaborado pelo autor

### 3.3.1 SELEÇÃO DOS TRENS

Nessa primeira etapa do procedimento, o objetivo é identificar quais dos trens serão selecionados para a realização do estudo de alocação das locomotivas. Para tal, considera-se uma ferrovia de transporte de carga, que possui trens de carga geral com grade horária, a qual devem seguir rigorosamente, parando em diversos pátios e terminais ao longo de sua rota para anexar e retirar vagões, sendo que as paradas têm horários definidos de chegada e partida.

Outra característica importante destes trens diz respeito às rotas de circulação. Apesar de ser formado por vagões de diferentes clientes, o que implica nos vagões terem destinos diferentes, o trem possui uma rota fixa, constituída por uma origem e um destino, que nem sempre coincide com a rota de todos os vagões que estão presentes na composição. Dessa forma, as locomotivas tendem a circular respeitando a rota do trem, e não dos vagões, ou seja, estas circulam desde a origem até o destino do trem. A substituição de uma locomotiva só acontece quando há a necessidade de manutenção ou troca por avaria e, mesmo assim, por outro veículo com as mesmas características.

Outro ponto de destaque diz respeito à quantidade de trens que circulam. Em função do volume a ser transportado e dos terminais a serem atendidos, existem trens que possuem a mesma origem de circulação, mas com destinos diferentes ao longo da malha. Isso significa que de um mesmo pátio podem sair mais de um trem no mesmo dia, transportando produtos para diversos clientes. Esses fatos geram uma necessidade de decisão por parte da programação dos trens de qual locomotiva alocar em cada uma das composições que circulam entre um pátio de origem e um pátio de destino, uma vez que, em geral, existe mais de um modelo disponível e mais de um trem que requer as locomotivas.

Ainda, as locomotivas para os trens de *heavy haul*, que são sempre de um único modelo, além das alocadas para manobras de pátios e serviços gerais como transporte de materiais de manutenção e outros, que são os modelos de menor performance, não entram na escolha para os trens da grade.

A proposta do procedimento é escolher os trens da grade que irão tracionar a maior parte da carga transportada, portanto, deve-se garantir a partir de uma análise destas informações, que os principais trens receberão grupos de tração de acordo

com os critérios deste trabalho. As informações históricas que devem ser levantadas para o modelo são:

- Origem e destino do trem;
- TKB média transportada pelo trem (tonelada bruta transportada multiplicada pela quilometragem percorrida);
- Tempo de ciclo (circulação entre a origem e o destino).

Uma vez tendo sido levantados os dados para os diversos tipos de trens, estes são consolidados. A Tabela 3.1 exemplifica um resumo das informações dos trens selecionados.

TAB 3.1 Exemplo de informação dos trens selecionados

<b>Trem</b>	<b>Origem</b>	<b>Destino</b>	<b>TKB</b>	<b>Ciclo (dias)</b>
Trem 1	Pátio de Manoel Feio	Pátio de Joaquim Murtinho	1.372.000	2
Trem 2	Pátio do Barreiro	Porto do Rio de Janeiro (RJ)	1.752.000	2
Trem 3	Pátio do Brisamar	Pátio do Barbará	205.000	1
Trem 4	Pátio de Joaquim Murtinho	Porto do Rio de Janeiro (RJ)	2.338.000	2

Legenda: TKB = tonelada quilometro bruto

### 3.3.2 IDENTIFICAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NOS PÁTIOS

A segunda etapa consiste em identificar os modelos de locomotivas que estarão disponíveis em cada um dos pátios que existe demanda de trens. Esses pátios coincidem com as origens dos trens selecionados, de onde as locomotivas iniciam sua circulação no trem.

A disponibilidade da locomotiva no pátio representa que a máquina está ou estará no pátio antes da partida do trem em boas condições, ou seja, não se encontra avariada, e não está destinada a um outro atendimento, como para aos trens de *heavy haul* ou serviços de manutenção, por exemplo.

Em um contexto de programação semanal, é importante ressaltar que as locomotivas tendem a ser utilizadas mais de uma vez e em mais de um trem, desde que o tempo de ciclo seja inferior a 7 dias, e estarão disponíveis em diferentes pátios ao longo do horizonte de planejamento. Assim, uma locomotiva voltará a estar disponível para um segundo trem no pátio de destino do primeiro trem no qual esta circulou, em um período de tempo que é igual ao tempo de ciclo do primeiro trem, por exemplo.

Para a aplicação do modelo de alocação proposto, é necessário identificar a distribuição inicial dos tipos de locomotivas disponíveis no primeiro dia do horizonte de programação. Essa informação se torna um parâmetro inicial do modelo. A disponibilidade de cada tipo de locomotiva em cada um dos pátios considerados para os demais dias do horizonte de programação se torna, então, consequência das alocações feitas pelo próprio modelo. A Tabela 3.2 exemplifica a matriz de disponibilidade utilizada como parâmetro inicial das locomotivas nos pátios considerados.

TAB 3.2 Exemplo de distribuição inicial da quantidade de locomotivas disponível por grupo e pátio

Pátios	Locomotivas		
	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8
Pátio 1	3	5	2
Pátio 2	2	1	0
Pátio 3	1	3	1
Pátio 4	2	2	0

### 3.3.3 CUSTOS DE MANUTENÇÃO DAS LOCOMOTIVAS

O terceiro passo do procedimento proposto diz respeito aos custos de manutenção associados à alocação de um determinado modelo de locomotiva em um trem.

As revisões e inspeções de manutenção acontecem periodicamente nas viagens, mas existem ainda revisões trimestrais, semestrais, anuais, bianuais, trienais e revisões gerais. Em geral, a necessidade de manutenção das locomotivas se dá pela

quilometragem total percorrida, pelas horas disponíveis para utilização da operação de trens ou pela quantidade de óleo diesel consumido no período. Dessa forma, fatores como tempo de viagem e extensão das rotas percorridas pelos trens, além da disponibilidade e utilização da frota afetam diretamente na periodicidade em que as locomotivas vão as oficinas, realizam troca de peças e necessitam de manutenção.

Sendo assim, dependendo de qual trem a locomotiva será alocada, o custo deste será maior ou menor, visto que os diferentes modelos de locomotivas possuem diferentes custos de manutenção. Portanto, a decisão de direcionar locomotivas de baixo custo para trens onde os gatilhos de manutenção serão acelerados por ineficiências como altos tempos de viagem, alto consumo de óleo diesel ou grandes distâncias percorridas torna-se estratégica do ponto de vista dos custos do transporte.

Para este trabalho, propõe-se a determinação de um custo médio de manutenção ( $C_{Manut}$ ), composto pela razão entre o somatório de todos os custos, dado o fechamento de um ciclo de manutenção de uma determinada locomotiva, e o momento de manutenção deste ativo, que neste caso será a tonelada bruta transportada pelo trem multiplicada pela distância percorrida (TKB) neste período. Por exemplo, um determinado modelo possui manutenções disparadas por uma determinada TKB transportada e inspeções quinzenais, revisões trimestrais, semestrais, anuais e revisão geral bianual, fechando assim um ciclo de manutenção em dois anos. Desta forma o custo médio de manutenção é dado pelo valor gasto nestes dois anos com peças e serviços dividido por toda a TKB transportada pela locomotiva também neste mesmo período. A Equação 1 apresenta o cálculo do custo de manutenção. Como cada trem possui uma rota e um peso, é possível determinar o custo de manutenção, em R\$/TKB, associado à locomotiva alocada ao trem.

$$C_{Manut} = \frac{\text{Custo total de manutenção durante o ciclo}}{\text{TKB total tracionado durante o ciclo}} \quad (1)$$



### 3.3.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS LOCOMOTIVAS E CUSTO DE COMBUSTÍVEL

A quarta etapa do procedimento consiste na determinação da eficiência energética resultante da alocação de um determinado modelo de locomotiva a um trem, bem como do custo de combustível associado a essa alocação.

No Brasil, o óleo diesel é a principal fonte de energia do transporte ferroviário de cargas [Agência Nacional dos Transportes Terrestres (ANTT), 2012]. Atualmente, a maior parte das locomotivas possui motor diesel-elétrico, ou seja, o motor a diesel gera energia mecânica a um gerador elétrico, que por sua vez transmite energia para a tração e o funcionamento da locomotiva.

Segundo Salum (2005), a eficiência energética diz respeito a utilizar a energia de forma a obter o máximo benefício com o menor consumo, evitando os desperdícios ou o uso inadequado, sem diminuir a qualidade de vida ou produtividade. Do ponto de vista do setor ferroviário, Pereira (2009) define que o índice de eficiência energética é a equação do consumo de combustível de uma locomotiva em relação à quantidade de carga tracionada por uma determinada distância. O mesmo autor afirma que uma locomotiva apresenta bom resultado em eficiência energética caso economize no consumo de combustível e/ou aumente a carga bruta tracionada do trem. A Equação 2 apresenta uma forma de medição da eficiência energética adotada mundialmente pelas ferrovias, na qual quanto menor o número obtido, melhor é a eficiência energética da ferrovia.

$$EE = \frac{L}{Tkb} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Sendo:

EE: eficiência energética;

L: litros de diesel consumidos;

Tkb: tonelada quilômetro bruto transportado.

A partir da Equação 2, pode-se elencar diversos fatores diretos e indiretos que impactam no resultado da eficiência energética. Alguns dos indiretos são:

características geométricas da rede ferroviária, forma de condução da locomotiva, licenciamento para circulação de trens e característica dos veículos ferroviários. Já os fatores diretos correspondem à distância percorrida e ao volume transportado pela composição (CASSEMIRO e COSTA, 2015).

Segundo Hay (1982), para que o movimento da composição ferroviária possa ser realizado, forças de oposição ao movimento precisam ser superadas pelo esforço de tração das locomotivas, resultando em um elevado consumo de óleo diesel com a finalidade de fornecer força suficiente para os motores de tração. Em geral, as características geométricas da rede ferroviária são um dos principais fatores que influenciam na movimentação da composição, sendo que tais características podem ser geridas com base em projetos de novos traçados que considerem melhorias na eficiência energética. Porém, em malhas já construídas essa situação requer elevado investimento e se torna de difícil resolução nos cenários de curto e médio prazos.

Por sua vez, tanto a condução quanto o licenciamento dos trens apresentam grande impacto no consumo de combustível das ferrovias, visto que maquinistas mais experientes e com maior conhecimento do traçado a ser percorrido, aliado a um sistema de licenciamento que privilegia a circulação durante o trajeto, reduzindo a quantidade de paradas da composição, favorecem à diminuição do consumo de óleo diesel. Estes fatores necessitam de grandes esforços em planejamento operacional, bem como de sistemas de licenciamento mais eficientes e treinamento dos condutores.

Os diferentes tipos dos veículos ferroviários impactam na eficiência energética devido ao modelo das concessões ferroviárias no Brasil e também às grandes variações econômicas sofridas pelo país nas últimas décadas. Com a concessão ferroviária, foram herdadas locomotivas da antiga Rede Ferroviária Federal (RFFSA), que de maneira geral, são frotas bastante diversificadas tanto pelos veículos utilizados quanto pelo tempo de uso dos ativos. As variações econômicas sofridas pelo país impactam não somente no investimento em frotas novas, mas também na disponibilidade de veículos, que podem ser empregados de forma mais eficiente para determinados tipos de cargas e composições de trens (CASSEMIRO e COSTA, 2015).

Quanto à distância percorrida, apesar deste ser um fator direto na fórmula, o seu ganho de eficiência energética é muito restrito, visto que o transporte ferroviário é limitado ao traçado dos trilhos. De maneira geral, as distâncias percorridas da origem

dos trens aos terminais de descarga são pouco alteradas pela falta de opção de trajetos ou pela necessidade de cumprimento dos contratos firmados (CASSEMIRO e COSTA, 2015).

Por fim, o volume transportado influencia no consumo de combustíveis basicamente de duas formas: melhor aproveitamento da tração e da malha ferroviária e sazonalidade das cargas. Quanto maior for o peso específico dos carregamentos, melhor será o aproveitamento do esforço trator com menor número de trens circulando, logo o melhor aproveitamento da tração e da malha ferroviária. Em relação à sazonalidade, quanto menor a variabilidade dos produtos e, conseqüentemente, do volume transportado ao longo do ano, menor será a ociosidade do sistema ferroviário como um todo. Porém, este fator é refém dos contratos firmados com os clientes, do momento mercadológico e do intenso acompanhamento de indicadores voltados para a produção, sendo, portanto, uma variável de difícil gestão (CASSEMIRO e COSTA, 2015).

Em função disso, a elaboração de uma matriz de eficiência energética de trens não é algo simples, uma vez que envolve uma trabalhosa coleta de informações. Segundo Cassemiro (2017) existem duas formas de se medir o consumo de uma locomotiva: pelo abastecimento da bomba (consumo real), ou pelas informações do registrador de eventos (caixa preta). A primeira forma é simples quando se tem controle de abastecimento e quando a locomotiva é fixa em um único trem que não altera sua rota, não vai para oficinas e não sofre avarias. Portanto, não basta apenas o controle do abastecimento, mas também do histórico de serviços das locomotivas, pois, caso hajam desvios, distorce-se o dado de abastecimento que deixa de ser útil ao propósito de medição da eficiência energética. No segundo caso, é necessário o levantamento dos dados do registrador de eventos da locomotiva. Estes dados são contínuos e remontam todo tipo de operação praticada nas viagens da locomotiva em específico.

Uma vez tendo sido coletados os dados, deve ser realizada a elaboração da matriz de eficiência energética relacionando os diferentes tipos de trens com os diversos modelos de locomotivas disponíveis. A Tabela 3.3 apresenta um exemplo da saída desta etapa do processo, uma matriz com os valores de EE média de cada tipo de agrupamento por trem tipo em litros/1000.TKB

TAB 3.3 Exemplo da matriz de eficiência energética dos modelos de locomotivas por tipo de trem

Trem	Modelos de Locomotivas		
	A	B	C
Trem 1	2,369	2,825	3,790
Trem 2	2,526	2,921	4,436
Trem 3	2,657	2,948	4,644
Trem 4	2,845	3,015	4,966

Modelos diferentes de locomotivas vão apresentar diferentes eficiências energéticas e, por isso, podem se tornar mais ou menos interessantes para determinados trens. Assim, esse custo se torna determinante na otimização da alocação de locomotivas em trens. Analisando os diferentes modelos de locomotivas, bem como os diferentes trens, em termos de rota, distância percorrida e volume transportado, que circulam na malha ferroviária, tem-se a estimativa da eficiência energética na ferrovia por meio da Equação 3.

$$EE = \frac{L}{Tkb} \cdot 10^{-3} = \left( \frac{L_1}{Tkb_1} + \frac{L_2}{Tkb_2} + \dots + \frac{L_n}{Tkb_n} \right) \cdot 10^{-3} \quad (3)$$

Sendo:

EE: eficiência energética [L.10<sup>-3</sup>/tkb]

L: litros de diesel consumidos [L]

Tkb: distância percorrida x tonelada bruta transportada [TBxKm]

n: total de tipos de trens que circulam na malha ferroviária

Contudo, para se obter o custo do diesel associado à alocação, é necessário rearranjar a Equação 3 de modo a se obter a quantidade de litros consumidos pelo modelo de locomotiva quando alocada a um trem que percorre determinada rota (Equação 4).

$$L_{ijk} = EE_{ijk} \cdot Tkb_{ij} \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

Sendo:

EE: eficiência energética [L.10-3/tkb]

L: litros de diesel consumidos [L]

Tkb: distância percorrida x tonelada bruta transportada [TBxKm]

i: pátio de origem de trens que circulam na malha ferroviária

j: pátio de destino de trens que circulam na malha ferroviária

k: modelo de locomotiva

Portanto, a partir da utilização da Equação 4, pode-se associar a EE aos litros consumidos quando um trem circula de um pátio de origem para um pátio de destino com determinado modelo de locomotiva e, com isso, obter o gasto de combustível para a realização deste trem.

### 3.3.5 ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NOS TRENS

A quinta etapa do procedimento corresponde à alocação propriamente dita. O presente trabalho propõe, baseado nos artigos pesquisados na revisão bibliográfica, o desenvolvimento e a aplicação de um processo otimizado de alocação de locomotivas para os trens da grade de carga geral, que seja aplicável num contexto real e que traga ganhos para o processo. O modelo proposto é de fácil aplicação, após o levantamento de todas as informações necessárias.

Inicialmente, optou-se por analisar mais detalhadamente alguns dos trabalhos selecionados na revisão bibliográfica com o intuito de aprofundar tanto no método de resolução quanto nas funções objetivo e restrições aplicadas pelos autores. Dessa forma, optou-se pela resolução do problema de alocação de locomotivas através do uso de programação inteira, uma vez que este pode ser resolvido com um modelo de programação linear inteira com baixo esforço computacional. Além disso, essa forma de resolução se apresentou como sendo o principal método utilizado na literatura estudada. Caso o problema fosse de maior complexidade, com maior quantidade de variáveis, seria necessário recorrer para o uso de meta-heurísticas, método também

observado na literatura. Além disso, considerou-se a função objetivo adotada em cada um dos trabalhos. Por fim, foram selecionados os artigos que tinham aplicação em um contexto ferroviário real. A Tabela 3.4 apresenta os artigos analisados nesta etapa do estudo.

TAB 3.4 Artigos selecionados para análise do método de resolução e função objetivo

<b>Autor (ano)</b>	<b>Modelo de Otimização</b>	<b>Método de resolução</b>	<b>Função Objetivo</b>	<b>Aplicação</b>
Kuo e Nicholls (2007)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Custos Operacionais Totais	Consolidated Rail Corporation (EUA)
Vaidyanathan et al. (2008)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Custos Operacionais Totais	Ferrovias Norte Americana (EUA)
Aronsson et al. (2010)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Quantidade de Locomotivas	Green Cargo (Suécia)
Teichmann et al. (2015)	Modelo de Redes	Exata - Programação Linear	Min Custos Operacionais Totais	Malha ferroviária da República Checa
Zhang et al. (2015)	Modelo de Redes	Programação Inteira Mista	Min Quantidade de Locomotivas	Transporte ferroviário chinês (China)
Azanov et al. (2016)	Modelo de Redes	Heurística e Programação Inteira	Min Quantidade de Locomotivas	Moscow Railway (Rússia)

A partir dessa análise detalhada, o trabalho de Kuo e Nicholls (2007) se apresentou como sendo o mais próximo do contexto de alocação de locomotivas estudado. Por isso, foi utilizado como referência na elaboração da modelagem matemática. Essa maior proximidade se deu pelo fato do modelo proposto pelos autores ser aplicado em um horizonte de planejamento semanal, com foco em determinar a movimentação de locomotivas entre os pátios em cada um dos sete dias de modo a reduzir os custos do transporte.

Tais características se assemelham ao estudo proposto, uma vez que este trabalho busca otimizar a alocação das locomotivas para a grade de trens de carga geral em um horizonte de planejamento semanal, dada a demanda de trens daquela semana. O fator que direciona a alocação, similar ao proposto por Kuo e Nicholls (2007), também é a redução de custos. Porém, enquanto os autores consideram os

custos com a tripulação dos trens e combustível, este trabalho leva em consideração também o custo com combustível, mas inclui os gastos de manutenção das locomotivas como direcionadores da otimização a ser realizada. Além disso, houve a necessidade de inclusão de alguns outros fatores para este trabalho de modo a tornar o modelo proposto mais representativo à realidade das empresas ferroviárias no Brasil, como a existência de múltiplos pátios ferroviários, tempos de circulação diferentes para rotas distintas e a utilização de mais de um modelo de locomotiva para a realização do transporte. Outro diferencial da proposta é a inclusão na análise da redução dos impactos ambientais da operação de transporte por meio de uma maior eficiência na alocação das locomotivas aos trens. A seção a seguir apresenta tanto a função objetivo quanto as restrições consideradas no modelo proposto.

#### 3.3.5.1 MODELO PROPOSTO

Inicialmente, para a conceituação do modelo proposto, é necessária a apresentação da notação matemática utilizada neste trabalho, com a definição dos conjuntos, variáveis de decisão e parâmetros. A Tabela 3.5 apresenta a notação utilizada.

TAB 3.5 Notação matemática utilizada

<b>Tipo</b>	<b>Notação</b>	<b>Descrição</b>
Conjunto	$T$	conjunto dos dias da semana (índice $t$ )
Conjunto	$M$	conjunto de pátios considerados no modelo de alocação (índices $i$ e $j$ )
Conjunto	$N$	conjunto de modelos de locomotivas considerado no modelo de alocação (índice $k$ )
Variável de decisão	$X_{ijkt}$	representa a alocação para o trem que circula do pátio $i$ para o pátio $j$ com o modelo de locomotiva $k$ no dia $t$ da semana de programação
Variável de decisão	$Disp\_Loco_{ikt}$	representa a quantidade disponível no pátio $i$ do modelo de locomotivas $k$ no dia $t$ da semana de programação
Variável de decisão	$S_k$	representa o tamanho da frota do modelo de locomotivas $k$
Variável de decisão	$Chegada_{ikt}$	representa a quantidade que chega no pátio $i$ do modelo de locomotivas $k$ no dia $t$ da semana de programação
Parâmetro	$Preço\_Litro$	preço do litro do óleo diesel
Parâmetro	$C\_Manut_k$	custo histórico de manutenção do modelo de locomotiva $k$
Parâmetro	$L_{ijk}$	litros de óleo diesel consumidos pelo modelo de locomotiva $k$ quando circula do pátio $i$ para o pátio $j$
Parâmetro	$TKB_{ij}$	distância percorrida x tonelada bruta transportada pelo trem quando circula do pátio $i$ para o pátio $j$
Parâmetro	$TC_{ji}$	tempo de ciclo entre o pátio $j$ e o pátio $i$
Parâmetro	$Demanda_{ijt}$	demanda de circulação de trens do pátio $i$ para o pátio $j$ no dia $t$ da semana de programação
Parâmetro	$G_{ikt}$	locomotivas que chegam no pátio $i$ do modelo $k$ no dia $t$ da semana de programação

Uma vez tendo sido apresentados todos os elementos, é possível definir a função objetivo do modelo proposto. Esta é formulada a partir da junção da Equação 1, que define os custos de manutenção envolvidos na utilização das locomotivas no transporte, com a Equação 4, que, por sua vez, converte a eficiência energética de cada modelo de locomotiva nos litros de óleo diesel consumidos quando alocada em



um trem que percorre determinada rota de um pátio de origem para um pátio de destino. A Expressão 5 define a função objetivo para os conjuntos considerados na otimização.

$$\text{Minimizar} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M \sum_{k=1}^N (C\_Manut_k \cdot TKB_{ij} + L_{ijk} \cdot Preço\_Litro) \cdot X_{ijkt} \quad (5)$$

A função objetivo (5) apresenta a minimização dos custos de manutenção e combustível, considerando o custo médio de manutenção de cada modelo de locomotiva  $k$  ( $C\_Manut_k$ ), em R\$/TKB, multiplicado pela distância percorrida x tonelada bruta ( $TKB_{ij}$ ) do trem que circula do pátio de origem  $i$  para o pátio de destino  $j$ , sendo que  $i$  é diferente de  $j$ , além dos litros de diesel consumidos ( $L_{ijk}$ ) pelo trem que circula do pátio de origem  $i$  para o pátio de destino  $j$  com o modelo de locomotiva  $k$ , em R\$/litro, vezes o preço do litro. Somados os custos, este é contabilizado caso seja feita a alocação do modelo de locomotiva  $k$ , no trem que circula de  $i$  para  $j$  no dia  $t$  da semana.

No que se referem às restrições necessárias para a realização da otimização da alocação, uma série de condições precisam ser satisfeitas de modo a assegurar a integridade matemática do modelo. Situações como a quantidade de locomotivas por modelo que estão disponíveis para serem movimentadas em cada um dos dias da semana, bem como quando estas locomotivas voltam a ser utilizadas são exemplos do contexto desta alocação. Todas as expressões utilizadas como restrições do modelo são apresentadas a seguir.

$$\sum_{k=1}^N X_{ijkt} \geq Demanda_{ijt} \quad , \quad \forall t \in T, \forall i \in M, \forall j \in M, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M X_{ijkt} \leq \sum_{i=1}^M Disp\_Loco_{ikt} \quad , \quad \forall t \in T, \forall k \in N \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^M Disp\_Loco_{ikt} \leq S_k, \quad \forall t \in T, \forall k \in N \quad (8)$$

$$Disp\_Loco_{ikt} + Chegada_{ikt} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M X_{ijkt} = Disp\_Loco_{ikt+1}, \quad \begin{matrix} \forall t \in T, \forall i \\ \in M, \forall k \in N \end{matrix} \quad (9)$$

$$Chegada_{ikt} = G_{ikt}, \quad \forall t \in T \text{ e } t \leq tc_{ji}, \forall i \in M, \forall k \in N \quad (10a)$$

$$Chegada_{ikt} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^M X_{jik(t-tc_{ji})}, \quad \forall t \in T \text{ e } t > tc_{ji}, \forall i \in M, \forall k \in N \quad (10b)$$

$$X_{ijkt} \geq 0 \text{ e inteiro}, \quad \forall i \in M, \forall j \in M, \forall k \in N, \forall t \in T \quad (11)$$

$$Disp\_Loco_{ikt} \geq 0 \text{ e inteiro}, \quad \forall i \in M, \forall k \in N, \forall t \in T \quad (12)$$

$$Chegada_{ikt} \geq 0 \text{ e inteiro}, \quad \forall i \in M, \forall k \in N, \forall t \in T \quad (13)$$

Por sua vez, as restrições (6) garantem que o somatório da alocação de todos os modelos de locomotivas  $k$  para o trem que circula de  $i$  para  $j$  no dia  $t$  da semana deve ser maior ou igual à demanda de trens que circulam de  $i$  para  $j$  no dia  $t$  da semana; as restrições (7) garantem que o somatório da alocação do modelo de locomotivas  $k$  para os trens que circula entre o pátio de origem  $i$  para todos os pátios de destino  $j$  no dia  $t$  da semana deve ser menor ou igual à disponibilidade no pátio de origem  $i$  do modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t$  da semana; as restrições (8) garantem que a disponibilidade no pátio de origem  $i$  do modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t$  da semana está restrita ao tamanho da frota de locomotivas  $S$  de cada modelo; as restrições (9) garantem que a disponibilidade no pátio de origem  $i$  do modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t$  da semana mais o que está chegando em  $i$  do modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t$  menos o somatório do que está sendo alocado do pátio de origem  $i$  para todos os pátios de destino  $j$  com o modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t$  da semana será igual à disponibilidade no pátio de origem  $i$  do modelo de locomotivas  $k$  no dia  $t+1$  da semana; as restrições (10a)

garantem que a chegada de locomotivas no pátio  $i$  do modelo  $k$  no dia  $t$  será igual ao parâmetro  $G_{ikt}$ , quando  $t$  for menor ou igual ao tempo de ciclo entre  $j$  e  $i$ ; as restrições (10b) garantem que a chegada de locomotivas no pátio  $i$  do modelo  $k$  no dia  $t$  será igual ao somatório do que foi alocado dos pátios  $j$  para o pátio  $i$  com o modelo de locomotivas  $k$  no dia da semana  $t$  menos o tempo de ciclo entre  $j$  e  $i$ , quando  $t$  for maior que o tempo de ciclo entre  $j$  e  $i$ ; as restrições (11), (12) e (13) garantem a positividade e integralidade das variáveis de decisão.

### 3.3.6 CÁLCULO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

Por fim, na sexta etapa do procedimento proposto é feito o cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> resultante da alocação das locomotivas nos trens selecionados.

O aprimoramento do uso de energia e da gestão da eficiência energética vem sendo necessário não só em relação ao contexto econômico, como resposta aos aumentos dos preços, mas ganha cada vez mais importância na mitigação às mudanças climáticas. Para Aragón *et al.* (2013), a eficiência energética surge como uma alternativa na busca da redução da poluição ambiental, além de melhorar tanto a produtividade quanto a competitividade das empresas a partir da diminuição do consumo de energia e, conseqüentemente, redução dos custos operacionais.

As emissões brasileiras de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) vêm aumentando gradativamente e estão diretamente relacionadas à queima de combustíveis fósseis (Araújo, 2006; D'Agosto, 2015). Entre todos os setores que emitem CO<sub>2</sub>, o setor de transportes apresenta a maior participação quanto ao total de emissões, representando, em 2013, 46% e 23% das emissões de fontes de combustíveis fósseis no Brasil e no Mundo, respectivamente (IEMA, 2016). Deste modo, o aumento da eficiência energética no setor de transportes tende a ter impacto direto nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

A principal fonte de energia do transporte ferroviário de cargas no Brasil é o óleo diesel, sendo que a maior parte das locomotivas no país possuem motor diesel-elétrico (ANTT, 2012). Todavia, o transporte ferroviário destaca-se por sua maior eficiência energética e, conseqüentemente, uma menor emissão de gases de efeito estufa por unidade transportada quando comparado ao modo rodoviário. De tal modo, pode-se afirmar que o incentivo ao transporte ferroviário de cargas contribui para a

redução das emissões de GEE e, de fato, este é um tema que tem ganhado destaque no cenário nacional. Em 2012, por exemplo, foi elaborado o 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas, que aborda questões ambientais e econômicas, como emissão de gases de efeito estufa e consumo de combustíveis, dentre outros aspectos, disponibilizando informações acumuladas desde o início da atuação da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2012).

Além disso, a metodologia proposta pela *Environmental Protection Agency* (EPA, 2009), permite o cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> por litro de diesel consumido por locomotivas. A partir de sua aplicação podem ser estimados os ganhos nas emissões de CO<sub>2</sub>, gás de efeito estufa com maior participação na poluição atmosférica, decorrente da otimização da alocação de locomotivas no transporte ferroviário de cargas. A Equação 13 apresenta a fórmula de cálculo do fator de emissão de CO<sub>2</sub>.

$$\text{Fator} = (\text{Densidade Combustível}) \cdot (\text{CO}_2 \text{ no Carbono}) \cdot (\% \text{ Carbono no combustível}) \quad (13)$$

Sendo:

Fator: fator de emissão de CO<sub>2</sub> [Kg CO<sub>2</sub>/L]

Densidade Combustível: densidade do diesel [Kg/L]

CO<sub>2</sub> no Carbono: presença do CO<sub>2</sub> na molécula de Carbono

% Carbono no combustível: percentual de presença do Carbono no Diesel

O tipo de óleo diesel utilizado pelas ferrovias, regularizado pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), é o conhecido como S-500, caracterizado pela presença do gás enxofre na composição em cerca de 500 mg/kg que equivale a 500 partes por milhão (p.p.m). Em termos comparativos, a maior parte dos veículos rodoviários utilizam o óleo S-10, com presença de enxofre na composição em cerca de 10 mg/kg, ou 10 p.p.m. (SILVA *et al*, 2017). Apesar do tipo de óleo utilizado pelas ferrovias ser mais poluente do que o usado pelo transporte rodoviário, o modo ferroviário gera menor impacto ambiental em função da alta eficiência energética e do elevado volume transportado, quando comparado com o modo rodoviário.

É neste contexto que a gestão dos indicadores ambientais e de eficiência energética nas ferrovias torna-se importante, na medida em que se conhecem as variáveis que influenciam este processo, e sua importância estratégica para o aumento da produtividade, otimização de custos e redução de impactos ambientais negativos. Dado que uma alocação eficiente de locomotivas pode contribuir, pelo menos, com cerca de 5% para a redução do consumo energético das empresas (CASSEMIRO e COSTA, 2015), tendo assim influência direta no aumento da eficiência energética e na redução das emissões de GEE, este problema ganha uma relevância ainda maior, principalmente quando se considera também a questão econômica, pois esta é a segunda maior parcela na matriz de custos de uma empresa ferroviária [AMERICAN ASSOCIATION OF RAILROADS (AAR), 2018].

## 4 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS NA GRADE DE CARGA GERAL

Este capítulo traz uma aplicação prática do modelo de alocação de locomotivas proposto neste trabalho. O estudo de caso foi feito baseada nos dados da MRS Logística S.A., que na divulgação deste trabalho se apresentam ligeiramente modificados por uma questão de sigilo das informações. Para a aplicação das etapas do modelo, o processo da empresa é detalhado a seguir.

### 4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

A MRS Logística S.A. é a concessionária ferroviária que opera a chamada Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal, com aproximadamente 1.643 km de linhas férreas passando pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. A Figura 4.1 apresenta a malha ferroviária operada pela empresa.



FIG. 4.1 Representação da malha ferroviária

Fonte: MRS Logística S.A.

As operações da MRS Logística S.A. estão focadas no transporte ferroviário de cargas atendendo a indústria siderúrgica, cimenteira, da construção civil, mineração, agrícola, transporte de contêineres, carvão, coque, granéis minerais, extração vegetal e celulose, entre outras mercadorias, sendo o transporte dividido em duas categorias: *Heavy-Haul* e Carga Geral.

O transporte classificado como sendo do tipo *Heavy-Haul* apresenta como principal característica o transporte de grandes volumes por grandes distâncias, com cargas como o minério de ferro, bauxita, carvão e coque para siderurgia, representando cerca de 75% do volume transportado pela empresa. Em geral, o transporte de *Heavy-Haul* é realizado por trens unitários, ou seja, com apenas um tipo de carga, com circulação baseada em tonelagem e com operações divididas em 4 etapas principais: Carga, Circulação Carregado, Descarga e Circulação Vazio.

Por sua vez, o transporte do tipo Carga Geral tem características diferenciadas como menores volumes e produtos distintos no mesmo trem. Envolve diversos produtos e clientes, o que implica em pontos de carga e descarga ao longo de todo o trecho de circulação. A operação de trens de Carga Geral é baseada em grade horária, com horários fixos de chegada e partida em cada local, conforme apresentado no Capítulo 3.

#### 4.2 SELEÇÃO DOS TRENS A SEREM CONSIDERADOS

Inicialmente, foi feita a seleção dos trens a serem considerados na otimização da alocação das locomotivas. Foram analisados os diversos trens presentes na grade de carga geral, suas origens, destinos, TKB a ser tracionada e o ciclo da rota. Cada um dos trens possui demanda de vagões para circular até uma vez por dia e necessita de uma locomotiva para fornecimento de tração. Dessa forma, onze tipos de trens foram considerados no modelo, representando cerca de 87% do volume transportado por trens que possuem grade horária de circulação. A Figura 4.2 apresenta a representatividade de cada um desses trens.

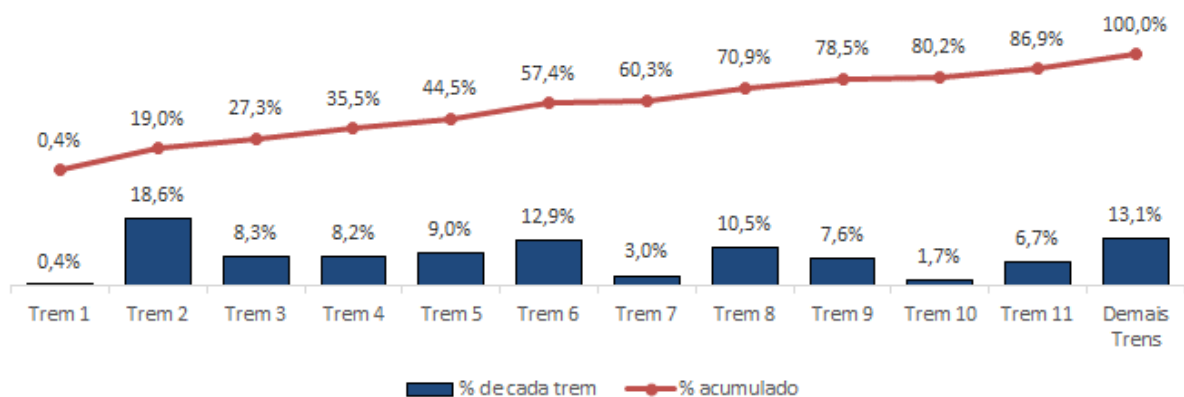


FIG. 4.2 Representatividade do volume transportado pelos trens selecionados para o modelo

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma vez definidos os trens a serem considerados, foi necessário levantar as informações desses trens, principalmente as rotas de circulação, uma vez que os pátios de origem são onde as locomotivas devem estar disponíveis para serem alocadas e os pátios de destino são para onde estas irão circular. A Tabela 4.1 resume as principais informações dos trens selecionados.

TAB 4.1 Informação dos trens selecionados para a otimização

Trem	Origem	Destino	TKB	Ciclo (dias)
Trem 1	Pátio 1	Pátio 3	1.371.073	2
Trem 2	Pátio 3	Pátio 1	3.988.582	2
Trem 3	Pátio 1	Pátio 6	1.953.968	3
Trem 4	Pátio 6	Pátio 4	1.751.522	2
Trem 5	Pátio 4	Pátio 1	1.481.490	2
Trem 6	Pátio 3	Pátio 4	2.337.395	2
Trem 7	Pátio 4	Pátio 3	929.585	2
Trem 8	Pátio 1	Pátio 5	1.112.286	1
Trem 9	Pátio 2	Pátio 1	1.144.486	1
Trem 10	Pátio 5	Pátio 2	198.570	1
Trem 11	Pátio 5	Pátio 3	638.264	1

Legenda: TKB = tonelada quilômetro bruto



A partir da Tabela 4.1 é possível observar a variedade dos tipos de trens considerados em termos de TKB, que está associada tanto ao volume transportado quanto à distância percorrida, e em relação ao ciclo dos trens, os quais possuem rotas variando entre 1 e 3 dias. Essa variedade é característica do tipo do transporte classificado como Carga Geral, uma vez que este atende diversos tipos de mercadorias de diferentes clientes.

Sendo assim, para o horizonte semanal considerado, a demanda é de, no máximo, 77 trens, ou seja, todos os trens circulando em todos os dias da semana entre os seis pátios. Para o cenário analisado, a demanda de trens a ser atendida pelas locomotivas foi de 69 trens na semana.

#### 4.3 IDENTIFICAÇÃO DAS LOCOMOTIVAS DISPONÍVEIS

Para a identificação das locomotivas disponíveis, foram considerados os seis pátios que são origens e/ou destinos dos onze trens selecionados previamente. Esses pátios são os locais em que as locomotivas devem estar disponíveis antes do horário de partida do trem para que sejam alocadas nas composições. É importante destacar que para serem alocadas aos trens, as locomotivas precisam estar em bom estado para o uso, ou seja, não apresentarem avarias que inviabilizem a sua utilização. A Figura 4.3 apresenta um mapa com a sinalização dos pátios que são origens/destinos na malha ferroviária da empresa dos trens considerados no modelo de otimização.

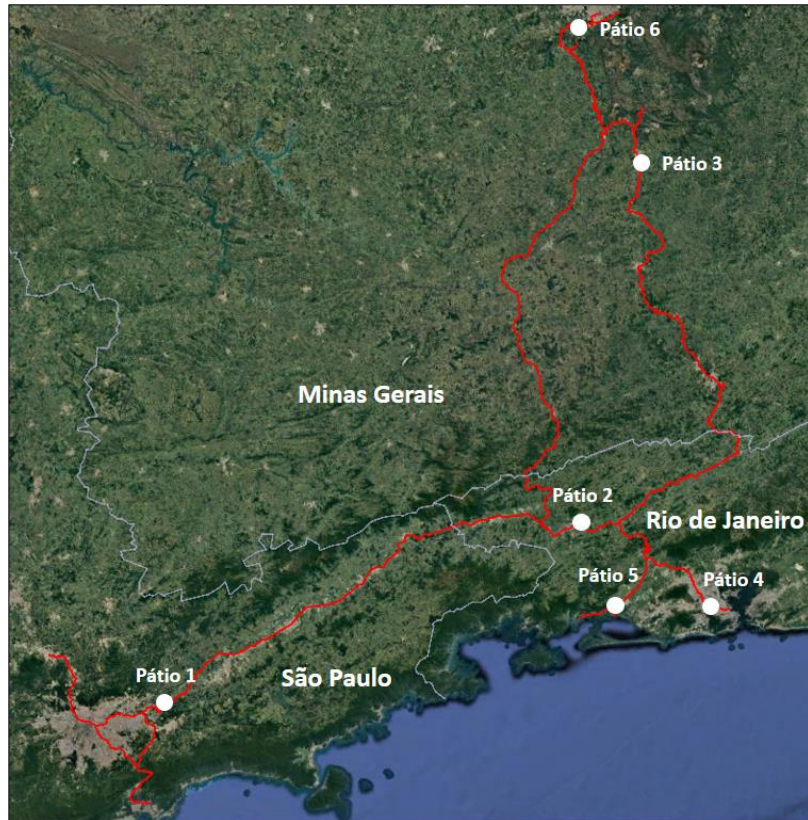


FIG. 4.3 Pátios de origem e/ou destino dos trens selecionados na malha ferroviária

Fonte: Elaborado pelo autor

Dada a relação de pátios considerados, bem como os trens selecionados para a realização da alocação, pode-se estabelecer a relação existente entre os pátios, uma vez que nem todo possível par origem e destino possui um trem associado. A Tabela 4.2 apresenta as rotas existentes entre os pátios considerados no modelo. Os valores presentes na tabela correspondem ao tempo de circulação, em dias, entre os pátios relacionados. O par origem e destino que não possui valor associado, não apresenta circulação de trens.

TAB 4.2 Relação de origens e destinos entre os pátios considerados no modelo com os tempos de circulação, em dias, entre estes

<b>Origem/Destino</b>	<b>Pátio 1</b>	<b>Pátio 2</b>	<b>Pátio 3</b>	<b>Pátio 4</b>	<b>Pátio 5</b>	<b>Pátio 6</b>
Pátio 1	-	-	2	-	1	3
Pátio 2	2	-	-	2	-	-
Pátio 3	-	-	-	2	-	-
Pátio 4	2	-	2	-	-	-
Pátio 5	1	-	-	-	-	-
Pátio 6	-	1	1	-	-	-

Em seguida, dado os diferentes tipos de locomotivas existentes, foram selecionados os grupos que são utilizados para tracionar os trens de produção em função de sua maior capacidade tratora e maior confiabilidade. O nome dos grupos foi adotado seguindo o padrão estabelecido pela empresa, sendo 10 as mais potentes e que aguentam maior esforço e decrescendo a partir desta lógica. Este processo agrupa diversos modelos similares de locomotivas, apesar de diferentes particularidades e alterações que sofreram durante o tempo. Algumas receberam modificações com instalação de microprocessadores de controle, sistemas de proteção nos motores e geradores.

Sendo assim, foram selecionados os três grupos (10, 9, e 8) que são utilizados para tracionar os trens selecionados. Existem outros grupos (do 1 ao 7) disponíveis, porém que são utilizados apenas para manobras de pátios, trens de via, entre outras atividades. A Tabela 4.3 reúne as principais características dos grupos de locomotivas considerados neste trabalho.

TAB 4.3 Resumo dos grupos de locomotivas selecionados

<b>Grupo</b>	<b>Modelo</b>	<b>Potência Máxima (HP)</b>	<b>Capacidade do tanque (L)</b>	<b>Esforço Trator Máximo (ton)</b>
10	GE-AC44i	4.400	18.000	68.000
9	GE-C44-EMI	4.400	18.000	49.546
8	GE-C36-7	3.600	15.000	40.969
8	GE-C36-S7	3.600	15.000	40.969
8	GE-MX36-MP	3.600	15.000	40.969
8	GE-C30-8	3.600	15.000	40.969
8	GE-C36-ME	3.600	15.000	40.969
8	GE-C30-7	3.000	15.000	40.969
8	GE-U30C	3.000	15.000	40.969
8	GE-C30-7MP	3.000	15.000	40.969
8	GE-SF30-C	3.000	15.000	40.969
8	GM-SD40/3	3.000	15.000	40.969

Legenda: HP = *horse power*; L = litros; ton = toneladas.

Para o período selecionado para implementação do modelo, chegou-se a um total de 49 locomotivas disponíveis para atendimento da demanda no início do horizonte de programação semanal. Esta disponibilidade inicial foi considerada como um parâmetro para o modelo no primeiro dia da semana. Já para os demais dias da semana, a disponibilidade de cada um deles em cada pátio foi consequência das decisões de alocação feitas pelo próprio modelo. A Tabela 4.4 apresenta essa distribuição do primeiro dia da semana.

TAB 4.4 Distribuição inicial da quantidade de locomotivas disponíveis por grupo e pátio

Pátios	Locomotivas		
	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8
Pátio 1	3	5	2
Pátio 2	3	0	2
Pátio 3	8	6	0
Pátio 4	6	0	0
Pátio 5	2	2	2
Pátio 6	3	5	0

Vale ressaltar que à medida que as locomotivas são alocadas aos trens, elas voltaram a estar disponíveis no pátio de destino deste trem em um horizonte de tempo igual ao ciclo do trem em que foram alocadas anteriormente. Esse fato permite que algumas locomotivas sejam utilizadas em mais de um trem durante a semana de programação.

#### 4.4 DEFINIÇÃO DO CUSTO DE MANUTENÇÃO

Para o cálculo do custo de manutenção, realizou-se o levantamento do custo total dado o fechamento do ciclo de manutenção de cada modelo de locomotiva nos anos de 2016 e 2017. Foram considerados os custos com materiais necessários na manutenção das locomotivas, além dos gastos com mão de obra nas inspeções e revisões.

Além disso, levantou-se o momento de transporte, ou seja, o produto entre a tonelada bruta transportada pelo trem e a distância percorrida (TKB) tracionado pelas locomotivas no mesmo período. Assim, estimou-se o custo/TKB, em R\$, que cada grupo de locomotiva possuiu no período. Relacionando essa informação como a TKB de cada um dos onze trens selecionados, foi possível determinar o custo de manutenção associado ao modelo de locomotiva alocado ao trem que percorre determinada rota entre um pátio de origem e um pátio de destino. A Tabela 4.5

apresenta o resumo dos custos de manutenção para cada um dos trens quando circula com algum dos três modelos de locomotivas considerados no modelo.

TAB 4.5 Custo de manutenção por trem e grupo de locomotiva (em R\$)

Trens	Locomotivas		
	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8
Trem 1	764,28	1.885,07	6.728,84
Trem 2	2.223,35	5.483,84	19.574,84
Trem 3	1.089,20	2.686,48	9.589,53
Trem 4	976,35	2.408,14	8.595,98
Trem 5	825,83	2.036,88	7.270,74
Trem 6	1.302,93	3.213,65	11.471,28
Trem 7	518,18	1.278,07	4.562,15
Trem 8	620,02	1.529,27	5.458,79
Trem 9	637,97	1.573,54	5.616,82
Trem 10	110,69	273,01	974,53
Trem 11	355,79	877,54	3.132,42

#### 4.5 CÁLCULO DO CUSTO DE COMBUSTÍVEL

Por sua vez, para o cálculo do custo com combustível, primeiramente foi levantada a eficiência energética média histórica de cada grupo de locomotiva em cada um dos onze trens selecionados. Conforme apresentado no Capítulo 3, o cálculo do consumo de combustível pode ser realizado de duas formas: pelo abastecimento da bomba ou pelo registrador de eventos da locomotiva. Como o acesso à informação do primeiro método é mais simples, além de ser a forma de medição adotada pela empresa, este foi selecionado para a medição da eficiência energética dos trens.

De posse dessa informação e considerando o TKB de cada um dos trens que circularam na semana, foi possível estimar o consumo de combustível, em litros, através da aplicação da Equação 4, e transformá-lo em custo por meio da

multiplicação pelo preço por litro considerado. Para o custo do óleo diesel, foi levantado o preço médio pago pela empresa ao fornecedor do produto e acrescentado um fator adicional de modo a manter a confidencialidade dessa informação. Como os postos ferroviários consomem em larga escala, o preço é reduzido quando comparado com o mercado comum. Sendo assim, para a realização deste trabalho, o valor considerado para o preço do litro de óleo diesel foi de R\$ 3,00. A Tabela 4.6 apresenta o resumo dos custos com combustível para cada um dos trens quando circulam entre um pátio de origem e um pátio de destino com algum dos três grupos de locomotivas considerados no modelo proposto.

TAB 4.6 Custo do diesel por trem e grupo de locomotiva (em R\$)

Trens	Locomotivas		
	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8
Trem 1	9.744,09	11.620,88	15.591,15
Trem 2	30.223,02	34.948,20	53.074,51
Trem 3	14.543,05	17.215,98	28.767,52
Trem 4	13.845,74	16.163,18	26.334,21
Trem 5	12.531,16	13.619,99	18.688,67
Trem 6	18.234,59	21.597,99	31.839,21
Trem 7	6.996,23	8.731,21	12.950,86
Trem 8	8.174,13	9.481,29	17.509,54
Trem 9	8.761,63	10.453,93	17.100,89
Trem 10	1.582,95	1.756,40	4.716,44
Trem 11	4.481,21	5.552,60	9.488,24

#### 4.6 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

O modelo apresentado foi implementado no *software* LINGO 17.0, com o apoio do MS EXCEL para *input/output* dos dados. O ponto de partida do modelo foi a alocação realizada manualmente pelos usuários da empresa para uma semana típica

do transporte entre os dias 5 e 11 de março de 2018. A partir dessa alocação foi feita a comparação com o resultado do modelo proposto.

#### 4.7 CÁLCULO DO FATOR DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>

Por fim, estimou-se a redução de emissão de CO<sub>2</sub> obtida por meio de uma alocação mais eficiente das locomotivas. Por meio da adoção da metodologia proposta pela *Environmental Protection Agency* (EPA, 2009), apresentada na Seção 3.3.6 foi possível realizar a comparação entre o cenário real de alocação de locomotivas com a alocação otimizada resultante do modelo proposto. A Tabela 4.7 apresenta o valor dos fatores utilizados para o cálculo do fator de emissão de CO<sub>2</sub> dado o tipo de óleo diesel utilizado pelas locomotivas da empresa.

TAB 4.7 Valores para o cálculo do fator de emissão de CO<sub>2</sub>

Fator	Valor
Densidade do combustível	0,853
Presença de CO <sub>2</sub> no Carbono	3,667
% de Carbono no combustível	0,870

Utilizando os dados apresentados na Tabela 4.7 e a Equação 13, foi possível estimar o fator de emissão de 2,7211 kgCO<sub>2</sub>/l de óleo diesel consumido. Esse fator significa que para cada litro de óleo diesel consumido pelas locomotivas, 2,7211 kg de CO<sub>2</sub> são emitidos para a atmosfera. Multiplicando este fator pela quantidade de litros de óleo diesel que deixou de ser consumido por meio da alocação mais eficiente das locomotivas aos trens, foi possível realizar a comparação entre as emissões de CO<sub>2</sub> nos cenários real e otimizado.



## 4.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma vez tendo sido aplicado o modelo proposto, o objetivo desta seção é realizar a análise dos dados de saída da alocação. Optou-se por realizar a comparação com um cenário real de alocação feita pelos programadores de trens da empresa com o intuito de verificar se, de fato, o modelo apresentou resultados satisfatórios.

Com a aplicação do procedimento proposto, foi observada uma redução do total de locomotivas utilizadas para o atendimento dos trens. Das 49 locomotivas disponíveis para utilização, algumas foram utilizadas mais de uma vez, enquanto outras sequer foram necessárias para o transporte. Essa mesma situação aconteceu no cenário real, no qual 37 locomotivas foram necessárias para transporte, ou seja, 12 locomotivas não foram demandadas e poderiam ter sido utilizadas para outras finalidades, como para o atendimento de outras cargas, serviços de manutenção, entre outras atividades. No cenário otimizado, o total de locomotivas não utilizadas subiu para 25, representando uma redução na utilização das locomotivas de 35% em relação à alocação real. Dessa forma, das 49 locomotivas disponíveis, somente 24 seriam necessárias para a realização do transporte na semana analisada, representando uma redução de 51% quando comparado com a alocação real. A Figura 4.4 apresenta a comparação de uso das locomotivas entre o cenário real e o otimizado para o período de análise.

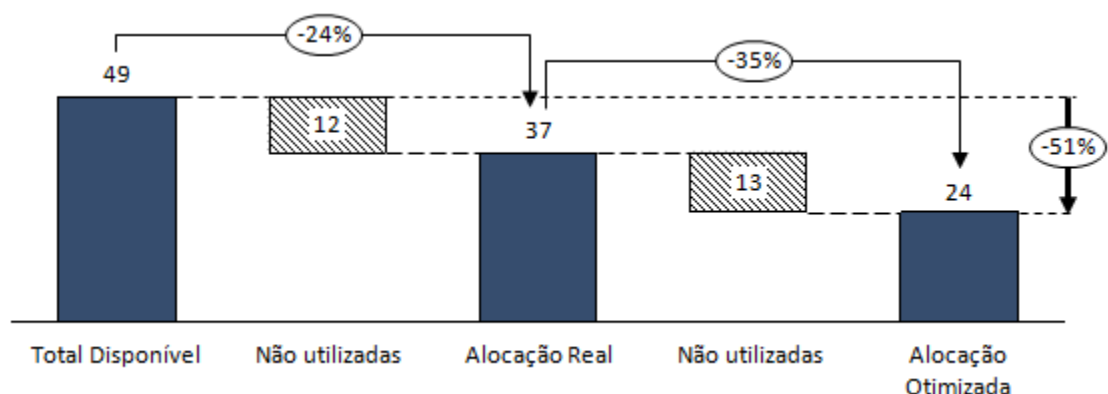


FIG. 4.4 Comparação da utilização das locomotivas nos cenários

Fonte: Elaborado pelo autor

Ainda com relação ao uso das locomotivas, a análise da saída do modelo proposto permite identificar como foi feita a alocação dos diferentes grupos de locomotivas para cada um dos onze trens selecionados em cada um dos sete dias da semana de planejamento. Através desse resultado, pode-se observar que as locomotivas mais eficientes (grupo 10) e, portanto, as que geram os menores custos de transporte, foram as priorizadas quando feita a alocação, conforme era esperado. A Tabela 4.8 apresenta a alocação resultante do modelo para cada grupo de locomotiva em cada dia da semana. Os dias em que não há preenchimento do modelo de locomotiva alocado correspondem a quando não houve demanda para a circulação daqueles trens.

TAB 4.8 Grupos de locomotivas utilizados por cada um dos trens em cada dia da semana de planejamento

Trens	Grupos de locomotivas utilizados						
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7
Trem 1	Grupo 9	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	-
Trem 2	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 3	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 4	-	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 5	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 6	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 7	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 8	Grupo 10	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10
Trem 9	-	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	-	-
Trem 10	-	-	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 9	-	Grupo 8
Trem 11	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 9	Grupo 10	Grupo 10	Grupo 10

Com relação aos custos do transporte, a aplicação do modelo proposto possibilitou a redução de R\$ 101.745,00 na semana analisada, correspondente a 10%, em relação ao modelo de alocação adotado pela empresa, o qual não considera os custos de combustível e manutenção das locomotivas como um fator de decisão. Em termos anuais, essa economia poderia chegar a aproximadamente 5,3 milhões de

reais. A Figura 4.5 apresenta a comparação dos custos entre o cenário real e o otimizado para a semana analisada.

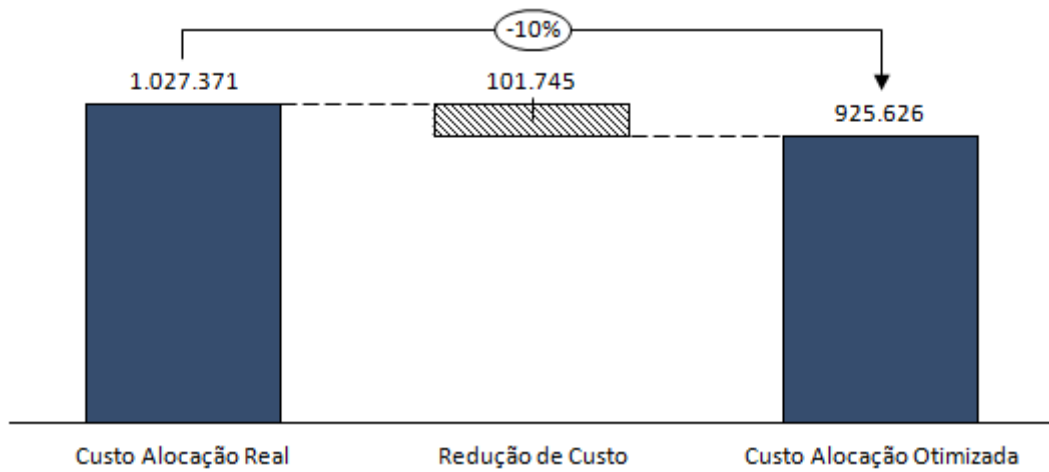


FIG. 4.5 Comparação entre os custos de alocação no cenário real e o otimizado (em R\$)

Fonte: Elaborado pelo autor

Em relação ao consumo total de combustível, obteve-se uma redução de 20.537 litros no horizonte semanal, o que corresponde a 7%, em relação ao modelo de alocação atual. Em termos anuais, essa economia seria de aproximadamente 1,1 milhões de litros de óleo diesel. A Figura 4.6 apresenta a comparação do consumo de combustível entre os cenários real e otimizado para a semana analisada.

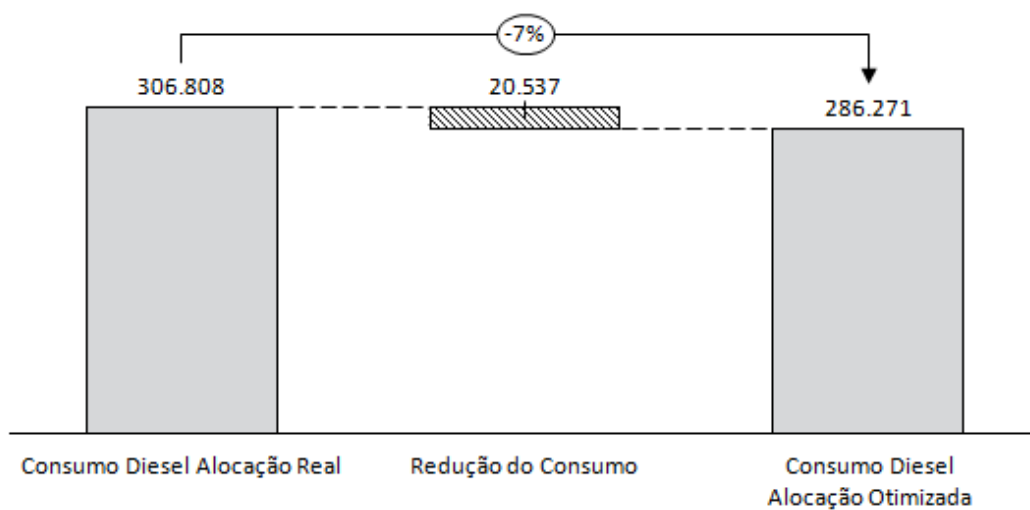


FIG. 4.6 Comparação entre o consumo de diesel no cenário real e otimizado (em litros)

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa redução no consumo de combustível, quando convertido para emissão de CO<sub>2</sub>, apresenta uma redução de 56 toneladas do gás que deixariam de serem emitidos pela alocação eficiente de locomotivas. A Figura 4.7 apresenta a comparação da emissão de CO<sub>2</sub> entre os cenários real e otimizado. Em termos práticos, essa quantidade do gás que deixa de ser emitida é o equivalente ao plantio de aproximadamente 343 árvores, conforme dados do estudo realizado pela Universidade de São Paulo em parceria com a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ, 2013).

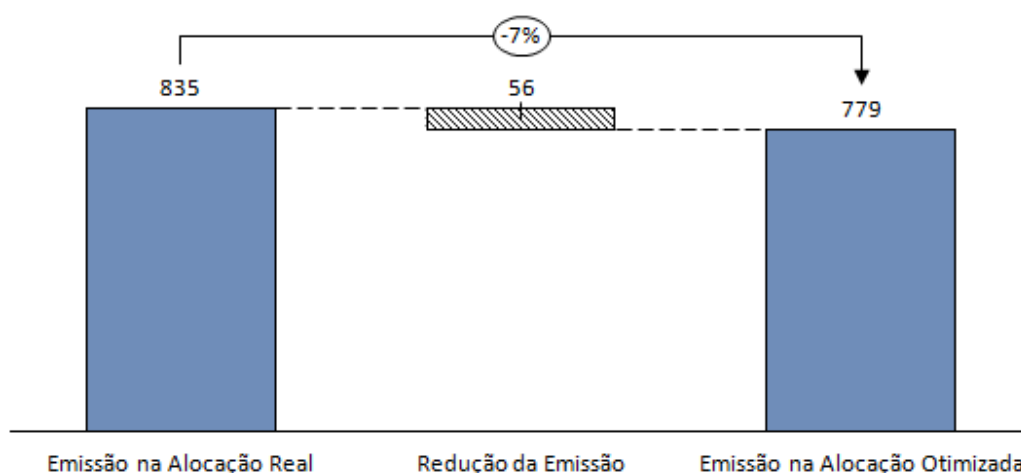


FIG. 4.7 Comparação entre a emissão de CO<sub>2</sub> no cenário real e o otimizado (em toneladas)

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS RESULTADOS

De modo a avaliar alguns fatores que impactam nos resultados do processo de alocação de locomotivas, foram feitas análises de sensibilidade de alguns dos parâmetros do modelo, cujos resultados são apresentados a seguir.

Inicialmente, optou-se por realizar uma análise de modo a identificar qual dos custos considerados no modelo proposto, combustível e manutenção, tem maior impacto no custo total do transporte quando sofrem algum tipo de variação. Para tal, foi realizado um incremento gradual, variando entre 10% e 50%, de cada um dos custos. Primeiramente, foi feita a análise do custo de combustível enquanto os custos

de manutenção se mantiveram inalterados. A Figura 4.8 apresenta o resultado desta análise.

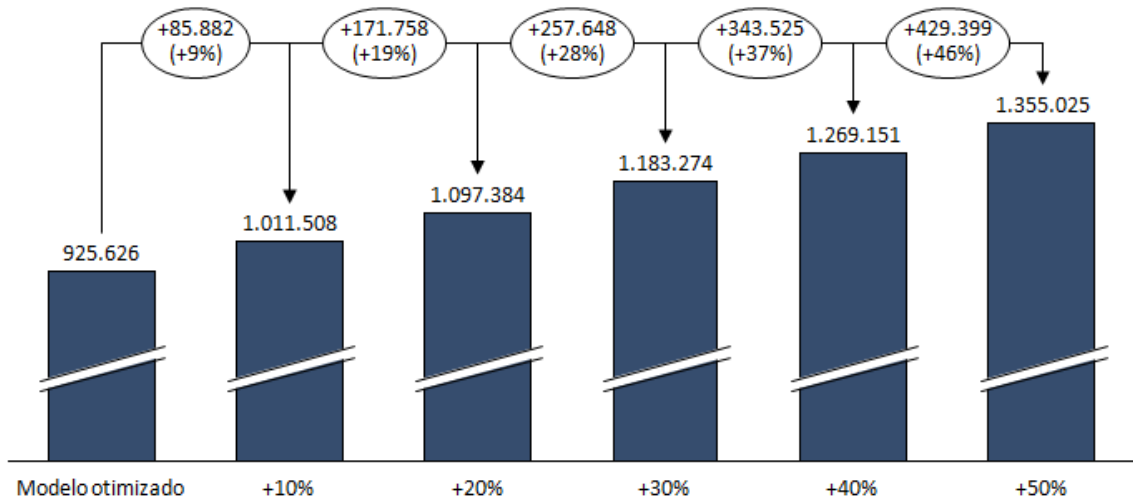


FIG. 4.8 Variação do custo total do transporte em função de variações no custo de combustível (em R\$)

Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, o mesmo conceito foi aplicado para os custos de manutenção, enquanto os custos de combustível se mantinham inalterados. A Figura 4.9 apresenta o resultado desta análise.

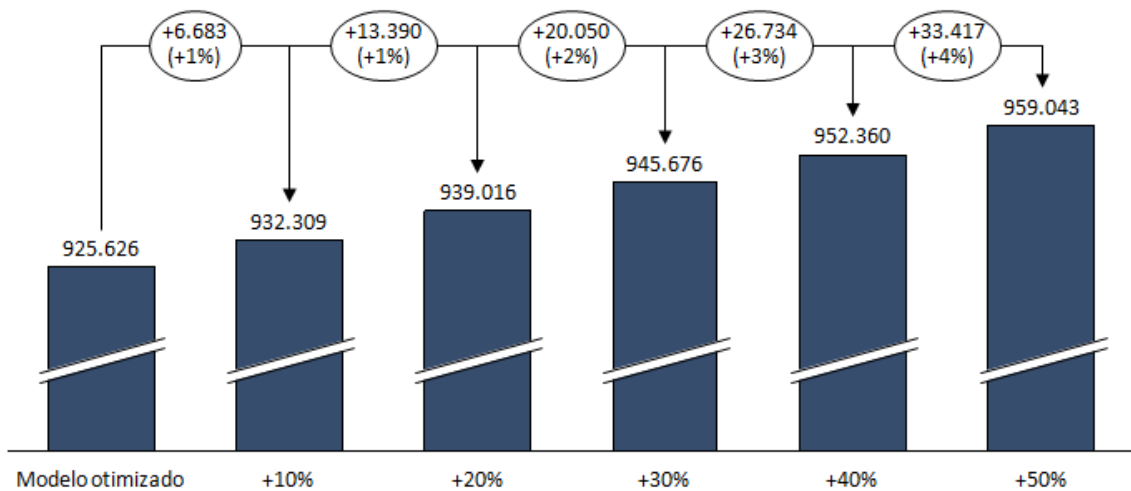


FIG. 4.9 Variação do custo total do transporte em função de variações no custo de manutenção (em R\$)

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se, por meio das Figuras 4.8 e 4.9, que o custo de combustível é o fator que mais impacta o resultado global do custo do transporte. Um reajuste de 10% neste custo impacta em 9% no custo do transporte enquanto que o custo de manutenção impacta apenas no 1% restante, por exemplo. Para a variação máxima adotada de 50%, o custo de combustível é responsável por 46% do impacto no custo total e o custo de manutenção em apenas 4%.

Dessa forma, ações que estejam relacionadas com a redução dos custos de combustível, quer sejam através de melhorias da eficiência energética, como alocação das melhores locomotivas para os principais trens ou melhorias na forma de condução dos trens pelos maquinistas, ou por meio de renegociações do preço pago pelo diesel das locomotivas, devem ser priorizadas quando o objetivo for a redução dos custos totais do transporte.

Outra variação analisada para o resultado da alocação dos grupos de locomotivas aos trens foi feita com base na disponibilidade inicial de cada grupo em cada pátio. Novamente, a análise da saída do modelo proposto permitiu identificar que as locomotivas do grupo 10, as mais eficientes, são sempre as priorizadas para a alocação em cada um dos dias da semana. Desta forma, os demais grupos de locomotivas (8 e 9) somente são utilizados caso não haja locomotivas do grupo 10 suficientes no pátio para suprir toda a demanda de trens. A Figura 4.10 apresenta um exemplo dessa situação, em que é utilizado outro grupo de locomotiva para atender à demanda na ausência do grupo 10, mais eficiente.

Pela análise da Figura 4.10 é possível observar que o saldo inicial de locomotivas do grupo 10 no primeiro dia da semana era de três, para uma demanda de três trens. Ao executar o modelo, a alocação realizada foi de duas locomotivas do grupo 10 e uma do grupo 9 para o primeiro dia, ficando como saldo final desse dia uma locomotiva do grupo 10 e quatro do grupo 9. Para o segundo dia, com a mesma demanda de três trens, foi feita a alocação da locomotiva do grupo 10 restante e duas do grupo 9, ficando zerado o saldo final do grupo 10 e duas do grupo 9. A partir do terceiro dia, começaram a chegar locomotivas do grupo 10 que havia sido alocadas anteriormente em trens com destino a este pátio 1 analisado e que passaram a ser utilizadas para pagar a demanda de trens.

Grupo 10							
Pátio 1	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	3	1	0	0	0	0	0
Saída Trem 1	0	0	1	1	1	1	0
Saída Trem 3	1	1	1	1	1	1	1
Saída Trem 8	1	0	1	1	1	1	1
Chegada Trem 2	0	0	1	1	1	1	1
Chegada Trem 5	0	0	1	1	1	1	1
Chegada Trem 9	0	0	1	1	1	1	0
Saldo Final	1	0	0	0	0	0	0

Grupo 9							
Pátio 1	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	5	4	2	2	2	2	2
Saída Trem 1	1	1	0	0	0	0	0
Saída Trem 3	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 8	0	1	0	0	0	0	0
Chegada Trem 2	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 5	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 9	0	0	0	0	0	0	0
Saldo Final	4	2	2	2	2	2	2

Grupo 8							
Pátio 1	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	2	2	2	2	2	2	2
Saída Trem 1	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 3	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 8	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 2	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 5	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 9	0	0	0	0	0	0	0
Saldo Final	2	2	2	2	2	2	2

FIG. 4.10 Alocação dos grupos de locomotivas para atendimento aos trens em determinado pátio nos dias da semana

Fonte: Elaborado pelo autor

Em contrapartida, nos pátios em que a quantidade de locomotivas do grupo 10 disponível é maior ou igual à demanda de trens, somente este grupo é utilizado para suprir todos os atendimentos. A Figura 4.11 apresenta um exemplo dessa situação,

em que o grupo mais eficiente de locomotivas é suficiente para suprir toda demanda e ainda gera sobra de recurso. Nesse exemplo não foi necessária a utilização de outro grupo de locomotiva senão o grupo 10 para atender à demanda de trens.

Grupo 10							
Pátio 3	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	8	6	5	5	5	5	6
Saída Trem 2	1	1	1	1	1	1	1
Saída Trem 6	1	1	1	1	1	1	1
-	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 1	0	0	0	0	1	1	1
Chegada Trem 7	0	0	1	1	1	1	1
Chegada Trem 11	0	1	1	1	0	1	1
Saldo Final	6	5	5	5	5	6	7

Grupo 9							
Pátio 3	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	6	6	6	7	8	9	9
Saída Trem 2	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 6	0	0	0	0	0	0	0
-	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 1	0	0	1	1	0	0	0
Chegada Trem 7	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 11	0	0	0	0	1	0	0
Saldo Final	6	6	7	8	9	9	9

Grupo 8							
Pátio 3	Dias						
	1	2	3	4	5	6	7
Saldo Inicial	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 2	0	0	0	0	0	0	0
Saída Trem 6	0	0	0	0	0	0	0
-	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 1	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 7	0	0	0	0	0	0	0
Chegada Trem 11	0	0	0	0	0	0	0
Saldo Final	0	0	0	0	0	0	0

FIG. 4.11 Alocação dos grupos de locomotivas para atendimento aos trens em determinado pátio nos dias da semana com sobra de máquinas

Fonte: Elaborado pelo autor



Diante dessa situação, realizou-se um ajuste na disponibilidade inicial dos grupos de locomotivas em cada um dos pátios considerados no modelo proposto. O objetivo desse ajuste foi realocar o modelo mais eficiente de locomotivas, grupo 10, dos pátios nos quais este sobrava após a otimização da alocação para os pátios em que este faltava, gerando a necessidade de alocação dos demais grupos de locomotivas. A Tabela 4.9 apresenta a comparação entre a disponibilidade de locomotivas originalmente utilizada no modelo e a disponibilidade ajustada após análise dos resultados obtidos, por grupo de locomotiva e pátio.

TAB 4.9 Comparação entre a disponibilidade inicial e a ajustada de locomotivas por grupo e pátio

Pátios	Disponibilidade Original			Disponibilidade Ajustada		
	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8	Grupo 10	Grupo 9	Grupos 8
Pátio 1	3	5	2	6	5	2
Pátio 2	3	0	2	3	0	2
Pátio 3	8	6	0	3	6	0
Pátio 4	6	0	0	5	0	0
Pátio 5	2	2	2	6	2	2
Pátio 6	3	5	0	2	5	0

Com a aplicação do procedimento proposto com a nova disponibilidade inicial de locomotivas, foi observada uma redução em 1 da quantidade de locomotivas utilizadas para o atendimento dos trens. Enquanto que no cenário otimizado o total de locomotivas não utilizadas era de 25, para a nova alocação esse número subiu para 26, representando uma redução adicional de 4% na utilização das locomotivas em relação à alocação otimizada. Dessa forma, das 49 locomotivas disponíveis, somente 23 seriam necessárias para a realização do transporte na semana analisada, representando uma redução de 53% quando comparado com a alocação real. A Figura 4.12 apresenta a comparação de uso das locomotivas entre os cenários real, otimizado e ajustado para a semana analisada.

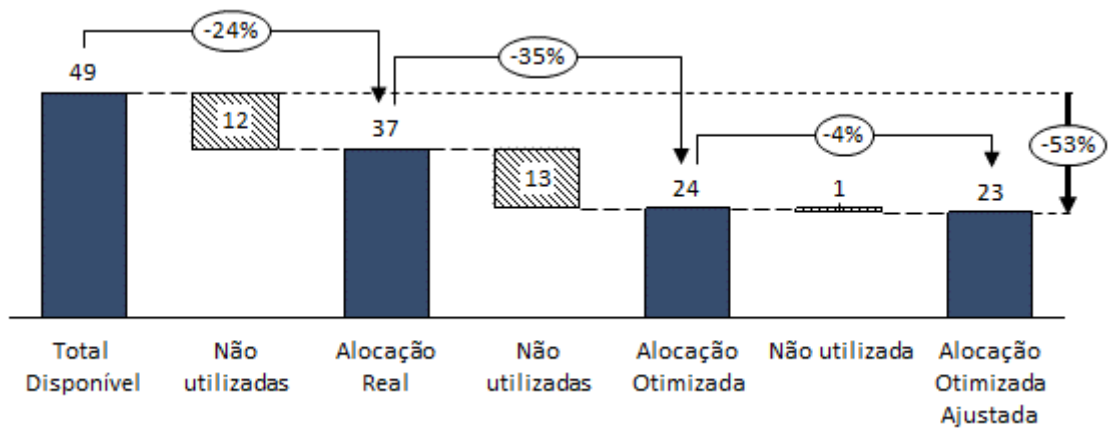


FIG. 4.12 Comparação da utilização das locomotivas nos cenários real, otimizado e ajustado

Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação aos custos do transporte, a aplicação do modelo com a disponibilidade ajustada possibilitou uma redução adicional de R\$ 14.473,00 na semana analisada, correspondente a 11%, em relação ao modelo de alocação adotado pela empresa. Comparativamente, o ganho adicional em relação ao custo da alocação otimizada foi de mais 1%. Em termos anuais, essa economia passaria de 6,0 milhões de reais. A Figura 4.13 apresenta a comparação dos custos entre os cenários real, otimizado e ajustado para a semana analisada.

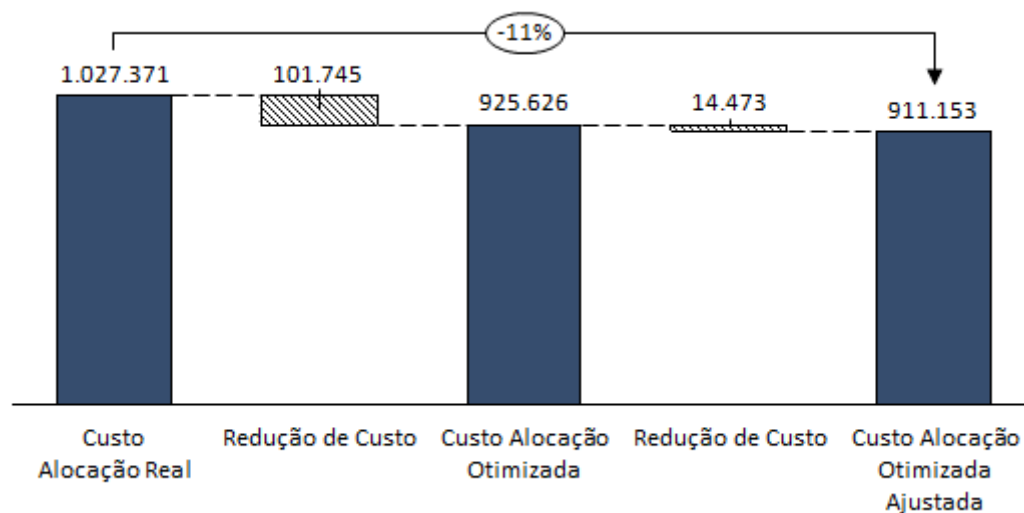


FIG. 4.13 Comparação entre os custos de alocação no cenário real, otimizado e ajustado (em R\$)

Fonte: Elaborado pelo autor

Por sua vez, o consumo total de combustível reduziria em mais 3.204 litros no horizonte semanal, correspondente a 8% de ganho em relação ao modelo de alocação utilizado atualmente. Comparativamente, o ganho adicional em relação ao custo da alocação otimizada foi de mais 1%. Em termos anuais, essa economia superaria 1,2 milhões de litros de óleo diesel. A Figura 4.14 apresenta a comparação do consumo de óleo diesel entre os cenários real, otimizado e ajustado para a semana analisada.

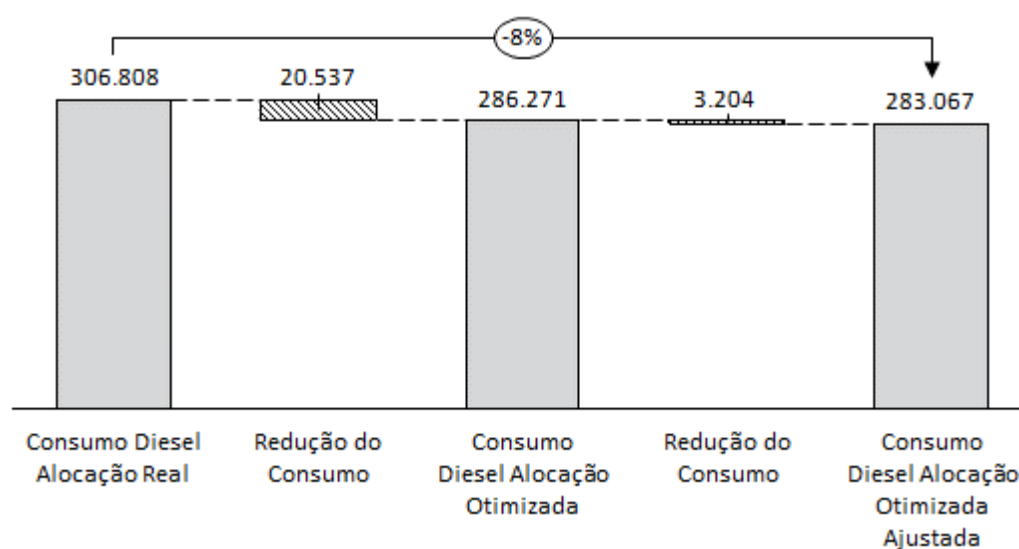


FIG. 4.14 Comparação entre o consumo de diesel no cenário real, otimizado e ajustado (em litros)

Fonte: Elaborado pelo autor

Essa redução no consumo de combustível, quando convertido para emissão de CO<sub>2</sub>, apresenta uma redução adicional de 9 toneladas do gás que deixariam de serem emitidos por semana pela alocação eficiente de locomotivas com a nova disponibilidade. A Figura 4.15 apresenta a comparação da emissão de CO<sub>2</sub> entre os cenários real, otimizado e ajustado para a semana analisada.

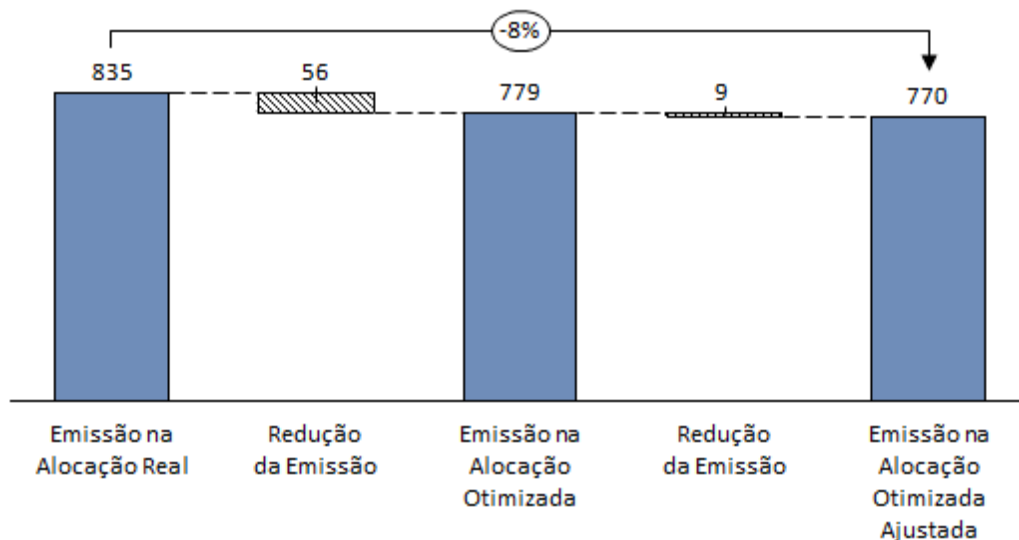


FIG. 4.15 Comparação entre a emissão de CO<sub>2</sub> no cenário real, otimizado e ajustado (em toneladas)

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, essa nova quantidade de CO<sub>2</sub> que deixa de ser emitida, quando convertida para o equivalente em árvores que deveriam ser plantadas é de aproximadamente 53 árvores, na semana analisada. Esse aumento representa um incremento de 15% quando comparado com o cenário já otimizado. A Figura 4.16 apresenta o ganho adicional em árvores entre os cenários otimizado e ajustado para a semana analisada.

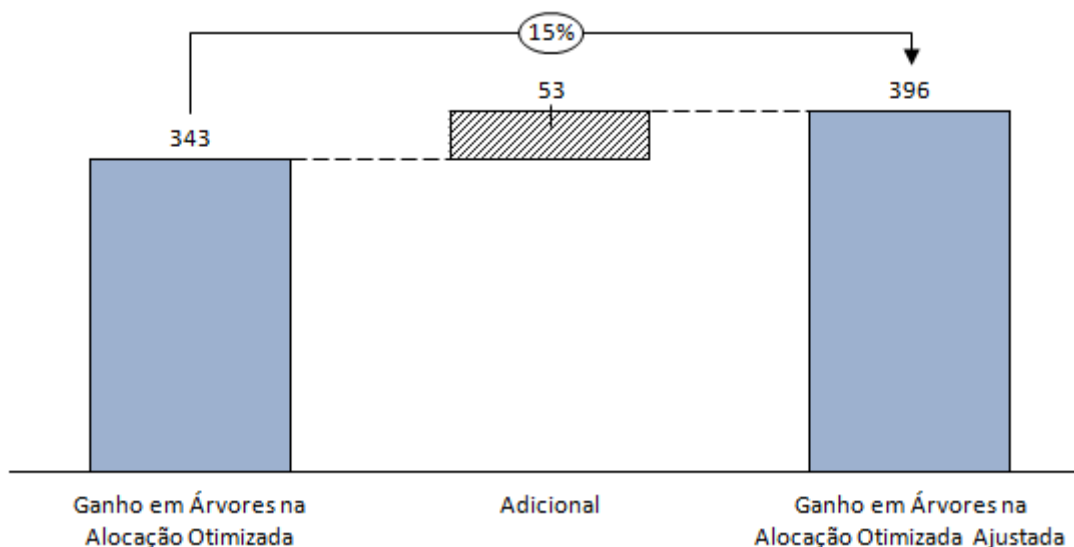


FIG. 4.16 Comparação entre o ganho em quantidade de árvores com a redução da emissão de CO<sub>2</sub> nos cenários otimizado e ajustado (em quantidade)

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar de ter sido realizado o ajuste na disponibilidade inicial do modelo de alocação e de esta ter gerado um resultado adicional satisfatório, vale observar que esse ajuste depende de movimentar as locomotivas entre os pátios que são as origens dos trens. No contexto prático, esta movimentação tem um custo associado, que não foi considerado nessa análise, além de nem sempre é viável por conta da indisponibilidade de recursos como maquinistas e faixas de circulação, entre outros, necessários para circular com as locomotivas entre os pátios.

É importante salientar que a aplicação do procedimento proposto não é apenas útil para promover benefícios econômicos e ambientais, uma vez que busca pela alternativa com menor custo de transporte, no que diz respeito aos custos de manutenção e combustível, e gera uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, mas se apresenta como uma ferramenta de auxílio aos colaboradores responsáveis pela programação dos trens. O modelo apresentado estabelece um critério matemático para a determinação de qual grupo de locomotiva deve ser alocado em cada trem em cada um dos dias da semana, deixando, dessa forma, com que a decisão seja feita apenas pelo conhecimento e experiência dos colaboradores, o que reduz a subjetividade e incerteza da alocação.

Além disto, o estudo de caso confirma a consistência e aplicabilidade do procedimento proposto. As análises das saídas do modelo estão coerentes com o

contexto da operação ferroviária praticada, o que torna a proposta favorável para que seja implementada na empresa. Ressalta-se, ainda, que a metodologia proposta é passível de ser aplicada a qualquer ferrovia de carga, desde que os dados necessários para a estimativa dos indicadores presentes no modelo estejam disponíveis ou possam ser medidos.

Por fim, a Tabela 4.10 apresenta a comparação, para cada um dos fatores analisados, entre os resultados obtidos com a alocação manual, a alocação otimizada e a alocação otimizada ajustada de locomotivas.

TAB 4.10 Comparação dos resultados entre a alocação manual, alocação otimizada e alocação otimizada ajustada das locomotivas

Fator	Alocação Manual	Alocação otimizada	Alocação otimizada ajustada
Locomotivas utilizadas	37	24	23
Custo do transporte (R\$)	1.027.371	925.626	911.153
Litros de óleo diesel consumidos (L)	306.808	286.271	283.067
Emissão de CO <sub>2</sub> (ton)	835	779	770
Ganho de árvores	-	343	396

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação se propôs a desenvolver um procedimento para direcionar a decisão de alocação de diferentes modelos de locomotivas em diversos tipos de trens da grade de carga geral, focando na redução dos principais custos operacionais e associado a uma diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Portanto, o trabalho foi estruturado de modo a responder às seguintes questões de pesquisa:

- Como o processo de alocação de locomotivas é estudado?
- Quais os principais métodos de resolução?
- Como a alocação de locomotivas pode ser aplicada no contexto do transporte ferroviário de cargas brasileiro?
- O que deve ser considerado como direcionador para a alocação de locomotivas?
- Quais ganhos podem ser obtidos através de uma alocação mais eficiente das locomotivas?

Para abordar as duas primeiras questões de pesquisa, foi desenvolvida uma revisão bibliográfica sistemática a fim de identificar os principais aspectos abordados nas publicações realizadas, as restrições consideradas, a aplicação dos modelos propostos, os tipos de modelagem e as formas de resolução do problema de alocação de locomotivas. Foram analisados 151 artigos relacionados ao tema que após a aplicação dos critérios de avaliação foram restringidos a 15 trabalhos selecionados para um maior detalhamento de como foi feita a alocação de locomotivas.

Uma vez tendo sido feita a revisão de literatura, foi possível abordar as demais questões de pesquisa identificadas. Dessa forma, a proposta deste trabalho foi apresentar uma forma de avaliar e sugerir, de acordo com os trabalhos de maior relevância publicados a respeito do assunto, um procedimento para a alocação de locomotivas para um conjunto de trens de carga. O presente trabalho apresentou um modelo de alocação de uma frota de locomotivas para um conjunto de trens de carga através de um procedimento otimização com foco na redução de dois dos principais custos da operação de locomotivas. Além disso, buscou-se também a redução da emissão de CO<sub>2</sub> de modo a se obter ganhos ambientais com a proposta elaborada. Este é um problema de grande relevância, como mostrado na revisão sobre o tema,

visto seu potencial de ganhos, sua complexidade e a falta de ferramentas que garantam que as locomotivas são alocadas da maneira mais eficiente possível nas composições ferroviárias.

O procedimento proposto neste trabalho é composto por um levantamento e análise de dados, que apesar de longo, é realizado uma única vez e permite ajustes e revisões de informações de um trem ou pátio sem impactar a análise dos demais. A etapa da alocação das locomotivas em si estabelece, a partir de uma disponibilidade inicial em cada um dos pátios considerados, qual grupo de locomotiva deve ser alocada a cada um dos trens de modo a minimizar o custo global do transporte. O modelo proposto foi baseado nos diversos trabalhos estudados na revisão de literatura, principalmente no estudo de Kuo e Nicholls (2007), adicionado de novos fatores, como a existência de múltiplos pátios ferroviários, tempos de circulação diferentes para rotas distintas e a utilização de mais de um modelo de locomotiva para a realização do transporte, de modo a tornar o modelo proposto mais representativo à realidade das empresas ferroviárias no Brasil. O ponto de partida da modelagem matemática foi a formulação de eficiência energética, utilizada por ferrovias do mundo todo, agregado ao custo de manutenção como direcionadores do processo de alocação das locomotivas. Esta associação é uma das vantagens deste trabalho, uma vez que o procedimento é feito pautado em uma linguagem genérica, sendo a aplicabilidade e adaptação do procedimento possível a qualquer ferrovia de carga que possua os dados indicados, tendo assim um mínimo grau de personalização ao caso estudado na aplicação.

O diferencial do procedimento proposto é que este não busca resolver o problema de alocação de locomotivas totalmente através de um modelo de otimização, como é visto em alguns dos estudos apresentados na revisão bibliográfica sistemática. Em geral, essas modelagens esbarraram em tempos de soluções impraticáveis para o cenário de uma ferrovia real e se tornaram extremamente complicadas e de difícil customização para o contexto de aplicação. Uma vez tendo sido levantados os dados que suportam o modelo, este é de fácil aplicação no contexto prático e apresenta ganhos diretos na operação de trens, podendo, inclusive, ser expandido para outros tipos de trens.

A aplicação do modelo proposto apresentou um resultado satisfatório quando comparado com a prática atual para alocação das locomotivas adotada pela empresa



estudada, a qual não considera o direcionamento da alocação pelos custos de combustível e manutenção. A economia para uma semana dos custos de transporte foi da ordem de 10%, representado mais de 100 mil reais de redução de custos. Além disso, o modelo de alocação permitiu uma redução da quantidade necessária para a realização do transporte em 13 locomotivas, gerando uma sobra de recursos que pode ser aproveitada para prospecção de novas cargas, manutenções preventivas, serviços internos, entre outras finalidades.

Em termos de impactos ambientais, o modelo também apresentou ganhos, uma vez que foi possível reduzir o consumo de óleo diesel pelos trens em, aproximadamente, 7%. Essa redução gerou uma diminuição da emissão de mais de 56 toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera na semana analisada, equivalente ao plantio de aproximadamente 343 árvores.

Outro ponto de destaque do modelo apresentado diz respeito à representatividade de cada um dos custos considerados (de combustível e de manutenção) no custo total do transporte. Pôde-se perceber que o custo de combustível é o maior impactante no resultando global, o que ajuda a direcionar os esforços para alternativas de melhoria da eficiência energética quando se busca a redução de custos e, conseqüentemente, melhoria no impacto ambiental e da competitividade do transporte ferroviário de cargas.

Além disso, a realização de ajustes na disponibilidade inicial das locomotivas a partir da análise da saída do modelo permitiu um incremento nos ganhos, otimizando tanto os custos do transporte, quanto a emissão de CO<sub>2</sub> e o número de locomotivas utilizadas. Apesar de nem sempre ser possível a movimentação prévia dos recursos, esse resultado pode ser utilizado como um direcionamento para as equipes de programação dos trens na busca pelo melhor resultado possível para a alocação de locomotivas.

Em resumo, o estudo realizado e a análise dos resultados obtidos permitiram constatar a consistência e aplicabilidade do procedimento proposto neste trabalho. Foi possível identificar que as saídas do modelo estão coerentes com o contexto da operação ferroviária praticada pela empresa, o que torna a proposta favorável para que seja implementada. Ainda, o modelo apresentado estabelece um critério matemático para a decisão de alocação de locomotivas, reduzindo, com isso, a subjetividade e incerteza presentes no processo atual.

Por fim, este trabalho não objetivou resolver o problema de alocação de locomotivas por completo, mas sim iniciar um estudo sob uma ótica diferente, inserindo conceitos como grade de trens e emissão de CO<sub>2</sub>, por exemplo, além de aproveitar conceitos já existente nas bibliografias estudadas e o cenário de programação de recursos para o transporte ferroviário. As limitações, simplificações e métodos foram agregados para que este trabalho pudesse mostrar uma abordagem diferente a respeito do assunto, com uma aplicação prática da proposta apresentada. O estudo aqui exposto referiu-se a um caso de uma ferrovia brasileira de transporte de cargas, mas pode ser replicado em outras ferrovias apenas adaptando-se alguns conceitos e a coleta de dados.

Sendo assim, pode-se concluir que os objetivos deste trabalho de desenvolver um modelo de otimização da alocação de locomotivas para os trens da grade de carga geral com foco na redução dos custos do transporte, associado a uma aplicação real e a ganhos de eficiência do processo foram atingidos. Contudo inúmeras sugestões de novos trabalhos podem ser enumeradas a partir deste estudo. Dentre estas sugestões, destacam-se:

- Expansão do modelo apresentado com a inclusão de outros fatores direcionadores para a decisão de alocação de locomotivas aos trens, como o custo com maquinistas ou o custo de capital investido nos diferentes modelos de locomotivas;
- Inclusão de sinalizadores da necessidade de manutenção das locomotivas após um determinado número de viagens, quilometragem percorrida ou TKB tracionada;
- Inclusão da possibilidade de movimentação das locomotivas fora de trem, para uma melhor gestão e rearranjo dos ativos para os pátios em que forem necessários;
- Inclusão da possibilidade de formação dos trens com mais de uma locomotiva, sendo estas de mesmo modelo ou modelos distintos, em função de necessidade de tração ou apenas para a movimentação dos ativos entre os pátios.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, R. K.; LIU, J.; ORLIN, J. B.; SHARMA, D.; SHUGHART, L. A. Solving real-life locomotive-scheduling problems. **Transportation Science**, v. 39, n. 4, p. 503-517, Nov. 2005. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1050.0115>
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas do Transporte Ferroviário de Cargas**. 45p. Brasília, 2012.
- AMERICAN ASSOCIATION OF RAILROADS (AAR). **Rail Cost Adjustment Factor - 2018 Q3**. Washington, DC: Disponível em: <https://www.aar.org/rail-cost-indexes/>. Acesso em: 23 de julho de 2018.
- ARAGÓN, C. S.; PAMPLONA, E.; MEDINA, J. R. V. Identificação de investimentos em eficiência energética e sua avaliação de risco. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 3, p. 525-536, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013000300003>.
- ARAÚJO, A. C. P. **Como comercializar créditos de carbono**. São Paulo: Trevisan Editora Universitária, 2006.
- ARONSSON, M.; KREUGER, P.; GJERDRUM, J. An efficient MIP model for locomotive routing and scheduling. **WIT Transactions on the Built Environment**, v. 114, p. 963-973, 2010. <http://dx.doi.org/10.2495/CR100871>.
- AZANOV, V. M.; BUYANOV, M. V.; GAYNANOV, D. N.; IVANOV, S.V. Algorithm and software development to allocate locomotives for transportation of freight trains. **Vestnik YuUrGU. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software**, v. 9, n. 4, p. 73-85, 2016. <https://doi.org/10.14529/mmp160407>.
- CASSEMIRO, S. L. S. **Procedimento para Planejamento de Alocação de Locomotivas**. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2017.
- CASSEMIRO, S. L. S.; COSTA, F. A. C. V. Distribuição otimizada de locomotivas para ganho de eficiência energética. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, 2015.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **O sistema ferroviário brasileiro**. Brasília: CNT, 2013.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Anuário CNT do Transporte – Estatísticas Consolidadas**. Brasília: CNT, 234p., 2017.
- D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: uma abordagem introdutória**. 1ª ed. Elsevier, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Emission Factors for Locomotives**. Office of Transportation and Air Quality, EPA-420-F-09-02. United States: Environmental Protection Agency, 2009.
- FALCÃO, V. A. A importância do Transporte Ferroviário de Carga para a Economia Brasileira e suas Reais Perspectivas de Crescimento. **Engenharia Civil UM**, v. 45, p. 51-63, 2013.
- GHOSEIRI, K.; GHANNADPOUR, S. F. A hybrid genetic algorithm for multi-depot homogenous locomotive assignment with time windows. **Applied Soft Computing Journal**, v. 10, n. 1, p. 53-65, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.06.004>.
- HAMACHER, F.; PORTO, O.; UCHOA, E.; POGGI, M. **Logística ferroviária: resolução do problema de alocação ótima de vagões e locomotivas no curto prazo**. XXXVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Gramado, Brasil, 2005.
- HAY, W. W. **Railroad Engineering, 2nd Edition**. John Wiley & Sons: New York, 1982.
- INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Emissões de GEE do setor de energia, processos industriais e uso de produtos**. Observatório do Clima, São Paulo, Brasil, 2016.
- IVANOV, S. V.; KIBZUN, A. I.; OSOKIN, A. V. Stochastic optimization model of locomotive assignment to freight trains. **Automation and Remote Control**, v. 77, n. 11, p. 1944-1956, 2016. <https://doi.org/10.1134/S0005117916110059>.
- JAUMARD, B.; TIAN, H. Multi-column generation model for the locomotive assignment problem. **ATMOS**, v.6, p. 6.1-6.13, 2016. <https://doi.org/10.4230/OASlcs.ATMOS.2016.6>
- KUO, C. C.; NICHOLLS, G. M. A mathematical modeling approach to improving locomotive utilization at a freight railroad. **Omega**, v. 35, n. 5, p. 472-485, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.09.003>.
- MACHADO, M. N. **Pesquisa Operacional Aplicada ao Processo de Planejamento e Programação da Operação do Transporte Ferroviário de Carga**. Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas. Instituto militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.
- MELO, M. C. V. **Programação linear inteira aplicada no planejamento da alocação de vagões de carga**. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2008.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Projeto de reavaliação de estimativas e metas do Plano Nacional de Logística e Transportes**. Brasília: MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2012.
- PACHL, J. Timetable design principles. IN HANSEN, I. A.; PACHL, J. (ORG). **Railway timetable & Traffic**. Hamburg: Eurailpress, 2008.

- PEREIRA, O. C. **Soluções de otimização da eficiência energética de uma ferrovia de carga: caso da estrada de ferro Carajás**. Tese (Doutorado) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.
- ROUILLON, S.; DESAULNIERS, G.; SOUMIS, F. An extended branch-and-bound method for locomotive assignment. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 40, n. 5, p. 404-423, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2005.05.005>
- SALUM, L. J. B. **Energia Eficaz**. 360p. Belo Horizonte: CEMIG, 2005.
- SILVA, J. R. S. et al. **Comparação dos combustíveis diesel S10 e S500 para resolução de problemas em motores do ciclo diesel**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Belém, 2017.
- SU, R.; ZHOU, L.; TANG, J. Locomotive schedule optimization for da-qin heavy haul railway. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/607376>.
- TEICHMANN, D.; DORDA, M.; GOLC, K.; BÍNOVÁ, H. Locomotive assignment problem with heterogeneous vehicle fleet and hiring external locomotives. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/583909>
- THOMÉ, A. M. T.; HOLLMANN, R. L.; CARMO, L. F. R. R. S. Research synthesis in collaborative planning forecast and replenishment. **Industrial Management & Data Systems**, v. 114 n. 6, p. 949-965, 2014. . <http://dx.doi.org/10.1108/IMDS-03-2014-0085>.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP); ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ (ESALQ). **Uma árvore da Mata Atlântica chega a tirar 163kg de CO2 da atmosfera**. 2013. Disponível em: [http://www.esalq.usp.br/acom/clipping\\_semanal/2013/3marco/23\\_a\\_29/files/assets/downloads/page0013.pdf](http://www.esalq.usp.br/acom/clipping_semanal/2013/3marco/23_a_29/files/assets/downloads/page0013.pdf). Acesso em: 23 de julho de 2018.
- VAIDYANATHAN, B.; AHUJA, R. K.; ORLIN, J. B. The locomotive routing problem. **Transportation Science**, v. 42, n. 4, p. 492-507, 2008. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.1080.0244>
- XU, X.; LI, K. **Cooperation research for locomotives assignment and train scheduling problems**. Proceedings of 2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology, ICCSNT 2015, p.100-104, 2016.
- ZHANG, X.; MO, W.; WANG, B.; WANG, F.; GAO, P. Graph partition based decomposition approach for large-scale railway locomotive assignment. **Open Cybernetics and Systemics Journal**, v. 9, n. 1, p. 243-252, 2015. <http://dx.doi.org/10.2174/1874110X01509010243>
- ZIARATI, K.; SOUMIS, F.; DESROSIERS, J.; GÉLINAS, S.; SAINTONGE, A. Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America.

**European Journal of Operational Research**, v. 97, n. 2, p. 281-292, 1997.  
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00198-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00198-1)

ZIARATI, K.; CHIZARI, H.; NEZHAD, A. M. Locomotive optimization using artificial intelligence approach. **Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B: Engineering**, v. 29, n. B1, p. 93-105, 2005.