

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

SÉRGIO LUIZ DA SILVA CASSEMIRO

**PROCEDIMENTO PARA PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE
LOCOMOTIVAS**

**Rio de Janeiro
2017**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

SÉRGIO LUIZ DA SILVA CASSEMIRO

**PROCEDIMENTO PARA PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE
LOCOMOTIVAS**

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.

Orientadores:

Prof^a. Renata Albergaria de Mello Bandeira – D. Sc.

Prof. Adriano de Paula Fontainhas Bandeira – D. Sc.

Rio de Janeiro

2017

c2017

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	Cassemiro, Sérgio Luiz da Silva
C344p	Procedimento para planejamento de alocação de locomotivas / Sérgio Luiz da Silva Cassemiro; orientado por Renata Albergaria de Mello Bandeira; Adriano de Paula Fontainhas Bandeira – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2017. 129p.: il. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2017. 1. Curso de Engenharia de Transportes – teses e dissertações. 2. Planejamento de transportes. I. Bandeira, Renata Albergaria de Mello. II. Bandeira, Adriano de Paula Fontainhas. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

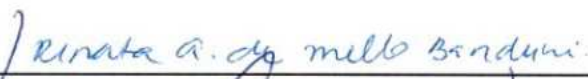
SÉRGIO LUIZ DA SILVA CASSEMIRO

**PROCEDIMENTO PARA PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE
LOCOMOTIVAS**

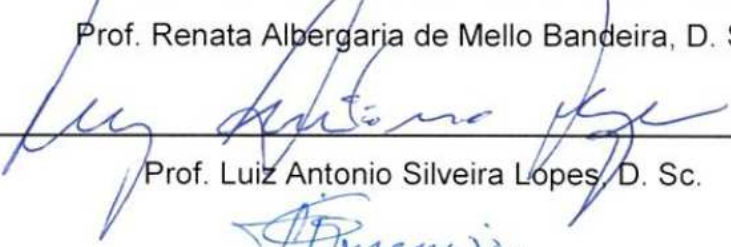
Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Prof^a. Renata Albergaria de Mello Bandeira – D.Sc.
Prof. Adriano de Paula Fontainhas Bandeira - D.Sc.


Aprovada em: 24 de Fevereiro de 2017 pela seguinte Banca Examinadora:



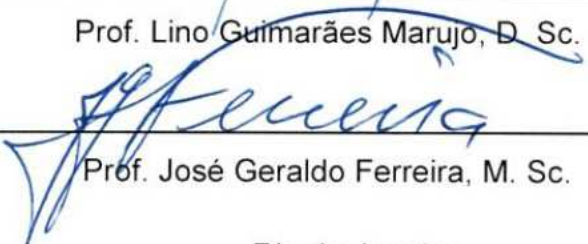
Prof. Renata Albergaria de Mello Bandeira, D. Sc.



Prof. Luiz Antonio Silveira Lopes, D. Sc.



Prof. Lino Guimarães Marujo, D. Sc.



Prof. José Geraldo Ferreira, M. Sc.

Rio de Janeiro
2017

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir viver este momento,

A professora Renata Albergaria de Mello Bandeira e Adriano de Paula Fontainhas Bandeira pela orientação e paciência durante todo o trabalho,

Aos professores Luiz Antônio Silveira Lopes, Lino Guimarães Marujo e a José Geraldo Ferreira por aceitarem fazer parte da Banca e contribuírem com meu aprendizado,

A todos os trabalhadores do Instituto Militar de Engenharia, em especial Sgt. Oazem e TC Marcelo Reis, por toda a atenção e dedicação prestada a essa honrosa instituição,

A minha esposa Poliana pela paciência, compreensão, incentivo e estímulo,

A minha família querida que sempre me incentivou e me deu suporte: Luiz, Rosane e Tamires,

A MRS Logística por me patrocinar, permitir e incentivar meu aprendizado e desenvolvimento. Aos meus gestores e colegas de trabalho por todo apoio e ajuda. Ao colega Marcelo Neder pela compreensão e por não medir esforços para que este momento chegasse,

Aos colegas de curso pelos anos trabalhando e estudando juntos, o apoio de todos foi essencial,

Muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	8
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SIGLAS	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivos.....	18
1.3 Estrutura da dissertação	18
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	20
2.1 Sistema de transporte ferroviário de carga.....	20
2.1.1 Via permanente	20
2.1.2 Centro de controle de tráfego	21
2.1.3 Material rodante.....	24
2.2 Locomotivas e capacidade de tração	26
2.2.1 Principais tipos de locomotivas e funcionamento básico	26
2.2.2 Esforço trator	28
2.2.3 Quadro de tração de trens.....	31
2.2.3.1 A escolha dos trechos	32
2.2.3.2 A determinação das resistências	33
2.2.3.3 A lotação bruta das locomotivas	36
2.2.3.4 A lotação ajustada	37
2.3 Formação de trens.....	40
2.4 A programação de locomotivas	41
2.5 Custos da operação ferroviária de carga e tarifação	43
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MODELAGEM PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS	51
3.1 Metodologia da pesquisa bibliográfica.....	51
3.2 Análise dos artigos selecionados.....	53
3.3 Características gerais do problema	57

3.3.1	Nível de execução do planejamento	57
3.3.2	Tipo de carga transportada.....	58
3.3.3	Quantidade e tipos de locomotivas tracionando	59
3.3.4	Agendamento de locomotivas e planejamento de alocação	60
3.4	Características das modelagens.....	61
3.4.1	Tipo de modelagem	61
3.4.2	Função objetivo	61
3.4.3	Tipos de restrições	62
3.4.4	Tipos de solução.....	63
4	DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS	67
4.1	As variáveis relevantes para a alocação.....	67
4.2	Procedimento de alocação de locomotivas.....	74
4.2.1	Seleção dos trens e levantamento de suas características gerais	75
4.2.2	Classificação da região critica	77
4.2.3	Agrupamento de locomotivas e quadro de blocagem de grupos tratores..	81
4.2.4	Custo unitário de manutenção	84
4.2.5	Matriz de eficiência energética	85
4.2.6	Informações de planejamento de transportes.....	89
4.2.7	Alocação dos grupos de tração	90
4.2.7.1	Função objetivo	91
4.2.7.2	Restrições básicas do modelo	94
5	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS	97
5.1	As etapas do processo de alocação de locomotivas	97
5.2	Tipo de trem.....	99
5.3	Tipo de locomotivas da frota.....	101
5.4	Blocagem dos grupos de tração	103
5.5	Custo unitário de manutenção e custo do diesel	106
5.6	Matriz de eficiência energética	107
5.7	Implementação computacional	110

5.8	Análise dos resultados.....	110
5.9	Análise de sensibilidade	114
5.9.1	Resumo final dos resultados.....	119
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	123
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	126

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 2.1	Esquema de componentes básicos da via permanente	21
FIG. 2.2	Foto do Centro de Controle de Operações Ferroviárias MRS Logística S.A.	22
FIG. 2.3	Ilustração de alguns tipos de vagões de carga.....	25
FIG. 2.4	Foto da locomotiva GE AC44i da MRS Logística S.A.....	26
FIG. 2.5	Esquema de uma típica locomotiva diesel-elétrica.	27
FIG. 2.6	Curva de Esforço trator de uma locomotiva.....	30
FIG. 2.7	Composição da tarifária nas ferrovias brasileiras	44
FIG. 2.8	Procedimento para avaliação dos custos de produção de uma ferrovia....	47
FIG. 2.9	Gráfico de tarifação baseada em custo fixo e variável de uma ferrovia de cargas.....	48
FIG. 4.1	Pilares do custo de operação de locomotivas.....	68
FIG. 4.2	Consumo por Ponto de Aceleração	74
FIG. 4.3	Etapas do Processo de Planejamento de Alocação de Locomotivas	75
FIG. 4.4	Exemplo de levantamento topográfico de uma via ferroviária (perfil longitudinal de rampas e curvas).....	79
FIG. 4.5	Agrupamento de perfis por trecho em rota de trem	80
FIG. 4.6	Curva de Consumo GE DC44i.....	86
FIG. 4.7	Visão temporal dos dados do Acelerador de uma locomotiva GE DC44I..	88
FIG. 4.8	Ilustração dos conceitos: trem, rota, ciclo e tabela.	90
FIG. 5.1	Rotas dos trens selecionados – parte 1.....	100
FIG. 5.2	Rotas dos trens selecionados – parte 2.....	101
FIG. 5.3	% do Tkb total coberto pelos trens selecionados.....	101
FIG. 5.4	Alocação manual de locomotivas	111
FIG. 5.5	Primeira alocação pela modelagem.....	113
FIG. 5.4	Primeira alocação pela modelagem com 10% a mais de disponibilidade	115
FIG. 5.5	Primeira alocação pela modelagem com 20% a mais de disponibilidade	117
FIG. 5.6	Primeira alocação pela modelagem com 30% a mais de disponibilidade	118
FIG. 5.7	Primeira alocação pela modelagem com 40% a mais de disponibilidade	119
FIG. 5.8	Gráfico de sensibilidade do consumo de diesel e custo de manutenção.	121
FIG. 5.9	Gráfico de sensibilidade do custo total e diferenças.....	122

FIG. 5.10 Gráfico de sensibilidade da Eficiência Energética Total 123

LISTA DE TABELAS

TAB. 2.1	Resistências Normais e Acidentais	35
TAB. 2.2	Capacidade de tração das locomotivas no perfil A quando combinadas	39
TAB. 3.1	Artigos selecionados para a revisão bibliográfica.....	53
TAB. 3.2	Resumo das informações dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica	66
TAB. 4.1	Exemplo de tabela com informações dos trens selecionados	77
TAB. 4.2	Classificação dos perfis da MRS Logística pela rampa compensada .	80
TAB. 4.3	Exemplo de Quadro de Blocação dos Grupos Tratores.....	83
TAB. 4.4	Exemplo de Matriz de Eficiência Energética dos grupos tratores por trem tipo	87
TAB. 5.1	Resumo dos Trens Selecionados.....	99
TAB. 5.2	Resumo do Agrupamento de Locomotivas.....	102
TAB. 5.3	Mapeamento de perfis críticos da rota do NEXP.....	103
TAB. 5.4	Quadro de Tração para Perfil J Resumido	104
TAB. 5.5	Quadro de Capacidade de Tração NEXP.....	104
TAB. 5.6	Quadro de Capacidade de Tração AUX-FA	105
TAB. 5.7	Quadro de Blocação dos Grupos Tratores.....	105
TAB. 5.8	Tabela de custo unitário de manutenção.....	106
TAB. 5.9	Tabela de Eficiência Energética dos grupos tratores por trem	109
TAB. 5.10	Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – alocação manual.....	112
TAB. 5.11	Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – alocação do modelo.....	114
TAB. 5.12	Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +10%	116
TAB. 5.13	Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +20%	117
TAB. 5.14	Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +30%	118

TAB. 5.15 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +40%
..... 119

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

PAL	Problema de Alocação de Locomotivas
PO	Pesquisa Operacional
PPL	Problema de Planejamento de Locomotiva
PPRL	Problema de Programação de Locomotivas
PRL	Problema de Roteamento de Locomotivas
EE	Eficiência Energética
PPCO	Planejamento, Programação e Controle Operacional
IME	Instituto Militar de Engenharia

RESUMO

O modo ferroviário, especificamente o de carga, além da sua relevância econômica, é caracterizado pelo transporte de elevados volumes por trechos geograficamente distantes, permitindo ganhos principalmente quando comparado ao modo rodoviário. Destaca-se a alta eficiência energética, apresentando consumo de combustível relativamente baixo com relação ao volume transportado, mas apesar disso os custos da operação ferroviária são expressivos sendo o próprio consumo de óleo diesel e o custo de manutenção os principais. A busca por boas práticas operacionais é constante para que as ferrovias se tornem cada vez mais competitivas na matriz de transportes. Entre tais práticas, destaca-se a decisão eficaz da alocação dos ativos (vagões e locomotivas), configurando uma das grandes alavancas para tornar as ferrovias cada vez mais eficientes. Este é um desafio que requer amplo planejamento das operações em níveis estratégico, tático e operacional, e além de bem elaborado, deve ser pautado em ferramentas de apoio à decisão.

Neste contexto, o presente trabalho propõe um procedimento para direcionar a decisão de alocação de diferentes tipos de locomotivas em diferentes tipos de trens focando na redução dos principais custos operacionais (combustível e manutenção). O procedimento proposto é descrito passo a passo, e passa por uma série de levantamentos de dados estatísticos, cruzamento de informações desde topografia da via, a características técnicas das locomotivas e dos trens. No último passo, que é a alocação das locomotivas, o trabalho propõe um modelo matemático de otimização que busca a minimização do custo. O objetivo final é facilitar o planejamento de alocação das locomotivas reduzindo o custo e direcionando as decisões. Uma aplicação prática do procedimento é realizada com os dados de uma ferrovia brasileira de transporte de cargas. Os resultados são apresentados e discutidos.

A análise final do planejamento permite afirmar que o procedimento pode trazer resultados positivos ao processo de planejamento facilitando o trabalho, criando critérios de decisão mais específicos e que trazem retorno financeiro.

ABSTRACT

The rail transportation mode, specifically cargo, has its economic relevance. Besides that, its characteristics are the transportation of high volumes of loads for geographically distant sections allowing winnings. Mainly when compared to the road transportation mode. Its high-energy efficiency is highlighted with a relatively low fuel consumption compared to the transported volume. Despite that the costs of the rail operation are pretty significant and the diesel oil consumption and maintenance are the main ones. The pursuit for good operational practices is a constant so that the railways become increasingly more competitive in the transport matrix. Among these practices is the effective decision to allocate the assets (cars and locomotives) which is one of the great levers to make railroads more efficient. This is a challenge that requires extensive planning of operations at strategic, tactical and operational levels. Beyond it being well-crafted, should be based on decision support tools.

In this context, the present work proposes a procedure to guide the decision to allocate different types of locomotives in different types of trains. It focus on reducing the main operational costs (fuel consumption and maintenance). The proposed procedure is described step by step and goes through a series of statistical data surveys and information analysis from track topography to technical characteristics of locomotives and trains. In the last step, which is the allocation of locomotives, the work proposes a mathematical model of optimization that seeks the cost minimization. The ultimate goal is to facilitate locomotive allocation planning by reducing cost and directing decisions. It is performed a practical application of the procedure with the data of a Brazilian freight railroad and the results are presented and discussed.

The final analysis of the allocation planning confirms that the proposed procedure can bring positive results to the planning process making it easier by creating a more specific decision criteria and a positive financial return.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil há predominância do transporte rodoviário, detendo grande participação na matriz de transportes. De acordo com o Ministério dos Transportes (2012), no relatório final do Plano Nacional de Logística e Transportes, a participação relativa do modo rodoviário é de 58%, o ferroviário de 25% e o hidroviário de 17%. Porém, o transporte ferroviário de carga no Brasil vem sofrendo grandes transformações nos últimos anos. Ações governamentais, como estabelecimento do Plano Nacional de Logística e Transportes (MT, 2007 e 2012), do Programa de Investimento em Logística – Ferrovias (PIL), na construção de trechos ferroviários como Ferrovia Norte-Sul (FNS) e Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL), de um novo marco regulatório para o setor ferroviário, demonstram que o transporte ferroviário tem importância estratégica para o país (MT, 2014).

Apenas no setor privado, a movimentação de cargas pelas ferrovias cresceu 78,5%, no período compreendido entre 1997 e 2013, decorrente de grandes investimentos realizados pelas concessionárias do transporte ferroviário de carga.

Numa comparação com os demais modais, o transporte ferroviário caracteriza-se por (BALLOU, 2004): (i) baixa velocidade média comercial para pequenas distâncias - pois gasta-se muito tempo com movimentação de materiais nos terminais de carga e descarga;(ii) alta variabilidade dos tempos de entrega - por necessitarem de via própria, esse modo não possui flexibilidade, sendo que qualquer impedimento na via causa grandes atrasos; e (iii) altos custos fixos e baixos custos variáveis - manutenção da via, material rodante e manutenção de terminais pesam nos custos fixos de uma ferrovia. Portanto, apesar de o transporte ferroviário se apresentar como uma alternativa viável para a movimentação de carga em larga escala em função de suas características, os custos dos ativos e os custos de operação são relativamente altos. Deste modo, estas vantagens só se concretizam com uma gestão eficiente dos meios disponíveis.

De acordo com Valec (2012), o consumo de óleo diesel e de manutenção, por exemplo, constituem os principais custos operacionais das empresas ferroviárias.

Devido a aumentos vertiginosos dos combustíveis derivados do petróleo no Brasil e aumento da blindagem de biodiesel (menos eficiente), no diesel comum nos últimos anos o modal perde em rendimento. Além disso, as constantes altas no valor do dólar e altos impostos de importação encarecem ainda mais as manutenções, já que boa parte dos insumos é importada. Enfim, o custeio das ferrovias foi ainda mais pressionado, obrigando as empresas ferroviárias a buscarem boas práticas operacionais para melhoria da eficiência operacional. Neste cenário de melhorias, dentre várias práticas, destaca-se a decisão eficaz da alocação dos ativos em uma ferrovia, que influencia de forma direta nos custos operacionais, tornando uma ferrovia mais ou menos eficiente sob vários pontos de vista.

Geralmente a demanda para o transporte ferroviário de carga, que no caso é o volume a ser transportado, é fornecida através de informações dos clientes, e assim, se sabe a quantidade de vagões e a frequência em que serão liberados. Porém, não existe a certeza e a comprovação de que as locomotivas são alocadas da maneira mais eficiente nas composições. Diversas vezes, ao mudar a configuração se obtém cenários melhores ou piores frente as modificações que acontecem e as mudanças de comportamento das variáveis.

A complexa atividade de planejamento e programação das locomotivas envolve a solução para as seguintes questões: (i) quais locomotivas devem ser alocadas para tracionar quais trens?; (ii) quais locomotivas devem ser alocadas a quais trens para serem rebocadas?; (iii) quais locomotivas devem viajar sem carga?; e (iv) dentre minhas opções de trens, onde alocar os diversos modelos levando-se em conta capacidade, eficiência, tecnologia embarcada, características físicas e restrições de via? De tal forma, trata-se de 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 operacionalmente eficientes. Desta maneira, um planejamento bem elaborado, pautado em algumas ferramentas de apoio à decisão que forneceria uma visão mais macro da situação (considerando custo geral), melhoraria o desempenho energético e financeiro das ferrovias, bem como a gestão de seus ativos quando comparados com as atuais regras de decisão.

1.1 JUSTIFICATIVA

O contexto ferroviário no Brasil indica uma participação cada vez maior na economia, exigindo aprimoramento constante dos métodos de gestão e a adoção de práticas que favoreçam o processo de tomada de decisão.

Com isso, o desafio de formar trens faz parte do cotidiano do planejamento de operações de uma ferrovia de transporte de cargas. O problema consiste em formar composições de acordo com uma série de critérios como: definição de itinerário a ser percorrido, resistência oferecida pelo perfil da via (curvas e inclinações da via), frequência dos trens, tamanhos de pátios e terminais de carga e descarga, forças e necessidades de tração. Tudo isso em conjunto com restrições operacionais como, esforço máximo permitido nos engates, forças máximas de choques de tração e compressão na composição, velocidades máximas, gabarito das locomotivas e vagões e determinações de segurança da ferrovia contribuem para a complexidade da solução do problema e para que a demanda em determinado período seja atendida (Gualda & Murgel, 2000).

Atualmente, nas concessionárias brasileiras, existem apenas critérios de alocação testados empiricamente ao longo dos anos pelos planejadores focando em um ou outro ponto de vista (consumo de diesel, disponibilidade, localização, por exemplo). Esses critérios são questionáveis e geram paradigmas que favorecem um ou outro viés, mas não o contexto global.

Além disto, operar com poucos recursos é uma característica geral nas companhias ferroviárias de carga e, nos casos das ferrovias brasileiras, isso se torna ainda mais evidente. A frota de locomotivas das concessionárias brasileiras é bem diversificada. Boa parte advém da antiga Rede Ferroviária Federal que foi privatizada em 1996, e outra parte foi adquirida logo após a concessão, sendo compradas usadas pelas ferrovias dos EUA, México, Canadá e etc. Apenas na última década, locomotivas novas, com tecnologia de ponta e bem mais eficientes

foram adquiridas, mas o uso da frota antiga ainda é essencial para transportar o volume. Somado a isso, a disponibilidade do material rodante é impactada pelas recorrentes manutenções, preventivas e corretivas, dadas pela idade avançada de alguns dos ativos e a necessidade da realização das manobras em pátios, que consomem também tempo significativo dos ativos.

Portanto, alocar locomotivas da melhor forma possível se torna uma decisão estratégica para as áreas de planejamento da operação e engenharia, podendo gerar redução de custos consideráveis possibilitando melhor atendimento e redução tarifária, atraindo mais clientes e cargas.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é desenvolver um procedimento para auxiliar na alocação de diferentes tipos de locomotivas em diversos trens tipos de uma ferrovia, considerando as variáveis (trajeto, volume transportado, ciclo, confiabilidade, custo de operação, manutenção, eficiência e etc), tornando-se uma ferramenta de suporte a decisão.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Considerando todos os aspectos apresentados na introdução e na justificativa, e para atender aos objetivos propostos, a dissertação foi dividida em 6 capítulos:

- **Capítulo 1:** trata da introdução do trabalho, apresentado o contexto da temática estudada; a justificativa, mostrando a importância e a motivação da pesquisa; seu objetivo e, por fim, a estrutura do trabalho.

- **Capítulo 2:** apresenta a revisão bibliográfica, em que são feitas abordagens teóricas a respeito dos conceitos necessários compreender para a execução deste trabalho. Aborda o transporte ferroviário de carga no Brasil e os fatores determinantes na eficiência energética e custos operacionais serão discutidos.
- **Capítulo 3:** é apresentada uma revisão bibliográfica métodos utilizados nos problemas de transportes e alocação, mostrando alguns trabalhos nacionais e internacionais já realizados na área do trabalho em questão.
- **Capítulo 4:** capítulo dedicado à descrição do procedimento desenvolvido, tendo como base a metodologia descrita no capítulo anterior e adotada neste trabalho. Esta seção apresenta etapa por etapa a orientação de levantamento de informações e critérios para a aplicação do procedimento e propõe na última etapa a aplicação de um modelo de otimização simplificado para ajudar na tomada de decisões.
- **Capítulo 5:** neste capítulo, é apresentada a aplicação do procedimento proposto como forma de mostrar a viabilidade do procedimento desenvolvido pautado em levantamentos estatísticos reais de uma ferrovia de transporte de cargas brasileira. 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 entre eles.
- **Capítulo 6:** são apresentadas as considerações finais a respeito do trabalho. As limitações encontradas durante o desenvolvimento do trabalho são apresentadas, bem como as recomendações necessárias.

Por fim, são citadas as referências bibliográficas que foram utilizadas na realização desta dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGA

Fontes Lima (1995) afirma que um sistema de transporte é composto por infraestrutura (vias e terminais), por veículos, por pessoas (usuários e trabalhadores), e um conjunto de processos interligados por uma organização gerando benefícios para seus usuários. Desta forma, o sistema de transporte ferroviário é essencialmente configurado pela interação dos seguintes elementos: vagões, nos quais a carga ou os passageiros são transportados; as locomotivas, que dão o poder de locomoção aos vagões; os trilhos, que se agrupam para formar as linhas sobre as quais as locomotivas e os vagões circulam; a tripulação ou equipagem, que opera o sistema ferroviário e as cargas ou passageiros, que são transportados.

Para Brina (1979), o sistema de transporte ferroviário é composto por três subsistemas: via permanente, controle do tráfego ferroviário e material rodante. A seguir são apresentados estes três subsistemas para o transporte ferroviário.

2.1.1 VIA PERMANENTE

A via permanente é a superestrutura da ferrovia, sendo constituída por subleito, sublastro, lastro, dormente, trilho e acessórios (BRINA, 1979). Os dormentes e o lastro têm a função de amortecimento, acomodando o sistema sob efeito das forças sofridas no momento da passagem do trem. A via permanente está sujeita ao

desgaste do contato entre as rodas dos veículos e os trilhos e deve ser trocada assim que for necessário de acordo com padrões de segurança e qualidade da ferrovia.

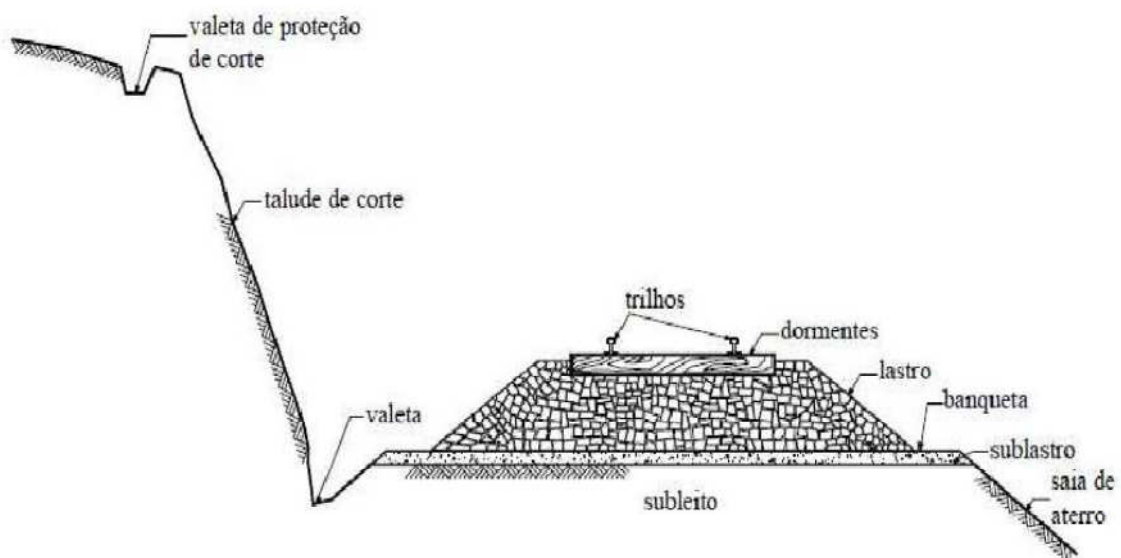


FIG. 2.1-Esquema de componentes básicos da via permanente
Fonte: (BRINA, 1979).

2.1.2 CENTRO DE CONTROLE DE TRÁFEGO

Os centros de controle de tráfego ou centros de controle de operação são responsáveis por sistemas de sinalização, telecomunicações e de licenciamento (permissão de movimento dos trens). O objetivo básico do Controle de Tráfego Ferroviário é fazer o transporte de pessoas e cargas de sua origem até seu destino de maneira segura e eficiente. As principais atribuições são definir prioridades de trens e ordenar o tráfego (AREMA, 2009).

O controlador de tráfego é o principal responsável pela movimentação dos trens, pois é o executor das tarefas de licenciamento, sinalizações e autorizações de movimentação dos trens em determinada região.



FIG. 2.2–Foto do Centro de Controle de Operações Ferroviárias MRS Logística S.A.

Fonte:(MRS Logística SA, 2014).

A movimentação dos trens depende dos seguintes critérios (THEEG & VLASENKO, 2009):

1. Como a licença de movimento é recebida pelo trem;
2. Como a via é liberada após a passagem de um trem.

O primeiro critério pode ser satisfeito de diversas maneiras:

- Entrega da licença manualmente ao maquinista em estações ao longo da via, sendo ela um bastão ou um documento de autorização de movimento;
- Autorização verbal seja ela dada pessoalmente em estações ou via rádio;

- Sinais ao longo da via, que com diferentes aspectos indicam ao maquinista se o mesmo deve proceder ou parar, ou até mesmo a velocidade máxima autorizada;
- Indicação dentro da cabine da locomotiva, podendo ser ela através de dispositivos luminosos que simulam um sinal ou mesmo nos equipamentos de bordo da locomotiva.

Cada uma das maneiras de licença de movimento está ligada com a evolução histórica das tecnologias de controle de tráfego ferroviário. Sendo as primeiras as mais primitivas e que permitem menor densidade de tráfego (espaçamento entre trens), e a última que fornece informações quase em tempo real e que permite maior densidade de tráfego.

O segundo critério, por sua vez, pode ser satisfeito de duas maneiras:

- Blocos fixos: a ferrovia toda é dividida em blocos onde apenas um trem por vez pode ocupar cada bloco. Assim a liberação de um bloco só se daria após a cauda do trem que o ocupa terminar seu trajeto dentro do bloco liberando-o assim para o próximo trem;
- Blocos móveis: a representação de bloco passa a não estar mais na via, mas sim na cauda da composição. Dessa forma, em termos de ocupação da via, um trem ocuparia apenas a parte da via onde o mesmo realmente se encontra.

A solução de blocos móveis permite uma densidade de tráfego muito maior que a outra. Todavia, como reduz o espaçamento entre trens, a tecnologia envolvida numa solução de blocos móveis é muito mais avançada e cara pois deve garantir a segurança.

2.1.3 MATERIAL RODANTE

Os veículos nas ferrovias são chamados de material rodante, subdividindo-se em material rodante de tração e rebocado. O material rodante rebocado são os veículos deslocados pelo material rodante de tração e se dividem em carros para passageiros (comuns, restaurantes, dormitórios, etc.), e vagões para carga e serviços de manutenção. Por sua vez, estes se subdividem em vários modelos como pranchas, fechados, graneleiros, tanques, etc. Cada um deles adequado ao transporte de um tipo específico de produto. Os principais tipos são:

- Vagão Fechado: revestido, sem revestimento, de descarga lateral, de escotilha para carregamento;
- Vagão Gôndola: *dumper* (descarga com *car-dumper* ou virador de vagões), portas laterais, fundo móvel (descarga), e tombantes (bordas tombantes);
- Vagão Hopper: aberto, fechado (granéis sólidos), tanque convencional e com proteção anti-corrosiva;
- Vagão Plataforma: cegonheiros para automóveis (com dois pavimentos), bobina, contêiner (convencional com piso metálico), para piggy-back (reboques rodoviários) e rebaixado para cargas de grandes dimensões;
- Vagão Tanque: convencional e para gases;
- Vagão Isotérmico: convencional;
- Vagão de Animais: convencional, com estrado e estrutura metálica.



FIG. 2.3—Ilustração de alguns tipos de vagões de carga.

Fonte:(Amstead Maxion, 2015).

O material rodante de tração é constituído por locomotivas, locotratores, automotrizes e carros-motores. Os dois últimos são em geral carros de passageiros com capacidade própria de propulsão, como metrôs e trens metropolitanos. Os dois primeiros servem apenas para movimentar o material rodante rebocado, variando o tipo de energia utilizada (diesel, eletricidade, etc.), a potência e a finalidade (carga, passageiro, mista).



FIG. 2.4-Foto da locomotiva GE AC44i da MRS Logística S.A.

Fonte:(MRS Logística SA, 2014).

Neste trabalho, o foco é o uso e aplicação do material rodante trator nos trens e sobre o impacto que as diversas possíveis combinações de uso podem causar. Portanto, as locomotivas são mais detalhadas a seguir.

2.2 LOCOMOTIVAS E CAPACIDADE DE TRAÇÃO

2.2.1 PRINCIPAIS TIPOS DE LOCOMOTIVAS E FUNCIONAMENTO BÁSICO

Segundo a ANTT (2016), existem diversos tipos de locomotivas, que atendem as mais diversas aplicações e necessidades. As pioneiras foram as locomotivas a vapor, que utilizam o vapor sob pressão para acionar os êmbolos que transmitem o movimento às rodas. Existem também as locomotivas elétricas apresentadas por Siemens em 1879, que captam a energia por um pantógrafo ou um terceiro trilho e alimenta os motores de tração localizados nos truques. O mesmo princípio se aplica aos trens unidade de passageiros utilizados nos sistemas de transporte metropolitano. Por fim, surgem os modelos híbridos, usualmente locomotivas diesel-

elétricas. Nessas locomotivas é utilizado um sistema que transforma energia mecânica dos motores a combustão em elétrica através de um gerador que alimenta motores de tração. Segundo Borba (2011), a corrente de saída do gerador alimenta os motores de tração acoplados aos eixos operando também quando a locomotiva opera em frenagem dinâmica (freio elétrico), e acoplado ao motor diesel está o Governador, responsável por manter constante a rotação do motor para todos os pontos de desaceleração de acordo com a necessidade de carga exigida pelo maquinista.

A tecnologia mais recente é a dos motores de tração a corrente alternada, que oferecem um ótimo desempenho para trens de cargas pesadas e densas que podem circular no limite da tração e em velocidades muito mais baixas. Isso se deve a facilidade do controle de velocidade e potência destes motores com o uso de inversores de frequência, porém na frota brasileira ainda existem muitos motores de corrente contínua em locomotivas mais antigas.

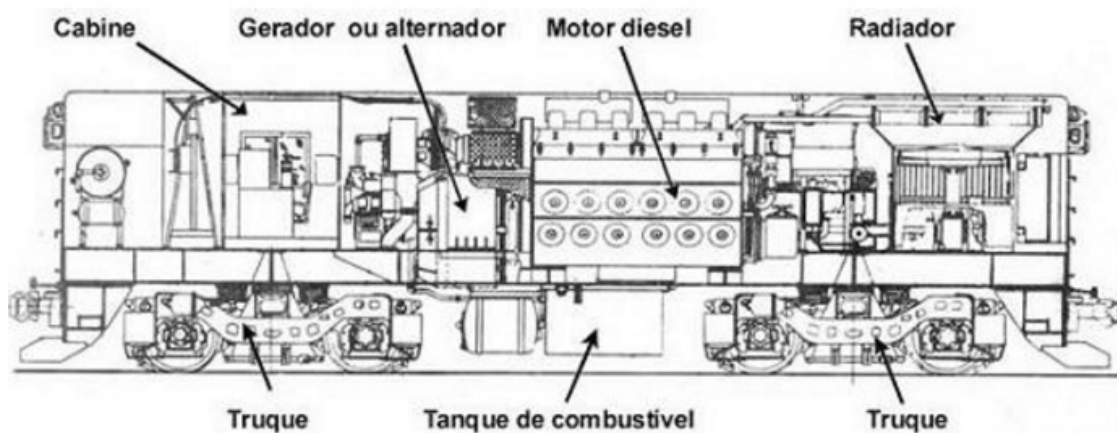


FIG. 2.5-Esquema de uma típica locomotiva diesel-elétrica.

Fonte:(ANTT, 2016)

2.2.2 ESFORÇO TRATOR

De acordo com Brina (1982):

Sob o ponto de vista mecânico, intervêm no transporte três grandezas principais:

1. A carga a ser transportada, dotada de peso Q , chamado peso útil, que deverá ser somada ao peso morto ou tara, que é o peso do recipiente (vagão) onde se coloca a carga útil;

2. O caminho a ser percorrido pela carga, representado pela estrada ou via de transporte;

3. A força a ser aplicada à carga total (peso útil mais tara) a fim de se conseguir o seu deslocamento sobre a via.

Para transportar é preciso vencer a resistência equivalente a força de atrito da carga com o solo. No caso de vagões, a força de atrito de rolamento da roda com o solo. Brina (1982), afirma que a equação desta força é dada por:

$$F = P \cdot f_r \quad \text{EQ. 2.1}$$

Sendo:

F : a força tratora;

P : peso total (carga somada a tara);

f_r : coeficiente de atrito de deslizamento.

Este coeficiente é o que torna o transporte melhor ou pior, pois quanto mais baixo, mais chance terá o meio utilizado de ser mais eficiente. O autor afirma que

para pneus com pavimento liso, o coeficiente é no máximo 0,01, enquanto que para o contato de rodas de aço com trilhos de aço o f_r chega a 0,0025, ou seja, para um mesmo peso a ser transportado na ferrovia se faz um esforço quatro vezes menor que numa rodovia. A vantagem vai diminuindo a medida em que a inclinação da via vai aumentando, o que sugere rampas menores em ferrovias para que se consiga aproveitar ao máximo a vantagem fornecida pelas características do atrito de deslizamento.

A aderência, que é o atrito estático antes que haja algum deslocamento, é outra propriedade fundamental para que o movimento ocorra. Quanto maior este coeficiente de atrito estático, mais força se pode fazer no eixo para que o trem entre em movimento sem que ocorra deslizamento de rodas ou patinação. Os valores de f dependem da condição do trilho (sujo, limpo, molhado, seco, com óleo, orvalho ou graxa), e da velocidade, que devido a diversos fatores, quanto maior a velocidade menor é f . Relacionando potência com os conceitos de força e aderência, Brina (1982) chega a seguinte formulação a respeito do esforço trator:

$$F = \frac{273,24 \cdot W_{HP}}{V} \quad \text{EQ. 2.2}$$

Sendo:

F: força ou esforço trator;

W_{HP} : potência em HP;

V: velocidade da composição.

Portanto, verifica-se que para uma determinada quantidade fixa de potência disponibilizada, o esforço necessário para deslocar a carga determina a velocidade do trem. Ou seja, quanto mais rápido estiver, menos força se faz para deslocar a

carga. A constatação e utilização destes princípios são dados pelas curvas características de esforço trator das locomotivas fornecidas pelos fabricantes.

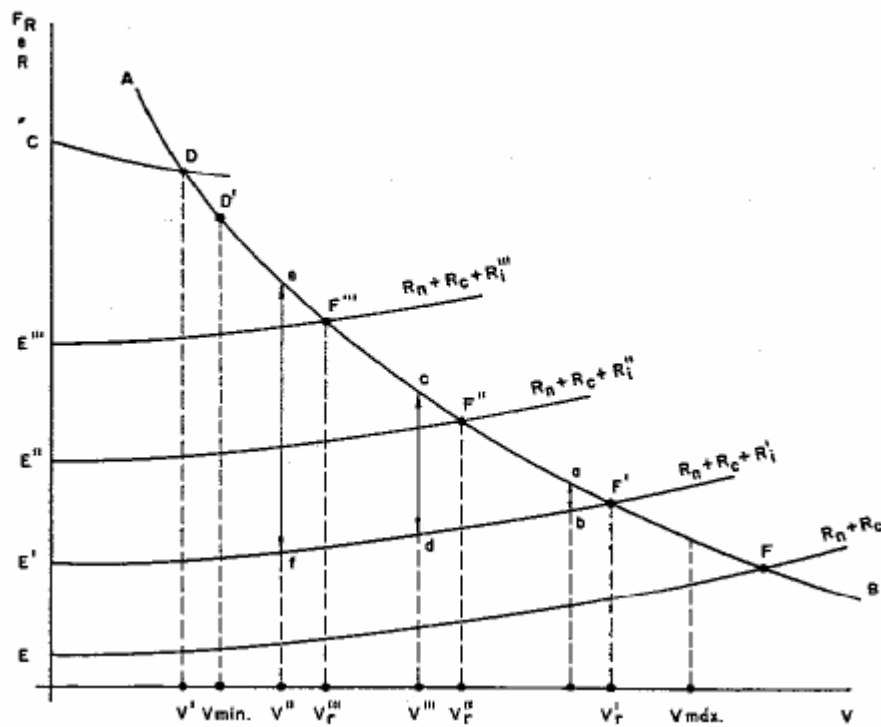


FIG. 2.6—Curva de Esforço trator de uma locomotiva.

Fonte: (Brina, 1982).

Na figura, a curva AB é a curva de esforço trator que uma locomotiva genérica pode disponibilizar. À baixas velocidades, a força que ela pode fazer é limitada por sua aderência. Ao superar a limitação da aderência, ocorre o deslizamento de rodas (patinação). Isso ocorre no segmento AD , sendo que a curva CD é a limitação de força por aderência desta locomotiva em condições ideais (trilho limpo e seco).

O ponto D' é o máximo esforço contínuo que a locomotiva pode oferecer de forma continuada sem ser danificada. É chamado de esforço trator uni-horário, tendo a velocidade definida como velocidade mínima de regime uni-horário.

O limite de velocidade máxima é dado pelas limitações construtivas dos motores de tração como rotação máxima de eixos e rolamentos, limites de temperatura e etc.

As inclinações e curvas que se colocam a frente do trem incrementam resistências ao movimento além de seu próprio peso e atrito. As curvas EF, E'F', E''F'' e E'''F''' , representam estas resistências. Os pontos de cruzamento remetem ao esforço trator necessário para manter a movimentação da carga no eixo vertical, e a velocidade em que a composição irá se estabilizar no eixo horizontal. O ponto será uma condição constante que irá igualar o trem na determinada velocidade até que alguma condição mude, como por exemplo, a inclinação da via, o fim de uma curva ou a disponibilização de mais ou menos potência por parte das locomotivas.

2.2.3 QUADRO DE TRAÇÃO DE TRENS

Para a formação de um trem, é necessário respeitar as condições apresentadas na curva da Figura 8, sendo que, muitas vezes, é necessária uma combinação de várias locomotivas, formando um grupo trator de acordo com disponibilidade de modelos, carga e rota a ser percorrida. Com isso, a partir de estudos da geografia da rota - basicamente inclinações da via e curvaturas existentes - e das locomotivas, as ferrovias montam o chamado Quadro de Tração. Esta ferramenta é fundamental para as decisões operacionais em nível de programação quanto ao grupo trator a ser utilizado para cada trem que será formado num determinado horizonte.

A ferramenta se baseia no cálculo das resistências que o trem deve vencer para cumprir seu trajeto, sejam elas de curva, de gravidade, de atrito no rolamento de vagões e locomotivas, de aerodinâmica e etc. Com isso, determina-se a sobra de capacidade tratora (esforço trator), disponível para tracionar os vagões.

A existência do Quadro de Tração, conforme aponta Brina (1982) apoia-se na necessidade de se obter o máximo de aproveitamento da capacidade de tração das locomotivas, sem prejuízos das suas partes componentes. São quatro as etapas para elaboração do Quadro de Tração:

1. A escolha dos trechos;
2. A determinação das resistências de rampa, curva e etc;

3. A lotação bruta da locomotiva e;
4. A definição da lotação ajustada, também chamada de carro fator.

2.2.3.1 A ESCOLHA DOS TRECHOS

Uma mesma malha ferroviária tem diversos perfis de linha em seus diversos segmentos e, para cada um deles, tem-se uma necessidade de tração diferente. Essas características geográficas da malha ferroviária interferem diretamente no desempenho das locomotivas, imprimindo maior ou menor esforço à composição.

Segundo Monteiro Filho (1955), toda mudança de perfil implica em alterar o número de vagões na composição. As mudanças são características de cada ferrovia e devem ser consideradas na escolha de limite para a faixa de um perfil. Para efeito de ganhos na circulação do trem, pode-se considerar o maior perfil entre estações em um trecho heterogêneo. O maior perfil dará a formação mais restritiva, evitando a parada do trem por falta de tração e a sobra de tração nos menores perfis seria compensada pela maior rapidez na circulação dos trens.

Procura-se dividir as linhas em trechos, limitados por estações que permitam modificar a composição do trem, cujas características técnicas de planta e perfil sejam aproximadas, procurando, entretanto, evitar grande número de divisões, pois, em um trecho contendo uma variedade muito grande de perfis de tração, seria necessário acrescentar e retirar locomotivas quase que seguidamente.

Os perfis da via geralmente são agrupados pela rampa compensada, que é a soma de todas as resistências acidentais (inclinações e curvas). O perfil mais crítico dentre determinado segmento de pátios é adotado. Posteriormente na seção 4.2.2 a Figura 4.4 mostra um exemplo de mapeamento topográfico de uma via, a classificação de rampa compensada adotada por uma empresa ferroviária de cargas, e a Figura 4.5 mostra um exemplo de representação gráfica de uma rota de trem desenhada nos dois sentidos de circulação para a identificação do perfil mais crítico.

2.2.3.2 A DETERMINAÇÃO DAS RESISTÊNCIAS

Existe um conjunto de forças chamadas de resistências que se opõe ao movimento dos trens, na qual a unidade é dada por Kgf/ton. Segundo Hay (2000), elas estão divididas em dois grupos: resistências normais e resistências acidentais.

As resistências normais são aquelas próprias do material rodante. O cálculo desse grupo de resistências, como aponta Hay (2000), é feito com a aplicação da fórmula experimental de Davis que em função do veículo assume as duas formas expressas na Tabela 2.

A constante proporcional à velocidade no vagão (termo central) é maior do que a da locomotiva, pois o vagão sendo rebocado, está sujeito aos movimentos parasitas do trem. Já a constante proporcional ao quadrado da velocidade é maior na locomotiva, pois ela sofre o ataque frontal do ar e o vagão não. Estas constantes e as demais obtidas nas fórmulas foram definidas por experiência e práticas ao longo do tempo, como apontam Bastos (1981) e Brina (1982).

Outro fato apontado por Brina (1982) e Bastos (1981) é que a taxa de resistência normal para vagões vazios é maior do que a dos respectivos vagões carregados. Isso ocorre porque o vagão vazio tem menor inércia, estando sujeito a maiores variações quanto ao seu movimento. Ou seja, para um mesmo esforço de tração, a locomotiva rebocará mais Kgf/ton com todos os vagões carregados do que se todos estivessem vazios.

Já as resistências acidentais estão presentes de maneira intermitente, pois dependem das condições climáticas, dos acidentes geográficos e das condições operacionais. Elas são resultantes de alterações das condições de tração e perfil da via ou alterações do movimento (inércia e aceleração). Este grupo se subdivide nas seguintes resistências: de curva, de rampa e de aceleração.

A formulação da resistência de curva é obtida através de fórmulas empíricas, após observações de experiências ao longo de vários anos. Conforme Bastos

(1981), este cálculo se baseia no G_{20} ¹ de uma curva multiplicada por uma constante. Quanto maior o G_{20} , mais fechada é a curva e menor o seu raio.

Quanto a resistência oferecida pelas rampas, o esforço para deslocar um corpo em uma rampa é no mínimo igual à resistência oferecida ao ser deslocado para subir a rampa. Em ferrovia, as rampas são muito pequenas, inferiores a 3%. Exceto em alguns casos como a Serra da Cremalheira, no estado de São Paulo, onde se encontra uma rampa de 10% de inclinação. Para rampas assim o sistema de tração utilizado é diferente do convencional (também chamado de chamado de simples aderência).

Assim, a resistência total é a soma:

$$R_T = R_N(\text{normal}) + R_C(\text{curva}) + R_I(\text{rampa}) + R_A(\text{aceleração}) \quad \text{EQ. 2.3}$$

As formulações são aplicadas separadamente para cada locomotiva e vagões, bem como para cada sentido de circulação.

¹ É o "grau da curva circular" ao ângulo central compreendido entre uma corda de 20 metros (distância linear entre duas estacas consecutivas). $G_{20} = 1145,92 / \text{Raio}$

TAB. 2.1 Resistências Normais e Acidentais

Tipo de Resistência		Fórmula	Definições
Normal	Resistência Normal / Locomotivas	$R_{NL} = 0,65 + \frac{13,2}{P} + 0,00931 \times V + \frac{0,00453 \times A \times V^2}{n \times P}$	P = peso por eixo do veículo em toneladas;
	Resistência Normal / Vagões	$R_{NV} = 0,65 + \frac{13,2}{P} + 0,01395 \times V + \frac{0,000944 \times A \times V^2}{n \times P}$	V = velocidade em Km/h; A = área frontal do veículo em m ² ; n = número de eixos do veículo
Acidental	Resistência de Curva (atrito) / Locomotiva	$R_{CL} = 0,2 + \frac{100}{R} (B + b + 3,8)$	R = raio da curva em metros; B = base rígida da locomotiva em metros; b = bitola da via em metros.
	Resistência de Curva (atrito) / Vagão - bitola de 1,6m	$R_{CV} = 0,65 \times G_{20}$	G ₂₀ é o grau da curva para uma corda de 20 metros. $G_{20} = \frac{1146}{R}$
	Resistência de Curva (atrito) / Vagão - bitola de 1,0m	$R_{CV} = 0,54 \times G_{20}$	
	Resistência de rampa	$R_I = 10 \times i$	i = valor da rampa em %
	Resistência de aceleração (inércia)	$R_A = 31,1 \times A$	A = aceleração em Km/h/seg. Se A em m/seg ² multiplica-se por 0,278 e encontra-se em Km/h/seg

2.2.3.3 A LOTAÇÃO BRUTA DAS LOCOMOTIVAS

Segundo Brina (1982), a lotação bruta define quantas toneladas uma locomotiva ou um conjunto de locomotivas podem tracionar em determinada região. Ao formar um trem, o programador de trens precisa saber quantas toneladas podem ser tracionadas por este grupo trator ou que potência é necessária para deslocar determinada carga pois nem toda potência desenvolvida por uma locomotiva está disponível no engate da mesma. A resistência da locomotiva tem que ser substituída do Esforço Trator (ET) pelo Esforço Trator no Engate (ETE), a força disponível para puxar os vagões. Isso porque parte da energia é gasta para superar as resistências internas, incluindo perdas no motor, perdas por calor nos geradores e motores e energia consumida nos circuitos auxiliares como compressor de ar, iluminação, ar condicionado, etc. Ainda, a locomotiva precisa superar sua resistência própria no mancal e do flange (eixo) tracionando ela mesma.

O esforço de tração que uma locomotiva terá que desenvolver para tracionar um trem e vencer as resistências é determinado por:

$$F = P \times R_T \qquad \text{EQ. 2.4}$$

Onde:

P = peso bruto do trem em toneladas

R_T = somatório das resistências em Kgf/ton

Este esforço de tração máximo, dado em quilograma-força, está associado à velocidade de regime contínuo da locomotiva. Nesta velocidade, a locomotiva pode

se deslocar continuamente, sem trazer danos para os motores de tração. Com esta velocidade, ela desenvolve o maior esforço de tração nas rodas da locomotiva. O resumo final é o gráfico de potência, contendo as velocidades associadas ao esforço de tração disponível no engate da locomotiva ilustrado na Figura 8, que os fabricantes fornecem. Este gráfico representa uma envoltória de pequenas curvas de potência, devido à associação dos motores de tração, ora ligados em série, ora em paralelo. A curva que melhor passa pelos pontos é uma curva logarítmica.

2.2.3.4 A LOTAÇÃO AJUSTADA

Ainda de acordo com Brina (1982) e Bastos (1981), os trens podem ser compostos apenas por vagões carregados, por parte de vagões carregados ou somente por vagões vazios. Como mostrado pelas fórmulas de Davis, as taxas de resistências variam inversamente com o peso. Um cálculo de lotação (quantidade de toneladas a ser transportada), baseado em vagões vazios, com alta resistência, acaba subdimensionando a capacidade da locomotiva quando rebocando vagões carregados em uma mesma quantidade de toneladas. Da mesma forma que uma lotação baseada em vagões carregados excederá a capacidade da locomotiva quando os vagões vazios são utilizados. Evidentemente, neste caso, haverá muito mais vagões vazios para que a lotação calculada seja atingida. Uma solução para o problema seria o uso de um fator de ajuste aplicado aos vagões de qualquer peso para equalizar o esforço no engate da locomotiva. Com isso, utiliza-se o Carro Fator, que é um valor adicional, fictício, a ser somado ao peso bruto de cada veículo para compensar estas diferenças entre carregados e vazios e garantir que não haverá parada por falta de força de tração.

O carro fator é obtido a partir das lotações do trem formado exclusivamente com vagões vazios e com vagões carregados. Considerando-se a tara e o carregamento do “vagão virtual”, obtém-se o número de vagões vazios e de vagões carregados, por sentido, no trem respectivo.

Na operação ferroviária os trens podem ser formados por veículos vazios, carregados e parcialmente carregados. Além disto, em alguns trens, pode haver uma heterogeneidade no material de transporte, com variação acentuada no peso total de cada veículo. Diante disso, podemos dizer que $P' < P$ e $N' > N$, e daí surge a seguinte relação:

$$K = \frac{P - P'}{N' - N} \quad \text{EQ. 2.5}$$

O que resulta em:

$$P + KN = P' + KN' \quad \text{EQ. 2.6}$$

P = peso de um trem com vagões carregados;

P' = peso de um trem com vagões vazios;

N = quantidade de vagões carregados;

N' = quantidade de vagões vazios.

Onde o valor K recebe a denominação de carro-fator e a expressão $P + NK$ a de lotação ajustada que é o peso total da composição de vagões rebocados somados ao produto do número de vagões pelo carro fator do trecho considerado.

Ao utilizar o carro fator, é necessário somente adicionar ao peso do vagão o valor do carro fator K e o peso assim obtido é adicionado até que a soma do peso assim combinado seja igual à tonelada ajustada ou unidades oferecidas. É importante perceber que o carro fator varia com a rampa para determinada velocidade, portanto é projetado para o trecho crítico.

Bastos (1981) afirma que algumas ferrovias ainda utilizam de um adicional de cerca de duas toneladas por vagão de minério, considerando que em situações de chuva, este é o peso médio em que um vagão gôndola aberto pesa a mais devido ao acúmulo de água que umedece a carga.

Como resultado das quatro etapas, obtêm-se o quadro de tração. De forma gráfica, o quadro de tração traz as capacidades de tração do grupo trator para que os trens sejam montados, de acordo com cada perfil previamente classificado, dadas as diversas combinações de locomotivas e suas velocidades mínimas de regime contínuo. No caso, a velocidade que se sobressai será a maior, pois limitará a locomotiva que conseguiria andar em velocidade menor fazendo maior esforço.

TAB. 2.2 Capacidade de tração das locomotivas no perfil A quando combinadas

	Variação da Tonelagem Rebocável em função das Velocidades de Regime Contínuo (km/h)													
	GE U23C	GM SD18	GE U23CA	GM SD40-2	GE U23C1	GE C30-S7	GE C36-7	GE C30-7SF	GM SD40-3	GE C36ME	GM SD38	GE C30-7MP	GE U20C	GE C36ME-S7
	12,9	13,0	13,1	13,9	14,5	15,2	15,2	15,2	15,6	15,7	15,8	16,5	18,5	19,0
GE U23C	1.200	1.180	1.161	1.143	1.096	1.064	1.064	1.064	1.046	1.036	1.025	990	905	879
GM SD18		992	988	949	909	870	870	870	850	845	840	795	697	674
GE U23CA			1.460	1.402	1.325	1.286	1.286	1.286	1.247	1.237	1.228	1.170	1.034	996
GM SD40-2				1.377	1.360	1.342	1.342	1.342	1.324	1.321	1.319	1.297	1.200	1.173
GE U23C1					1.108	1.078	1.078	1.078	1.060	1.050	1.040	1.004	919	893
GE C30-S7						1.376	1.376	1.376	1.359	1.350	1.341	1.275	1.174	1.147
GE C36-7							1.376	1.376	1.359	1.350	1.341	1.275	1.174	1.147
GE C30-7SF								1.376	1.359	1.350	1.341	1.275	1.174	1.147
GM SD40-3									1.458	1.321	1.319	1.297	1.200	1.173
GE C36ME										1.447	1.438	1.410	1.278	1.243
GM SD38											970	928	802	773
GE C30-7MP												1.437	1.302	1.267
GE U20C													829	813
GE C36ME-S7														1.438

Como exemplo, a locomotiva GE U23CA possui velocidade mínima de regime de 13,1 km/h, pode ser combinada com uma GEC36 ME-S7 de velocidade de regime de 19 km/h. Neste caso, pela diferença de velocidade mínima de regime, as locomotivas terão que respeitar a velocidade da locomotiva mais restritiva, no caso, da GE C36 ME-S7 que é de 19 km/h. A GE U23 CA, irá tracionar apenas 996 toneladas, sendo que uma combinação de duas GE U23CA, sem necessidade de aumento da velocidade, faria cada uma tracionar 1.460 toneladas. Ou seja, no

trecho de perfil A com duas GE U23 CA pode-se tracionar um trem de 2.920 ton (2 vezes 1.460 toneladas para cada). Já a combinação de uma GE U23CA e uma GE C36 ME - S7, confere uma possibilidade de tração de 2.434 toneladas (sendo 996 ton da U23 e 1.438 toneladas da C36 ME-S7). Considerando que as U23 possuem 2.300 HP de potência e a C36 ME-S7 possui 3.600 HP, vê-se que o aproveitamento de potência nos dois grupos de tração é diferente, sendo bem mais desfavorável na segunda opção. Toda combinação com locomotivas de diferentes velocidades mínimas de regime causa perdas de esforço trator e menor aproveitamento de potência.

2.3 FORMAÇÃO DE TRENS

Em sistemas ferroviários, existem, tipicamente, duas formações de trem bem distintas entre si: os trens unitários e os trens mistos. Os trens unitários são aqueles que, como o nome sugere, possui somente um tipo de vagão em toda a composição e transporta apenas um produto e para um único cliente. Esses trens costumam operar em sistema carrossel, ou seja, sempre em trânsito entre um terminal de carga e um de descarga, sem paradas intermediárias. Os produtos transportados por trens unitários costumam ser granéis com baixo valor agregado e com forte demanda. Tempo de ciclo entre duas cargas e o número de composições disponíveis para atender determinado cliente são o que definem a capacidade de transporte destes produtos.

Os trens mistos, em contrapartida, são aqueles que transportam diversas cargas em diversos vagões. Quase sempre as diferentes cargas pertencem a diferentes clientes. Esses trens operam com itinerário e hora marcada de acordo com a demanda dos clientes. Os produtos transportados por trens mistos têm maior valor agregado, sendo muitas vezes produtos manufaturados de alta tonelagem. (AREMA, 2009)

2.4 A PROGRAMAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Machado (2006) define a atividade de programação de locomotivas como o processo de alocar um conjunto de locomotivas para atender aos trens programados em um dado horizonte de tempo. Para tal, é necessário considerar o número de locomotivas existentes em cada tipo de frota, necessidades de abastecimento e manutenção, tração requerida para deslocamento de cada trem e capacidade de tração das locomotivas.

Rouillon (2006) e Ziarati (1997) afirmam existir dois níveis de decisão para a programação de locomotivas:

- Nível Operacional: é definido que locomotiva deve ser alocada em cada composição no pátio em que se encontra;
- Nível Tático ou Planejamento: Avalia os diferentes cenários e trens tipo podendo definir a melhor forma de atender a demanda de locomotivas nos pátios formadores de trem, complementando assim a análise de fluxo de locomotivas.

Segundo Machado (2006), o problema é encontrado em nível tático e 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 demanda e disponibilidades planejadas.

No nível operacional, o problema consiste em decidir quais locomotivas serão alocadas a cada trem no dia a dia levando em conta as variáveis e restrições que estão em jogo no momento, como a necessidade de abastecimento e condição de funcionamento. Um exemplo pode ser ilustrado supondo que uma locomotiva possua combustível suficiente apenas para viajar por mais 300 Km e que um trem

potencial para fazer a alocação só vai passar por um ponto de abastecimento em sua rota após percorrer 500 Km. Logicamente não é possível alocar aquela locomotiva ao trem.

Outra questão considerada no nível operacional é a manutenção, uma vez que todas as locomotivas precisam passar por manutenções regularmente e cada uma tem seu calendário próprio. É necessário verificar se a decisão de alocação em determinado trem respeita a necessidade de manutenção das máquinas, como passagem por oficina em tempo hábil ao vencimento do prazo por exemplo.

O tempo de circulação e sua incerteza é outra questão que deve ser considerada na programação de locomotivas de nível operacional. Ao contrário do nível tático em que se adota a premissa de que todos os trens circulam segundo o tempo planejado, no nível operacional na maioria das vezes isto não acontece. Incorporar esta incerteza nos tempos de circulação e atualizar a alocação das locomotivas adequadamente a um custo mínimo é uma das grandes dificuldades da programação em um nível operacional.

Quando um trem chega ao seu destino, todo o conjunto de locomotivas pode ser acoplado e outro trem que está de partida ou são separadas e agrupadas com outras provenientes de outros trens para que então possam ser anexadas a trens posteriormente. A conexão direta é sempre mais desejada, pois no outro caso, mais variáveis e manobras são envolvidas no contexto e a vulnerabilidade ao atraso dos trens é maior.

Seguindo este raciocínio e de acordo com Hamacher (2005), é possível verificar que os problemas de alocação de locomotivas podem ser caracterizados como problemas locais para nível operacional, dado que a alocação das locomotivas sofre grande influência das operações dos pátios e possui alto impacto no tempo de permanência das composições ferroviárias nos mesmos e a disponibilidade e condição das mesmas muda constantemente.

Sob a perspectiva do nível tático, verifica-se que a alocação de locomotivas pode ser facilmente compreendida como um problema global de curto prazo, em que decisões podem ser previamente direcionadas e tomadas previamente de maneira

macro, levando-se em conta o maior número de detalhes de possível, no intuito de atender a planos previamente definidos, planos estes, neste caso, representados, por exemplo, pelos quadros tração e modelos de trem tipo² e formações adotados pela ferrovia.

O desequilíbrio entre oferta e demanda de locomotivas nos locais e horários em que são necessitadas são causa da falta e sobra de locomotivas em determinados pátios. Desta forma, o direcionamento prévio dos modelos pode ser feito reduzindo-se o número de limitações.

2.5 CUSTOS DA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA DE CARGA E TARIFAÇÃO

O atual modelo de concessão do serviço público de transporte ferroviário de cargas consagrou um regime tarifário denominado regime de preços máximos (*pricecap*), pelo qual os serviços são regulados pelo preço, segundo regras econômicas. Nesse contexto, a ANTT realiza a regulamentação do processo de tarifação do transporte, onde são estabelecidos tetos tarifários, tendo como base para o estabelecimento destes tetos os custos operacionais existentes (ANTT, 2011).

Segundo a ANTT (2011), o custo incorrido pela indústria ferroviária para realizar o transporte em fluxo é formado por três parcelas distintas, quais sejam: custo fixo, custo variável e despesas. Essas parcelas somadas ao custo do capital, dado pela taxa de remuneração de cada concessionária, que também é rateado por fluxo, e à parcela referente aos impostos, compõem a metodologia de aferição dos custos totais ferroviários, e, portanto, constitui a tarifa ferroviária, representada pela Figura 9 e adotada pelas chamadas concessionárias de referência.

²Por definição, trem tipo é um trem com rota (origem, destino e trajeto), e cargas específicas.



FIG. 2.7—Composição da tarifária nas ferrovias brasileiras

Fonte: (ANTT, 2011)

De acordo com Corrar *et al.* (2009), todos os métodos de custeio objetivam determinar o custo unitário de cada bem ou serviço produzido por uma empresa. Para tanto, eles partem das configurações dos custos diretos e indiretos. Os métodos procuram atribuir os gastos apresentados pela organização para cada um dos bens ou serviços produzidos e para tal existem as classificações:

- Custos Diretos: custos de insumos aplicados aos produtos, nos quais são dimensionados monetariamente e a eles apropriados. Essa apropriação pode ser direta (sem rateio). Sob um aspecto geral, se identificam aos produtos e variam proporcionalmente às quantidades produzidas (ex. matérias primas, embalagens)
- Custos Indiretos: para serem incorporados aos produtos, obedecem a uma mecânica de apropriação, ou seja, necessitam de algum critério de rateio (ex. aluguel do prédio onde se situa a fábrica).
- Custos Fixos: independem da quantidade produzida pela empresa, ou seja, o nível de atividade ou produção. Seu total não varia proporcionalmente ao volume produzido. Não variam ao variarem as quantidades produzidas ou vendidas (ex. aluguel de um prédio). Em geral,

não são eternamente fixos, podendo variar em função de grandes oscilações no volume de produção.

- Custos Variáveis: começam a existir quando a empresa inicia a produção e venda de seus produtos. Dependem da quantidade produzida, variando proporcionalmente ao volume produzido.

Da estrutura de custo das empresas ferroviárias, desenvolveu-se metodologia de aferição e rateio de custos operacionais ferroviários por fluxo de transporte (mercadoria) e por concessionária, baseados nos dados que a Agência dispõe, obtida de informações originadas de dados fornecidos pelas concessionárias ao Agente Regulador. De acordo com a ANTT (2011), a metodologia desenvolvida permite obtenção de valores unitários (por tonelada) dos custos avaliados para os fluxos de transportes de cargas operados na malha federal concedida e está baseada na visão conjunta de duas dimensões:

- Dimensão operacional: que determina “o que” e “o como” foi feita a produção. Os dados operacionais refletem o “esforço” despendido para a produção do transporte e diz respeito às especificidades de operação das concessionárias, levando em consideração, por exemplo, fluxos operados, mercadorias transportadas, tipos de vagão utilizados para cada produto, frota de vagões, entre outros. A partir dessas informações foram criados indicadores denominados “drivers” operacionais que medem a utilização dos ativos.
- Dimensão econômico-financeira: que quantifica os dispêndios efetuados para alcançar determinada produção. Através da seleção e organização dos dados contábeis, de forma semelhante ao componente operacional, foram criados “drivers” financeiros que resumem os custos e despesas das concessionárias.

A essência do método consiste, portanto, em alocar os gastos proporcionalmente ao esforço de produção associado. A partir da integração dos dois componentes descritos anteriormente, são obtidos os custos por unidade operacional, que aplicados à produção de cada concessionária retornam os custos incorridos por elas com a operação de cada fluxo.

Assim, após a conclusão da metodologia desenvolvida pela ANTT, a mesma implementou uma ferramenta computacional denominada de Sistema de Custos Operacionais Ferroviários – SICOF, visando auxiliar o trabalho da ANTT na revisão das tabelas tarifárias.

Por fim, a tabela tarifária de um determinado produto pode ser representada a partir de equações que correspondem a uma determinada faixa quilométrica, conforme mostrado na Figura 2.9.

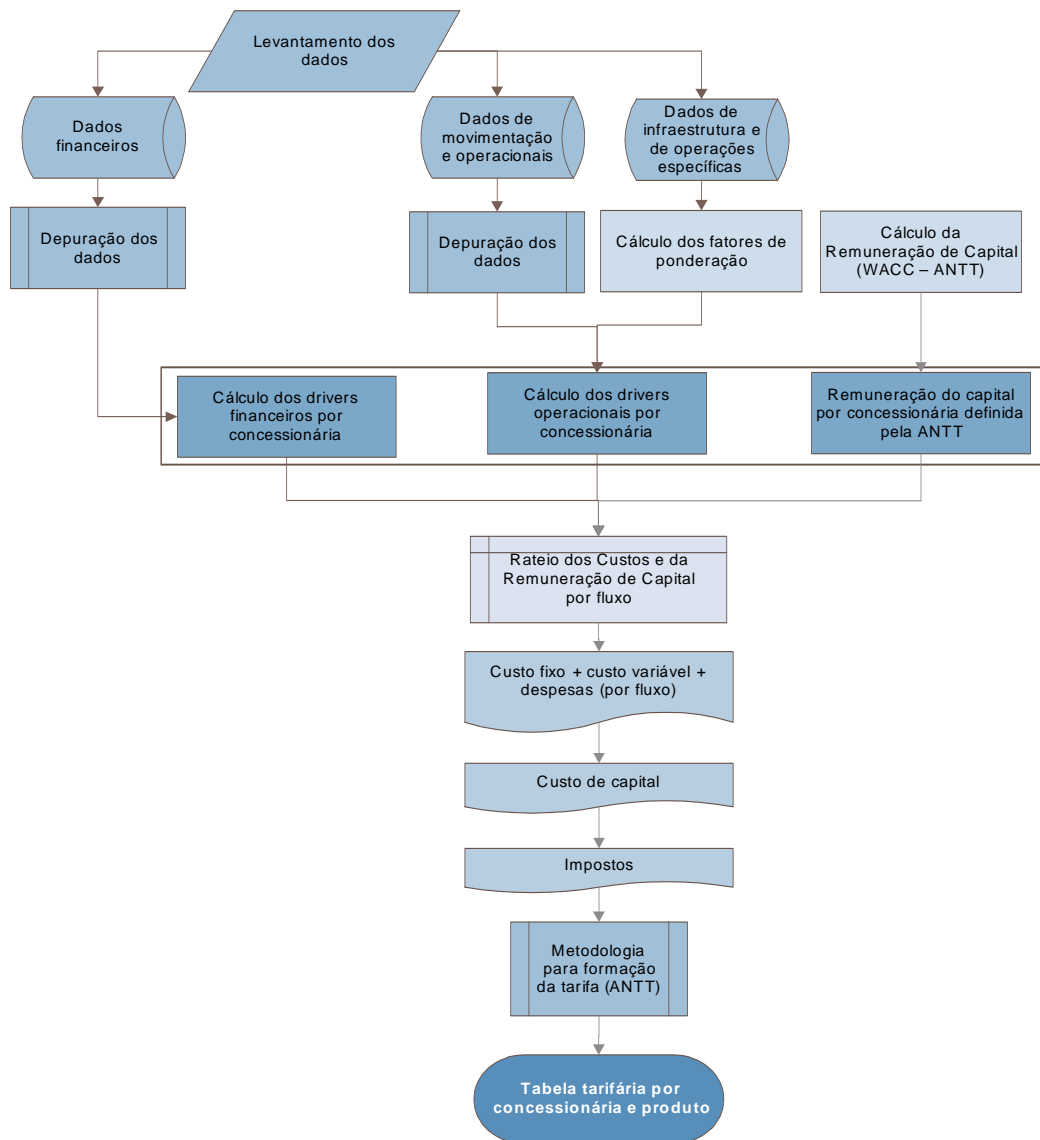


FIG. 2.8- Procedimento para avaliação dos custos de produção de uma ferrovia

Fonte: (ANTT, 2011)

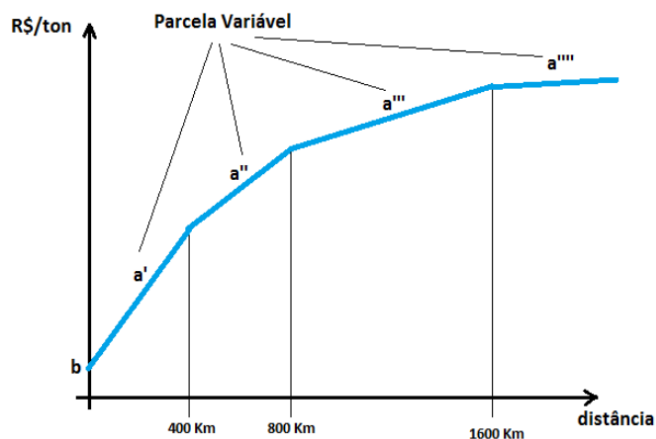


FIG. 2.9–Gráfico de tarifação baseada em custo fixo e variável de uma ferrovia de cargas

Fonte: (ANTT, 2011)

Para cada faixa quilométrica, existe um custo variável a por quilômetro que normalmente tende a diminuir à medida que aumenta a distância a percorrer, decorrente dos ganhos de escala do transporte ferroviário. Também existe uma parcela inicial, equivalente ao custo fixo. Cabe ressaltar que a tarifa é fixa em um determinado degrau de distância, que varia de acordo com a concessionária e/ou produto e a definição das faixas quilométricas para cada uma das concessionárias em função de critério estatístico (distribuição de frequência).

Portanto, a redução dos custos se torna fator primordial, seja na viabilização de mais fluxos de transportes pelo distanciamento do teto tarifário estabelecido pela ANTT ganhando flexibilidade e atendimento, seja pelo aumento da lucratividade no transporte.

Segundo o relatório de BNDES (2011), a respeito do corredor bioceânico, os principais custos de operação das locomotivas dependem das seguintes variáveis:

- Lubrificantes: os fatores que influenciam este consumo são idade da frota, o consumo por locomotiva e o custo dos lubrificantes. Para a estimativa da despesa anual com lubrificantes adotou-se um consumo médio de 1.551 litros por locomotiva ano e um preço médio de US\$ 2,591/litro.

- Seguro de locomotivas: apesar dos valores serem fixados em contratos eles variam de modelo para modelo. O cálculo do custo anual com o seguro das frotas de locomotivas levou em consideração, além da quantidade estimada para essa frota, o valor de 1% do seu preço de aquisição médio de US\$ 2.600.000,00, que corresponde a um valor de US\$ 71,23/dia.

- Manutenção: vários fatores influenciam no custo de manutenção como a extensão do percurso dos trens, os tempos em viagem e nos terminais, a disponibilidade e utilização da frota, pessoal, o salário médio anual, os materiais e equipamentos e outros. Mas basicamente, são formados por despesas com pessoal de oficina, com peças e com serviços de terceiros, compõem grande parcela deste. Para o cálculo das despesas com pessoal, por exemplo, o referido trabalho adota a produtividade de 1,2 homem/locomotiva ano e o salário médio anual de técnicos e gerentes. Para custos com peças e serviços de terceiros, foram adotados valores médios anuais de US\$ 139.154,00/locomotiva para as de maior porte, e US\$ 83.492,00/locomotiva para as de menor porte. Para as locomotivas de manobras de US\$ 89.555,00/locomotiva e US\$ 53.733,00/locomotiva, respectivamente, para as de maior e para as de menor porte. Estes valores são gastos com inspeções de viagem, revisões trimestrais, semestrais, anuais, bianuais, trianuais e revisões gerais.

- Custo de paralisação: relativo à disponibilidade e confiabilidade. Uma locomotiva é considerada paralisada quando não é capaz de exercer sua função como veículo ferroviário. Quando uma locomotiva não está tracionando, considerando que haja demanda, esta ficará paralisada pelos seguintes motivos:
 - Na oficina: para manutenção programada (manter vida útil do equipamento) e/ou para manutenção corretiva (correção de falhas);
 - Na malha: para correção de falhas durante a viagem (utilizando *helper* ou trem socorro) e/ou reboque.

- Combustível: fatores como o perfil da linha, as características das locomotivas, o peso e o tempo de viagem do trem, o consumo e o custo do diesel e outros influenciam no consumo de combustível.

Através da Eficiência Energética das locomotivas, pode-se estimar o consumo dos trens com diferentes formações. O conceito determinado por várias ferrovias internacionais para a eficiência energética segue a seguinte formulação:

$$EE = \frac{\text{Litros}}{\text{Tkb}} \times 1000 \quad \text{EQ. 2.7}$$

Sendo:

EE: eficiência energética;

L: litros de diesel consumidos;

Tkb: tonelada quilômetro bruto transportado.

Com as referências de metodologia de formação de trens, programação de trens e custo da operação ferroviária de locomotivas, torna-se possível modelar matematicamente o problema de alocação de locomotivas. De acordo com os dados da ferrovia e com a experiência já publicada a respeito do assunto, é possível verificar as simplificações adotadas e as técnicas utilizadas para resolver o problema. O capítulo seguinte é uma revisão de artigos e publicações em periódicos a respeito do tema e suas variações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DA MODELAGEM PARA O PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

O capítulo que segue apresenta uma revisão bibliográfica de trabalhos publicados em revistas e periódicos a respeito do Problema de Alocação de Locomotivas (PAL). Todos os trabalhos revisados foram desenvolvidos com base em técnicas de Pesquisa Operacional (PO). É possível verificar que, com o advento da computação, houve um interesse por parte de empresas ferroviárias, principalmente de cargas americanas e canadenses, em desenvolver e investir na solução computacional de PAL, buscando otimização a partir de vários objetivos (redução de custos, aumento de lucro, redução de ciclo, redução de emissões de gases, redução de consumo de combustível, redução da quantidade de ativos usados e etc). O objetivo do capítulo é identificar as principais ferramentas, similaridades e diferenças entre as técnicas e aplicações da PO para a resolução do PAL.

A princípio, é feita uma descrição da metodologia adotada para a pesquisa bibliográfica e em seguida apresenta-se a análise da revisão da literatura segundo vários aspectos característicos do PAL.

3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

A busca para desenvolvimento da pesquisa bibliográfica foi realizada nas bases de dados *Web of Science*, *Science Direct*, *Wiley* e *Scopus*, sem delimitar o período, por meio das seguintes palavras-chave: “(*locomotive and (assignment or distribution or logistic* or allocation) and (problem or model* or optimization or algorithim)*)”. Os diversos artigos apresentados pelas bases de dados foram classificados: (i) inicialmente pelo título; (ii) analisados os resumos; (iii) aplicação preferencial em transporte de cargas; (iv) preferencialmente com aplicação em ferrovias reais.

Foram identificados dois artigos que apresentam revisões bibliográficas sobre modelos matemáticos para o problema de alocação de locomotivas. O primeiro foi *A Survey of Optimization Models for Train Routing and Scheduling* de J.F. Cordeau, P. Toth e D. Vigo publicado em 1998. O outro é *The locomotive assignment problem: a survey on optimization models* publicado em outubro de 2013, onde os autores F. Piu e M.G. Speranza fazem uma revisão e também uma sugestão de classificação dos vários modelos utilizados para a resolução de um PAL (Problema de Alocação de Locomotivas). Porém, a busca também retornou artigos mais recentes e de grande relevância que foram incluídos na revisão. Com isso, 10 trabalhos são abordados no presente trabalho, conforme apresentado na Tabela 3.1.

TAB. 3.1 Artigos selecionados para a revisão bibliográfica

#	Autor	Título	Periódico
1	Florian <i>et al.</i> (1976)	The engine scheduling problem in a railway network	INFOR: Information Systems and Operational Research Volume 14, Issue 2, 1976
2	Ziarati <i>et al.</i> (1997)	Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America	European Journal of Operational Research 97 (1997) 281-292
3	Cordeau <i>et al.</i> (2000)	A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem	Transportation Science 34, 133–149
4	Cordeau <i>et al.</i> (2001)	Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada	Transportation Research Part B: Methodological 35, 767–787
5	Ahuja <i>et al.</i> (2005)	Solving real-life locomotive-scheduling problems	Transportation Science 39, 503–517
6	Ziarati <i>et al.</i> (2005)	Locomotive optimization using artificial intelligence approach	Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering 29, 93–105
7	Paoletti e Cappelletti (2007)	The optimization model for locomotive rostering in the fleet planning project	The Proceedings of the Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications. IEEE, Beijing, China.
8	Hu <i>et al.</i> (2013)	A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving	J. Mod. Transport. (2013) 21(1):9–16
9	Piu <i>et al.</i> (2015)	Introducing a preliminary consists selection in the locomotive assignment problem	Transportation Research Part E 82 (2015) 217–237
10	Su <i>et al.</i> (2015)	Locomotive Schedule Optimization for Da-qin Heavy Haul Railway	Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Vol 2015

3.2 ANÁLISE DOS ARTIGOS SELECIONADOS

A seguir é apresentado uma breve síntese de cada artigo para posterior comparação e classificação dos mesmos.

O trabalho de Hu *et al.* (2013) possui um viés voltado para Eficiência Energética. O modelo de otimização proposto é multiobjetivo, e trabalha na programação de trens considerando restrições de emissões de gases e eficiência energética. Os objetivos são reduzir custo com combustível, reduzir as emissões e reduzir tempo de viagem das locomotivas. As variáveis de decisão incluem variáveis contínuas como tempos de partida e chegada, e variáveis binárias como alocação de locomotivas e ocupação de segmentos. O trabalho, que traz uma solução exata, utiliza um algoritmo de otimização multiobjetivo Fuzzy. A aplicação é realizada em um trecho pequeno, contendo 3 estações, 3 segmentos de linha, 3 tipos de trens e 3 tipos de locomotivas com e sem as restrições de emissões de gases. Hu *et al.* (2003) mostra que o modelo seria capaz de reduzir o consumo e as emissões de forma significativa.

Piu *et al.* (2015) introduz um conceito de *consist* como sendo a formação de grupos tratores (blocos de locomotivas) e seu modelo trabalha na montagem destes blocos de tração antes de alocar. No segundo estágio, ocorre a solução do que os autores chamam de um problema de roteamento, em que o principal objetivo é alocar estes grupos de tração em uma rede de trens minimizando os custos. Portanto, os autores introduzem uma forma mais completa com o modelo de solução dividido em etapas. A base da modelagem é um problema de fluxo de rede de multicommodity e, apesar de trabalharem com 7 modelos de locomotivas diferentes, os grupos tratores pré-determinados (*consists*) é que definem um commodity. A solução através do software CPLEX 12.2 (sem heurística ou algoritmo específico requeridos), chegou a no máximo 8 minutos no caso mais demorado.

Ziarati *et al.* (1997) considera o problema de como prover potência suficiente para tracionar os trens em agendas de horários fixos, usando uma frota heterogênea de locomotivas. Portanto, o trabalho é de programação baseando nos recursos disponíveis, na demanda existente e uma lista de locomotivas preferidas para cada segmento da ferrovia. Esta lista é baseada em critérios técnicos da ferrovia em questão. O trabalho é modelado como um problema de *multicommodity* e a aplicação foi feita na Canadian National, uma grande ferrovia de carga canadense. Em 2005, Ziarati *et al.* (2005) propõe a mesma formulação de problema de rede *multicommodity* para um problema de alocação de frota heterogênea em uma

agenda de horários de trens cíclica. O principal objetivo é alocar o número suficiente de locomotivas para tracionar os trens, mas usando a menor quantidade possível de unidades disponíveis sob um horizonte de tempo de uma semana. Desta vez, o problema é resolvido por um método heurístico, aplicando algoritmos genéticos. Mais uma vez, o trabalho é uma aplicação com dados da Canadian National, onde 7 tipos de modelos de locomotivas diferentes foram usados.

Florian *et al.* (1976) utiliza a modelagem do problema de rede *multicommodity* com o objetivo de minimizar o investimento de capital e custos de manutenção a longo prazo. As restrições são baseadas nas necessidades de tração elevam em conta peso do trem, comprimento, geografia do trajeto, número de vagões e etc. A proposta de uma solução baseada no método de Decomposição de Benders para resolver o problema de planejamento num horizonte semanal. A base do desenvolvimento também foi de dados reais de uma das regiões da Canadian National.

Cordeau *et al.* (2000) desenvolve a alocação de locomotivas e vagões em trens de passageiros. O trabalho propõe uma formulação em que cada tipo de trem corresponde a um produto diferente, novamente através da modelagem de um problema de rede *multicommodity* em espaço e tempo. Cada nó denota um evento, como uma chegada, partidas em um pátio por exemplo. Cada arco representa a movimentação de um trem. Os autores formulam a solução através da Decomposição de Benders, testando na VIA Rail Canada (uma grande ferrovia canadense de passageiros). São usados dois tipos distintos de locomotivas e quatro tipos de vagões, sendo que alguns trens necessitam de mais de uma única locomotiva. O trabalho ainda resolve o problema baseando-se em Relaxação Lagrangiana, Decomposição de Dantiz-Wolfe e Branch-and-bound baseado em algoritmo Simplex, apontando a Decomposição de Benders o melhor desempenho computacional no caso. Em 2001, Cordeau *et al.* (2001) aprimoram ainda mais o trabalho desenvolvido anteriormente, incorporando mais restrições e possibilidades de formação de trens. Neste modelo, trabalha-se com substituição de vagões e possibilidade de desvio de veículos para manutenção. Este modelo é resolvido por um método de branch-and-bound baseado em heurística.

Paoletti and Cappelletti (2007) desenvolvem uma modelagem que aloca as locomotivas segundo a grade de horários dos trens. É uma visão de programação diária. Cada locomotiva segue um ciclo realizando a tração de um ou mais trens e retorna ao seu ponto de origem. O trabalho lida com mais de 4000 locomotivas em 50 modelos diferentes, o que dá mais de 200 formações de grupos de tração para os cerca de 9000 serviços programados. O problema é modelado como um problema de redes de *multicommodity* e busca minimizar o custo operacional através de um algoritmo heurístico.

Ahuja *et al.* (2005) apresentam um estudo de caso real da CSX Transportation (ferrovia de carga americana). O trabalho foca em um planejamento estratégico semanal da alocação das locomotivas em trens. A estruturação é mais uma vez feita como um problema de rede em espaço e tempo de *multicommodity* em que cada modelo de locomotiva é um produto. Como o problema considera a grade de horários de trens, cada arco no fluxo de rede representa um trem, e os nós representam os eventos como chegadas, partidas e etc. O custo total é definido com alguns itens diferenciados dos demais trabalhos como a soma dos custos de propriedade dos ativos, custo de viagens sem tracionar, custo da capacidade de tração excedente e outros. O objetivo final continua sendo a redução de custos totais. Apesar dos dados reais fornecidos pela CSX, a formulação do problema não considera algumas restrições da vida real que foram mapeadas, mas que aumentariam o tamanho 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 proposto então uma decomposição baseada em uma heurística (utilizando o software CPLEX) que possibilita soluções próxima da solução ótima.

Su *et al.* (2015) desenvolve um modelo de otimização da alocação de múltiplos tipos de locomotivas da ferrovia chinesa Da-quin Railway. O objetivo é minimizar a quantidade de locomotivas utilizadas. Os autores conseguem converter o problema de alocação de múltiplas locomotivas em um problema mais simples a partir de regras de blocagem pré-determinadas pela ferrovia. Com isso, é aplicado o Algoritmo Húngaro 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 pode economizar cerca de 62 e 47 locomotivas respectivamente.

3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROBLEMA

O PAL possui diversas variações e classificações que modificam as formas de se modelar o problema e suas restrições. Os trabalhos foram classificados pelos autores pesquisados e se mostram resumidos na Tabela 4. As descrições dos níveis de classificação seguem nesta seção.

3.3.1 NÍVEL DE EXECUÇÃO DO PLANEJAMENTO

Segundo Piu *et al.* (2015), a solução dos problemas de PAL na vida real é alcançada quando se separa o problema em três subproblemas distintos:

1. O problema de planejamento de locomotiva (PPL): no PPL, é feito o planejamento de quais conjuntos de locomotivas são alocadas a cada tipo de trem (respeitando, entre outras restrições, o tamanho da frota), de modo que apenas a quantidade de locomotivas e o modelo ou tipo importa;
2. O problema de programação de locomotivas (PPRL): neste caso, o problema é resolvido especificando-se qual unidade específica de locomotiva (com seu ID único) compõe cada conjunto ou bloco de tração alocado levando em conta horários, ciclo, movimentações como locomotiva escoteira (retorno sem vagão), e conexões de um trem para outro;

3. O problema de roteamento de locomotivas (PRL): as unidades específicas são redirecionadas dos trens para serem abastecidas com diesel e/ou paradas de manutenção.

Os autores classificam os trabalhos segundo o nível de planejamento em que o problema poderá ser tratado: estratégico, tático ou operacional. Verifica-se que em geral as atividades de programação e roteamento de locomotivas (respectivamente PPRL e PRL), são problemas inerentes de uma programação de curto prazo de nível operacional, enquanto a atividade de planejamento (PPL) é a parcela do PAL que trata dos níveis tático e estratégico.

Com isso, é possível avaliar o nível de atuação dos trabalhos em questão. Hu *et al.* (2013), Piu *et al.* (2015), Ziarati *et al.* (1997) e Paoletti e Cappelletti (2007), tem uma abordagem de nível operacional, atuando nas grades de horários e levando em conta a disponibilidade de recursos corrente, ou seja, PPL e PRL. Enquanto isso, Ziarati *et al.* (2005), Florian *et al.* (1976), Ahuja *et al.* (2005) e Su *et al.* (2015) atuam em nível estratégico. Mesmo as vezes abordando a questão das grades de horário dos trens, os planejamentos são feitos sob uma perspectiva mais generalista, não focando em cada locomotiva específica, mas sim no tipo de locomotiva e tipo de trem em geral.

3.3.2 TIPO DE CARGA TRANSPORTADA

A alocação de locomotivas em trens de passageiros e trens de carga possui características diferentes. O transporte de passageiro sempre anda com uma grade de horários fixa, o que nem sempre acontece com os trens de carga, que muitas vezes partem quando atingem determinado peso. Portanto, os trens de passageiros são mais sensíveis aos horários. Tipicamente são bem mais leves que trens de carga, geralmente sendo apenas uma locomotiva tracionando alguns poucos vagões, enquanto os trens de carga contêm muitos vagões acoplados a várias locomotivas em posições diferentes no trem. Os pesos dos trens de carga variam de

forma mais ampla, seja pela incerteza do cliente ou pela variação no processo de carregamento, que somados os desvios de peso geram diferença considerável.

Algumas modelagens de trens de passageiros podem ainda alocar vagões devido a quantidade reduzida de vagões e grade de horários de trens bem determinadas, o que não é uma realidade para os trens de carga, que tracionam muitos vagões, muitas vezes não seguem horários e trabalham com o conceito de tabelas (grupos de vagões que formam um trem e necessitam de locomotivas para serem tracionados).

3.3.3 QUANTIDADE E TIPOS DE LOCOMOTIVAS TRACIONANDO

Segundo Noble *et al.* (2001) e Piu *et al.* (2015), quando uma única locomotiva é suficiente, mas existem vários tipos disponíveis, então é um problema de locomotiva única multiclass. Quando são necessárias várias locomotivas, é um problema multilocomotivas multiclass, como é o caso dos demais trabalhos. Cordeau *et al.* (2000) e Cordeau *et al.* (2001), ainda consideram, além das locomotivas os vagões. Estes em sua exclusividade são problemas aplicados a ferrovias de transporte de passageiros como Codeau *et al.* (2000) e Codeau *et al.* (2001). Codeau *et al.* (2000) usa ainda o termo homogênea e heterogênea para as frotas monoclasses e multiclass respectivamente.

Os modelos que utilizam tração simples, como em Hu *et al.* (2013), apesar de ser o caso mais comum de se encontrar em trabalhos, não foram priorizados nessa revisão bibliográfica pelo propósito claro do estudo em questão de abordar um problema multicomotivas. Dos modelos de tração composta, existem dois tipos: os que utilizam os cálculos de tração do trem diretamente na formulação, e os que utilizam blocagem dos grupos de tração e alocam os grupos previamente formados.

Os primeiros, geralmente consomem mais recursos computacionais e são aplicados em horizontes de curto prazo, basicamente realizando trabalho a nível de programação diária. Esta abordagem está em Ziarati *et al.* (1997), Ziarati *et al.* (2005) e Florian *et al.* (1976).

Os últimos geralmente tratam de planejamento a nível tático ou estratégico a curto e médio prazo, sendo que a maioria trata de planejamento semanal e alguns poucos de mensais. Esta blocagem, que pode ser feita por um algoritmo prévio ao que irá buscar a função objetivo como em Piu *et al.* (2015), ou por critérios técnicos estabelecidos pela ferrovia com o objetivo de aliviar o modelo da grande quantidade de restrições e variáveis e ganho de velocidade na solução. Os critérios técnicos podem ainda, formar trens mais fáceis de se operar do ponto de vista das técnicas de condução, manobras de formação e aproveitamento de tração, conforme descrito em Piu *et al.* (2015) e Su *et al.* (2015). Dos trabalhos aqui apresentados, Cordeau *et al.* (2000), Cordeau *et al.* (2001), Paoletti e Cappelletti (2007), Ahuja *et al.* (2005) e Su *et al.* (2015) trabalham com blocagem de locomotivas ou com reduzidas opções de locomotivas simplificando o trabalho. Sendo que Piu *et al.* (2015) trabalha com duas fases de solução na qual a primeira usa os cálculos de tração do trem diretamente na formulação, e segunda fase utiliza blocagem pré-determinada pela primeira solução.

3.3.4 AGENDAMENTO DE LOCOMOTIVAS E PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO

De acordo com Piu *et al.* (2015), se a demanda por frete de uma determinada origem para determinado destino é alta suficiente, então um trem direto é formado assim que completa o volume. O autor chama este processo de despacho baseado em peso. Mas se a demanda não justifica o custo do trem direto, então o trem irá parando em locais intermediários para capturar mais carga com horários bem definidos para que não impacte nos clientes. Este processo é chamado de despacho baseado em grade de horários. Anteriormente, as ferrovias norte americanas acreditavam que o despacho por peso era sempre mais eficiente pois havia uma quantidade menor de trens andando no limite de suas lotações. Atualmente, estas ferrovias estão buscando trens mais frequentes, rápidos e tratando estes horários com mais rigor conseguindo obter maior credibilidade do cliente e melhor custo benefício na operação com um planejamento melhor estruturado. Com isso, modelos de otimização vem ganhando cada vez mais importância resolvendo os problemas

com grades de horários. Mas a casos em que a grade de horários não é levada em conta no modelo pelo fato da ferrovia de aplicação ainda funcionar com despacho por lotação como Su *et al.* (2015).

3.4 CARACTERÍSTICAS DAS MODELAGENS

3.4.1 TIPO DE MODELAGEM

Segundo Ahuja *et al.* (1993), em diversos contextos de aplicações os produtos ou *commodities* trabalhados interagem e/ou dividem recursos em comum não podendo serem considerados problemas independentes. Para se otimizar um problema de Fluxo de Redes como estes é preciso resolvê-los em conjunto tratando o caso como um problema multicommodity. De forma geral, todos modelaram os trabalhos como um problema de Fluxo de Rede de *Multicommodity*. Apenas Hu *et al.* (2013), Piu *et al.* (2015) e Su *et al.* (2015), fizeram a modelagem como um problema de Fluxo de Rede de Custo Mínimo, tornando possível a solução através da forma de modelagem e forma de estruturação do problema.

3.4.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Classificando os trabalhos de acordo com a função objetivo, os mais usuais são minimização de custos operacionais totais como Piu *et al.* (2015), Ziarati *et al.* (1997), Cordeau *et al.* (2000), Cordeau *et al.* (2001), Paoletti e Cappelletti (2007) e Ahuja *et al.* (2005). Outros trabalhos como Su *et al.* (2015) e Ziarati *et al.* (2005), na busca indireta de redução de custos buscaram a minimização do uso da quantidade de locomotivas. Florian *et al.* (1976) têm o objetivo de reduzir investimentos de longo prazo com compra de ativo e manutenções. Por fim, Hu *et al.* (2013), com sua função multiobjetivo, buscam a redução do consumo de combustível, emissões de gases e tempo de viagem. O enfoque na redução do consumo de combustível

também é dado por Piu *et al.* (2015) como parte significativa da redução de custos gerais.

3.4.3 TIPOS DE RESTRIÇÕES

As restrições também são de maneira geral similares, variando de acordo com a abordagem utilizada. Hu *et al.* (2013), como exceção, acaba usando uma restrição que permite apenas uma locomotiva por trem. Usa também restrições sobre quantidade máxima de locomotivas disponíveis, de horários de partida de trens, duração da permanência nas estações, faixa de velocidade dos trens, de emissão de gases por segmento de linha, tempo de *headway* (distância entre trens em tempo, ou seja, intervalo de passagem de trens em um mesmo ponto), e restrição quanto a colisão. Nota-se que existe um enfoque grande em redução de tempo de viagem no trabalho de Hu *et al.* (2013) além do diesel pelas características das restrições.

Ahuja *et al.* (2005) adotam também uma abordagem um pouco diferente dividindo suas 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 mais desejadas e menos desejadas para cada tipo de trem, quantidade máxima de eixos ativos por trem (24 eixos), disponibilidade de locomotivas e quantidade máxima de locomotivas no trem (12 ou menos locomotivas). O segundo, chamado de *soft constraints*, traz um grupo de restrições que são desejáveis de serem cumpridas, mas nem sempre é preciso satisfazê-las. Essa utilização das *soft constraints* é introduzida atribuindo uma penalidade para cada restrição quebrada. Neste grupo de restrições Ahuja *et al.* (2005) considera: grau de estabilidade da alocação (por exemplo: se determinado trem roda 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.

Os trabalhos que abordam os cálculos de capacidade de tração dos trens se utilizam das formulações empíricas de Davis para estabelecer um conjunto de restrições em comum. Piu *et al.* (2015), Ziarati *et al.* (1997), Cordeau *et al.* (2000), Cordeau *et al.* (2001), Paoletti e Cappelletti (2007) e Ahuja *et al.* (2005), usam restrições como: capacidade tratora das locomotivas alocadas, potência mínima necessária para deslocar o trem em sua rota específica, restrições relacionadas ao peso dos trens, comprimento dos trens, quantidades máximas ou mínimas de locomotivas ou de grupos tratores por trem, disponibilidade de locomotivas de cada modelo, quantidade de eixos ativos por grupo trator (para limitar o esforço trator e evitar quebra de engate), .

Os trabalhos que levaram em conta a solução do PPL e PRL, buscaram ainda restrições como: capacidade e disponibilidade de oficinas, atendimento da programação semanal ou diária, movimentações de locomotivas escoteiras (tracionando sem vagões) ou rebocadas.

3.4.4 TIPOS DE SOLUÇÃO

As soluções se dividem entre métodos exatos e métodos inexatos. Dos métodos exatos, conforme proposto em Ahuja *et al.* (1993), são mais comuns aos problemas de rede *multicommodity* a aplicação dos métodos de decomposição de Benders e Dantzig-Wolfe. Estas técnicas foram aplicadas em 3 dos 10 artigos estudados.

Ziarati *et al.* (1997) aplica a decomposição de Dantzig-Wolfe, enquanto Florian *et al.* (1976) e Cordeau *et al.* (2000) utilizam a decomposição de Benders.

Florian *et al.* (1976) ressaltam que a implementação desta solução não convergiu à otimalidade tão rápido quanto sua aplicação na Canadian National necessitava, mas o tamanho dos *gaps* para a solução ótima foram considerados

aceitáveis nos problemas de tamanho médio, mas não para o nível de complexidade que a ferrovia queria resolver. Destaca-se também que, em 1976, o ferramental computacional era bem inferior ao atual.

Hu *et al.* (2013) modela de forma diferente, com função multiobjectivo e aplica solução exata através de um algoritmo Fuzzy atingindo a otimalidade em sua aplicação numérica com o uso do software GAMS.

Piu *et al.* (2015) faz um modelo dividido em três fases de solução aplicando o Solver do software CPLEX. Na primeira etapa a blocagem de locomotivas é feita, reduzindo a complexidade do problema para as próximas etapas que consistem em alocar e fazer o roteamento de locomotivas para abastecimento e oficinas. Além das restrições impostas na blocagem, os autores restringiram alguns trens adotando apenas aqueles que são diretos (geralmente trens maiores). Os dados de entrada são pertencentes a ferrovia americana CSX.

Su *et al.*(2015) aplica Algoritmo Húngaro para a solução atingindo a otimalidade, mas sua aplicação é bem restrita a trens de *heavy haul* com faixas de pesos e formações pré-determinadas e fixas, não passando de 2 tipos de trens.

Dos métodos inexatos, tem-se a aplicação de heurística de 4 dos 10 artigos estudados. Ziarati *et al.* (2005) e Cordeau *et al.* (2001) evoluem os trabalhos para a Canadian National e VIA Rail. Ziarati *et al.* (2005) consegue uma solução semanal para o problema em 20 horas de processamento usando algoritmo genético, um tempo ainda alto, apesar da simplificação do problema através da limitação dos tipos de trens admitindo agora apenas trens cíclicos.

Já Cordeau *et al.* (2001) aumenta o número de restrições na sequência do trabalho anterior, aplicando a técnica de branch-and-bound para acelerar a resposta de alocação de vagões e locomotivas.

Paoletti e Cappelletti (2007) também aplicam heurística a um modelo aplicado a vagões e locomotivas que leva em conta uma ampla gama de restrições, considera grade de horários e alocação em oficinas de manutenção e abastecimento.

Ahuja *et al.* (2005) introduz variáveis de custo e restrições ainda não exploradas por outros trabalhos e não conseguiu solucionar de forma ótima com softwares comerciais. A heurística desenvolvida por Ahuja *et al.* (2005) transforma um plano de tamanho semanal em diário considerando apenas trens cíclicos com frequências diárias ou próximas a isso simplificando significativamente o problema na CSX onde 94% dos trens são cíclicos e formados pelo menos 5 vezes por semana.

De forma geral, os autores conseguem chegar em modelos com respostas que apresentam ganhos aos casos estudados. Nos modelos exatos ou inexatos, utilizando-se sempre das simplificações ou de processamentos prévios, os autores conseguiram de formas diversas superar as limitações dos modelos adequando as simplificações às particularidades dos casos estudados em cada ferrovia. Conclui-se que, em um nível aceitável de simplificação compatível a cada ferrovia, conseguem trabalhar satisfatoriamente com um horizonte de uma semana devido a alto tempo de processamento para níveis tático e operacional e horizonte de até um mês para nível estratégico. A Tabela 3.2 traz as informações resumidas a respeito dos trabalhos.

Todos os autores pesquisados neste capítulo tentam utilizar-se de algum método para buscar uma alocação otimizada das locomotivas, pautando-se em dados. O capítulo seguinte irá propor de forma estruturada um procedimento para o planejamento de alocação das locomotivas e por fim, na etapa final um modelo simplificado de alocação baseado nas pesquisas bibliográficas.

TAB. 3.2 Resumo das informações dos artigos selecionados para a revisão bibliográfica

#	Autor	Carga ou Passageiro	Nível	Estruturação do Modelo	Função objetivo	Método de resolução	Aplicação
1	Florian et al. (1976)	Carga	Estratégico	Rede: Multicommodity	Min Investimento e custos de manutenção em longo prazo	Exata (Benders decomposition)	Canadian National (Canadá)
2	Ziarati et al. (1997)	Carga	Operacional	Rede: Multicommodity	Min Custo total	Exata (Dantzig-Wolfe decomposition)	Canadian National (Canadá)
3	Cordeau et al. (2000)	Passageiros	Tático	Rede: Multicommodity	Min Custo operacional	Exata (Benders decomposition)	VIA Rail (Canadá)
4	Cordeau et al. (2001)	Passageiros	Tático	Rede: Multicommodity	Min Custo operacional	Heurística	VIA Rail (Canadá)
5	Ziarati et al. (2005)	Carga	Estratégico	Rede: Multicommodity	Min Quantidade de Locomotivas	Heurística	Canadian National (Canadá)
6	Ahuja et al. (2005)	Carga	Estratégico	Rede: Multicommodity	Min Custo operacional	Heurística	CSX (EUA)
7	Paoletti e Cappelletti (2007)	Passageiros	Operacional	Rede: Multicommodity	Min Custo total	Heurística	Trenitalia (Itália)
8	Hu et al. (2013)	Passageiros	Operacional	Rede: Custo mínimo (multi-objetivo)	Min Consumo de combustível, emissões de gases e tempo de viagem	Exata (Algoritmo Fuzzy Multiobjetivo)	Acadêmica (aplicação hipotética)

9	Piu et al. (2015)	Carga	Tático e Operacional	Rede: Custo mínimo	Min Custo total e consumo de combustível	Solver	CSX* (EUA)
10	Su et al. (2015)	Carga	Estratégico	Rede: Custo mínimo	Min Qtde de Locomotivas	Exata (Algoritmo Húngaro)	Da-quin (China)

4 DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

O presente capítulo apresenta a proposta do procedimento a ser aplicado ao problema de alocação de locomotivas, cujo objetivo consiste em minimizar o custo operacional das locomotivas.

4.1 AS VARIÁVEIS RELEVANTES PARA A ALOCAÇÃO

O objetivo do procedimento é alocar as locomotivas para que os grupos de tração sejam formados para tracionar cada trem, de forma a se atender as diversas demandas e com o objetivo de reduzir o custo de operação das locomotivas. A modelagem deste trabalho é desenvolvida em torno dos pilares que alimentam os custos de utilização de locomotivas, conforme expostos na seção 2.5, e aos pontos considerados pelos trabalhos da revisão bibliográfica do capítulo 3.

A Figura 4.1 apresenta as principais variáveis que influenciam na etapa de planejamento de locomotivas do problema de alocação, organizados conforme a pesquisa bibliográfica. Nesta seção, estas variáveis são analisadas, discutindo sua relevância para a atual modelagem.

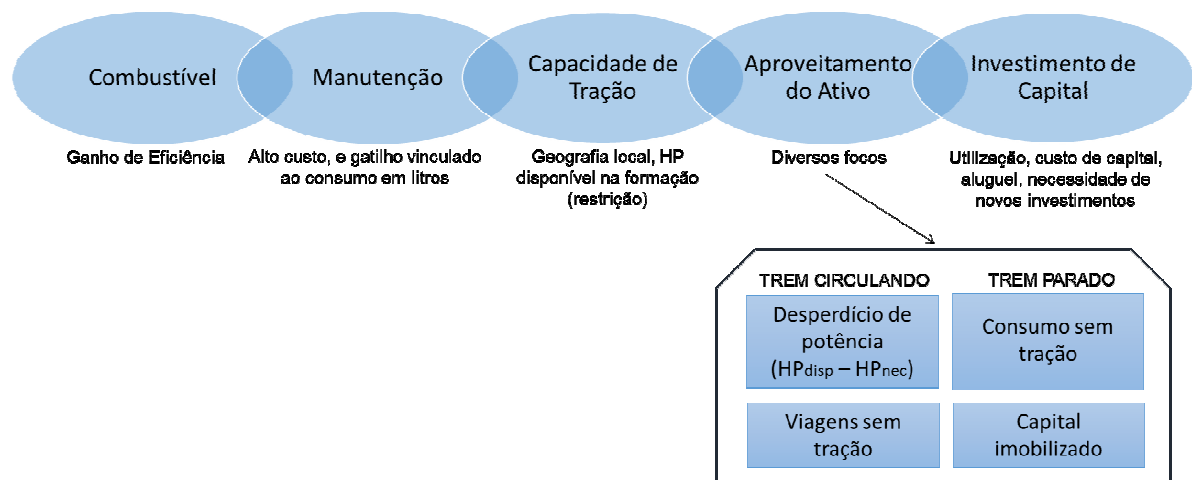


FIG. 4.1—Pilares do custo de operação de locomotivas

Fonte: Adaptado pelo Autor

O **investimento de capital** ou *capex* (*capital expenditures*), neste caso, é o valor desembolsado relativo a aquisição de uma locomotiva. No Brasil, o custo de aquisição de locomotivas ainda é muito alto e varia conforme o modelo e nível de tecnologia embarcada. Com relação a este “custo”, torna-se difícil comparar o valor de investimento de uma locomotiva moderna para uma locomotiva já fora de linha e antiga que ao se aplicar o procedimento não seja utilizada no planejamento. Neste caso, o investimento de capital é relevante para o custo e assim o driver de custo de HP (potência) pode ser utilizado, podendo-se assim chegar a uma comparação aceitável de custo de sobra de ativos. Com isso, sugere-se uma conversão utilizando um *driver* econômico-financeiro de custo de potência (HP) para que seja possível mensurar o custo da redução da necessidade de locomotivas para atender o planejamento, sendo este aplicado ao valor final de sobra de locomotivas.

A **capacidade de tração** é algo inerente a potência disponibilizada pelo grupo de tração alocado. Esta potência é dimensionada principalmente pelo peso bruto do trem a ser traçado (que é variável), e também pela geografia do local, que irá exigir maior ou menor quantidade de esforço de tração de acordo com o perfil da via

permanente (rampas e curvas que são fixas). O quadro de tração apresentado na seção 2.2.3 é a principal ferramenta para decisão de alocação de locomotivas. A falta de capacidade de tração é inadmissível e a sobra de tração, mesmo que minimizada, é inevitável. Porém, o objetivo final é sempre fazer com que sobre o essencial para manter o trem com uma velocidade aceitável sem desperdícios.

Os custos de **manutenção** também variam bastante dentre os grupos de tração que serão formados. Segundo BNDES (2011), um exemplo é o elevado custo com lubrificantes que varia principalmente com a idade da frota, mas o consumo médio estimado é em torno de 1.551 litros por locomotiva ano a um preço médio de US\$ 2,591/litro. Basicamente, o custo de manutenção é formado por despesas com pessoal de oficina, com peças e com serviços de terceiros. É possível então afirmar que a má utilização das locomotivas por si só o onera ainda mais, uma vez que o mau uso reflete negativamente em vários aspectos operacionais principalmente gerando consumo excessivo de óleo diesel.

O aumento dos custos ou perdas devido ao **aproveitamento do ativo** podem acontecer com o trem em circulação (movimento) e com o trem parado. Analisando a circulação, pode-se observar que o grupo trator possui mais potência do que é preciso - parâmetro este que varia a cada metro fazendo com que o trem ande próximo do limite nas subidas e sobre tração nos planos e descidas, transformando esta sobra de potência em ganhos de velocidade. Porém, nem sempre é possível desempenhar altas velocidades devido a limitações de velocidade que variam de acordo com as condições de manutenção e classe da via ou restrições de velocidade permanentes e/ou temporárias como centros urbanos, pontes, túneis, curvas acentuadas, manutenções às margens da via. Estas perdas sempre ocorrem em maior ou menor escala de acordo com o tipo de trem e característica da rota percorrida. Apesar da dificuldade em eliminá-las, já que não se pode realizar manobras com tanta frequência colocando e retirando locomotivas da composição a cada inclinação do traçado, o esforço em minimizá-las deve ser constante e pode

ser reduzido pela alocação com análise histórica e estatística do desempenho de cada trem em cada rota.

A circulação sem tração que acontece devido à necessidade de retorno de locomotivas na composição. Quando é possível desligá-la, tem-se um peso morto de aproximadamente 195 toneladas no trem para cada locomotiva, o que fará aumentar o consumo de combustível. Quando não se pode desligá-la por algum motivo, a locomotiva circula ligada desnecessariamente por um período de tempo, consumindo combustível além de fazer peso morto. Sabe-se que uma locomotiva AC44i por exemplo, consome cerca de 15 litros de diesel por hora parada ou circulando “em vazio” (com motores ligados mas sem tracionar).

Com o trem parado existe o custo de paralisação citado anteriormente. Segundo BNDES (2011), quando uma locomotiva não está tracionando mesmo com demanda, ficará paralisada em oficina (para manutenção preventiva ou corretiva) ou na malha, seja para correção de falhas durante a viagem, parada em pátio aguardando o cliente, manobrando, trocando de maquinista, aguardando manutenção na via permanente ou outras ocorrências ferroviárias, gerando ineficiência na produtividade.

Apesar da alta eficiência que as ferrovias apresentam, o consumo de óleo diesel constitui o principal custo operacional variável das empresas ferroviárias. Desta forma, devido a aumentos vertiginosos dos combustíveis derivados do petróleo no Brasil nos últimos anos, o custeio das ferrovias foi pressionado ainda mais. O **combustível** é sempre o item de maior custo e sofre influência de todos os outros de forma direta ou indireta, em uma espécie de relação de realimentação do custo, pois o consumo aumenta sempre que os fatores abaixo estão presentes:

- Ocorrências que param o trem, e para tirá-lo da inércia é preciso uma grande quantidade de energia, o que aumenta o consumo quando comparado ao trem que não parou;
- Ficar parado consumindo diesel adicional, já que a locomotiva tem que manter suas funções e condições básicas;
- Desperdício de potência, seja por falta de carga, planejamento ou por avaria, também gera consumo excessivo já que a mesma locomotiva poderia estar tracionando mais, mais rápido e sendo mais eficiente;
- Viajar a reboque (sem tracionar), além de consumir combustível da composição como peso morto, provoca a perda de oportunidade de utilização.

O consumo pode ser medido de forma pura e simples pela quantidade de litros abastecidos em determinada locomotiva. Mas, como exemplo, uma locomotiva que andou a reboque em várias oportunidades apresentaria um baixo consumo, não por ter consumido pouco, mas por ter tracionado baixo volume de carga durante o período avaliado. A medida simples também peca por não levar em conta os aspectos de utilização citados acima, que pesam e realimentam o consumo de combustível em determinados trens de acordo com a proporção destas ineficiências.

Um indicador capaz de ponderar estes fatores é a Eficiência Energética (EE). Segundo Martino (2008) e Marino (2015), o entendimento mais disseminado de eficiência energética diz respeito a como consumir menos energia para realizar a mesma quantidade de serviço ou trabalho, ou seja, significa diminuir a quantidade de energia primária destinada a produzir um bem ou serviço. Assim, a eficiência energética tem o potencial de contribuir simultaneamente para a segurança energética a longo prazo (proteção de recursos naturais, suprimento de combustíveis vitais, desenvolvimento sustentável, proteção ambiental), e o próprio consumo de energia por rastrear aqueles trens menos eficientes dando a oportunidade de melhoria (IEA, 2014; Marino, 2015). Desta forma, levando em conta na modelagem da alocação, a EE histórica das locomotivas nos diferentes modelos de trem, a equação obtém a capacidade de representar tanto as ineficiências de

utilização característica de cada trem, quanto as sinuosidades e complexidades geográficas e operacionais da rota dos trens com o grupo trator específico em questão. Diante da impossibilidade de se extinguir as perdas, o entendimento de suas proporções para cada grupo trator e para cada trem tipo é de suma importância durante a alocação, permitindo minimizá-las.

De acordo com Marino (2015), indicadores de eficiência energética podem ser calculados de diversas formas, dependendo de critérios específicos adotados por países e empresas. A equação abaixo apresenta uma forma de medição da Eficiência Energética (EE) adotada mundialmente pelas ferrovias, onde quanto menor o número obtido, melhor é a eficiência energética da ferrovia.

$$EE = \frac{L}{Tkb} \cdot 10^{-3} \quad \text{EQ. 4.1}$$

Sendo:

EE: eficiência energética (litros. 10^{-3} /Tkb);

L: total de litros de diesel abastecidos (L);

Tkb: distância percorrida x volume bruto transportado em toneladas (Tb xKm).

Além de todos os fatores citados anteriormente, advindos dos autores estudados no capítulo 3, a formulação da EE diz mais a respeito da relação do consumo com a operação dos trens. A forma de condução e licenciamento dos trens também pode ter sua influência expressa pela EE. A complexidade da condutibilidade de um determinado trem pode ser maior ou menor, estando mais favoráveis a existência de maior ou menor variação e descontrolado de consumo de combustível. Assim como o tipo de licenciamento e sinalização nos locais por onde o trem passa que o trem recebe também pode contribuir, pois quanto mais o trem para em seu trajeto mais combustível ele tende a consumir.

Esses fatores estão apontados pela formulação da Eficiência Energética de forma indireta, quando se considera uma base de dados de uma grande quantidade de trens, garantindo que as variações dos processos inerentes a cada trem estão contidas e caracterizadas pela amplitude de tempo dos dados coletados.

Dos fatores diretamente relacionados na Equação 4.1, tem-se a quantidade de litros abastecidos, a distância percorrida e o volume bruto transportado. Assim como na rodovia, a distância percorrida pelos trens também é um fator de influência no consumo, ou seja, é inversamente proporcional a EE. Quanto maior a distância mais se consome, e sistemas ferroviários são meios de transporte guiados, isto é, a composição férrea tem sua mobilidade limitada à direção do trilho. Portanto, as distâncias da origem dos trens até terminais de clientes são pouco alteradas pela falta de opções de trajetos e pela necessidade de cumprimento dos contratos firmados.

O volume transportado influencia diretamente no consumo pelos fatores previamente apontados (aproveitamento da tração, carga com maior peso específico, capacidade, quantidade de vagões, características sazonais da carga e etc.

O fator L (total de litros abastecidos), é inerente a todos os fatores já apresentados e ainda pelos modelos de locomotivas que a ferrovia utiliza. Basicamente, modelos mais novos possuem mais potência, além de tecnologias mais avançadas de controle e seus equipamentos proporcionam uma melhor eficiência do conjunto trator. Os fabricantes trazem os dados teóricos de consumo por ponto de aceleração. Na Figura 13, é possível ver a comparação entre o consumo teórico de duas locomotivas de um mesmo fabricante. Nota-se que os valores de consumo por ponto são bem parecidos visto que existe uma diferença de 800 HP de potência entre os modelos.

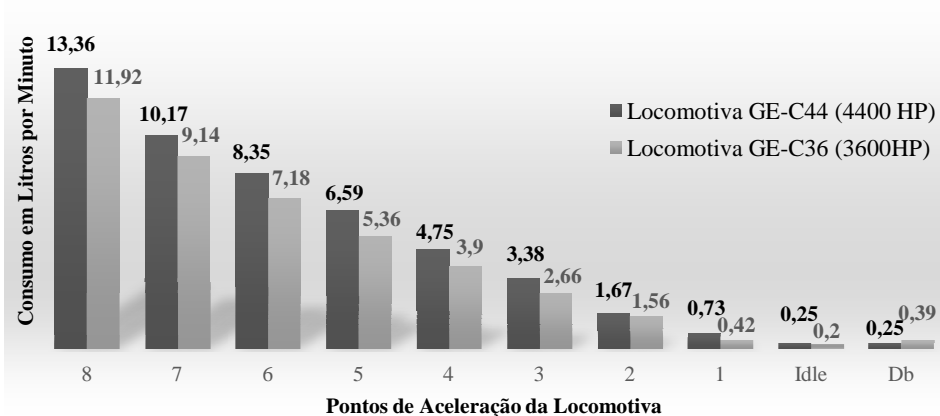


FIG. 4.2– Consumo por Ponto de Aceleração

Fonte: Adaptado pelo autor dos manuais das locomotivas GE-C44 e GE-C36

4.2 PROCEDIMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Conforme apresentado no Capítulo 3, o problema de alocação de locomotivas é dividido em três partes: planejamento, programação e roteamento. Conforme definido por Piu *et al.* (2015), no problema de planejamento de locomotiva (PPL), o objetivo é definir quais conjuntos de locomotivas são alocadas a cada tipo de trem (respeitando, entre outras restrições, o tamanho da frota), de modo que apenas a quantidade de locomotivas e o modelo ou tipo importa. O trabalho de Piu *et al.* (2015) se divide em três etapas. Na primeira etapa a blocagem de locomotivas é feita, reduzindo a complexidade do problema para as próximas etapas que consistem em alocar as locomotivas nos trens e depois fazer o roteamento para abastecimento e oficinas. De forma geral, a integração das três etapas não é praticável devido ao tamanho e complexidade dos problemas reais. Com isso, o presente trabalho é focado na etapa estratégica do planejamento, visto que ela é fundamental para o direcionamento das etapas operacionais, em que decisões em tempo real podem ser tomadas de forma mais facilitada e assertiva quando o PPL é bem resolvido. Portanto, este trabalho propõe um procedimento para o planejamento de alocação das locomotivas nos trens. A Figura 14 descreve cada etapa e suas

relações de dependência. As próximas seções irão descrever cada etapa do processo de forma mais detalhada.

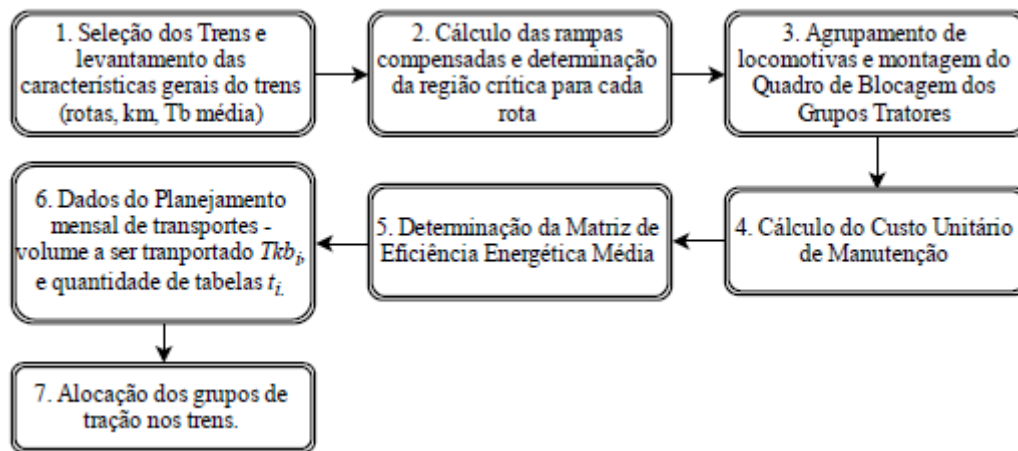


FIG. 4.3- Etapas do Processo de Planejamento de Alocação de Locomotivas

Fonte: Autor

4.2.1 SELEÇÃO DOS TRENS E LEVANTAMENTO DE SUAS CARACTERÍSTICAS GERAIS

Esta seção descreve o primeiro passo do procedimento. No presente trabalho, considera-se uma ferrovia de transporte de carga, que possui trens de carga geral e/ou de *heavy haul*. Os trens de *heavy haul* possuem o gatilho de partida dos terminais determinado pelo momento em que se completa a lotação. Em sua grande maioria são cíclicos, pois eles partem de determinado local e retornam ao mesmo com a mesma composição, ou seja, o mesmo conjunto de vagões e locomotivas circulam juntos por todo o percurso sem necessidade de ser substituídos. Nestes casos, a substituição de um dos veículos só acontece quando há a necessidade de manutenção ou troca por avaria, e mesmo assim, por outro veículo idêntico. Dadas estas características pode-se dizer que quase todo trem de *heavy haul* é cíclico, pois como possuem lotação maior, não precisam ir parando para anexar e retirar vagões nos clientes ao longo de suas rotas mantendo a mesma formação do início ao fim e até retornando ao seu local de origem para um novo carregamento.

É possível que, em algum momento, seja necessário inserir locomotivas a mais para que determinados trechos sejam vencidos por necessidade de maior potência, nestes casos estas composições de locomotivas são denominadas de “auxílios de tração” (do inglês *helper*). Os *helpers* são considerados neste trabalho como trens a parte pela sua indispensabilidade na operação e característica cíclica ao terminar um serviço com um trem ele retorna ao ponto de origem para auxiliar o próximo trem. Na prática, os *helpers* não transportam volume próprio, mas no trabalho lhe é atribuído a parte do Tkb que lhe cabe dada a proporção de potência adicionada a composição que lhe compete proporcional à distância percorrida quando na composição.

Já os trens de carga geral costumam funcionar baseados em uma grade de horário na 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. Apesar de serem regidos por grade de horários, alguns destes trens são cíclicos, geralmente os que carregam volumes maiores de carga, e não alteram formação ao longo da viagem.

A proposta do procedimento é escolher aqueles trens 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 são:

- Origem, destino e rota do trem com sua distância em km;
- Tkb média transportada por trem tipo³;
- Informações do planejamento (futuro): Tkb planejada por trem e quantidade de tabelas⁴ a ser utilizada;

³Por definição, trem tipo é um trem com rota (origem, destino e trajeto), e carga(s) específica(s).

⁴No linguajar ferroviário, a Tabela é o conjunto de vagões que constituem a composição sem o grupo trator. O trem, portanto, é constituído de uma tabela de vagões mais as locomotivas. A quantidade de tabelas a ser usada é um dado do planejamento de alocação de vagões, etapa que antecede o procedimento aqui proposto.

Locomotivas que devem ser alocadas para manobra em pátios, serviços gerais como transporte de materiais de manutenção e outros, não devem entrar na escolha dos trens, devendo assim serem cobertos com a sobra da alocação principal.

TAB. 4.1 Exemplo de tabela com informações dos trens selecionados

ID do Trem tipo	Mercadoria	Origem	Destino	Tkb (i)*	T (i)
Trem Tipo 1	Minério de Ferro	Terminal de Carga	Porto do Rio de Janeiro	20.000.000	5
Trem Tipo 2	Produtos Agrícola	Terminal de Boa Vista	Porto de Santos	35.300.000	2
Trem Tipo 3	Ferro Gusa	Pátio de Carga	Pátio de Descarga	15.000.000	4

* Tkb (i) é a tonelada bruta x quilômetro prevista para ser transportada pelo trem i no período em que se irá fazer o planejamento.

**T (i) é a quantidade de tabelas que está dimensionada para o trem tipo em questão no mês corrente ao planejamento.

4.2.2 CLASSIFICAÇÃO DA REGIÃO CRÍTICA

A etapa 2 consiste no levantamento dos dados de via permanente para a classificação da região crítica nas rotas dos trens. As ferrovias em geral possuem esses dados nas plantas, em forma de cadernos com o perfil longitudinal das rampas, curvas e obras de arte representados de forma simplificada ou já traduzidos em planilhas eletrônicas. Quaisquer um deles é suficiente para o levantamento dos dados e classificações dos perfis de rampa compensada conforme exposto anteriormente na seção 2.2.3.1, e determinação da rampa crítica do trecho. A Figura

Geralmente, a quantidade de tabelas é calibrada pelo tempo de ciclo, capacidade dos vagões e demanda contratada.

4.4 mostra um exemplo da representação gráfica de um perfil longitudinal de um trecho ferroviário com suas rampas e curvas.

A Tabela 4.2 apresenta uma classificação de faixas de perfis de rampas compensadas denominados por letras que é adotada pela MRS Logística para facilitar o projeto de trens e classificação das rotas segundo a criticidade. Para o cálculo, um comprimento do trem mais longo usado pela empresa é adotado (no caso 1.500 m). Na tabela em questão o trecho de perfil A é o mais crítico de todos pois possui rampa compensada variando entre 2,20% a 2,47% de inclinação.

A Figura 4.5 mostra um esquema das classificações de perfil de rampa compensada da malha Minas/Rio da MRS Logística entre o terminal de carga Otávio Dapieve (também conhecido como Andaime) e o porto de Guaíba em ambos os sentidos de circulação do trem passando pela Linha do Centro.

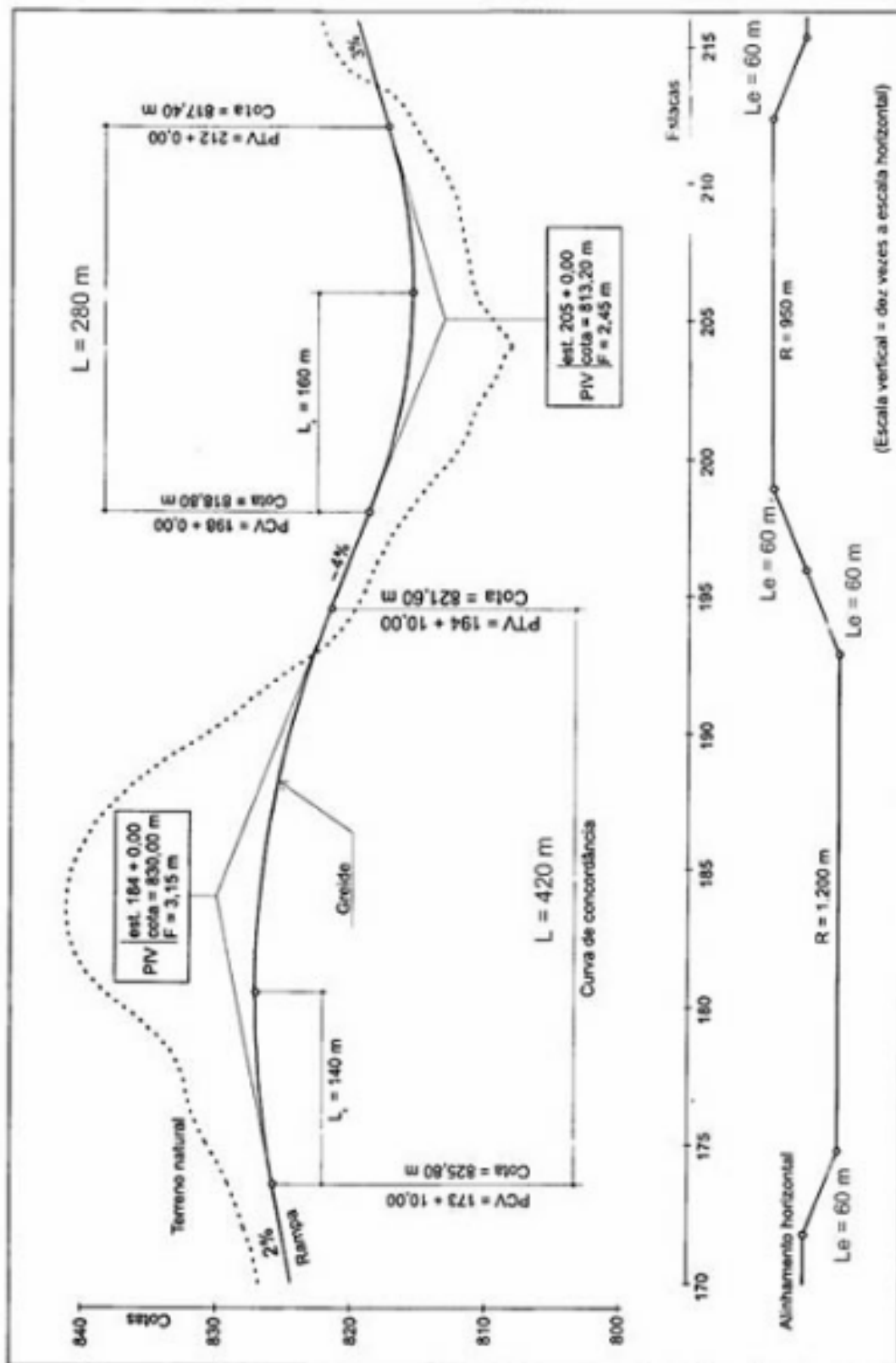


FIG. 4.4- Exemplo de levantamento topográfico de uma via ferroviária (perfil longitudinal de rampas e curvas)

Fonte: MRS Logística

TAB. 4.2 Classificação dos perfis da MRS Logística pela rampa compensada

PERFIL	RAMPA (%)	
A	2,20	2,47
B	2,00	2,20
C	1,79	2,00
D	1,55	1,79
E	1,41	1,55
F	1,19	1,41
G	0,98	1,19
G1	0,98	1,06
H	0,89	0,98
I	0,71	0,89
J	0,00	0,71

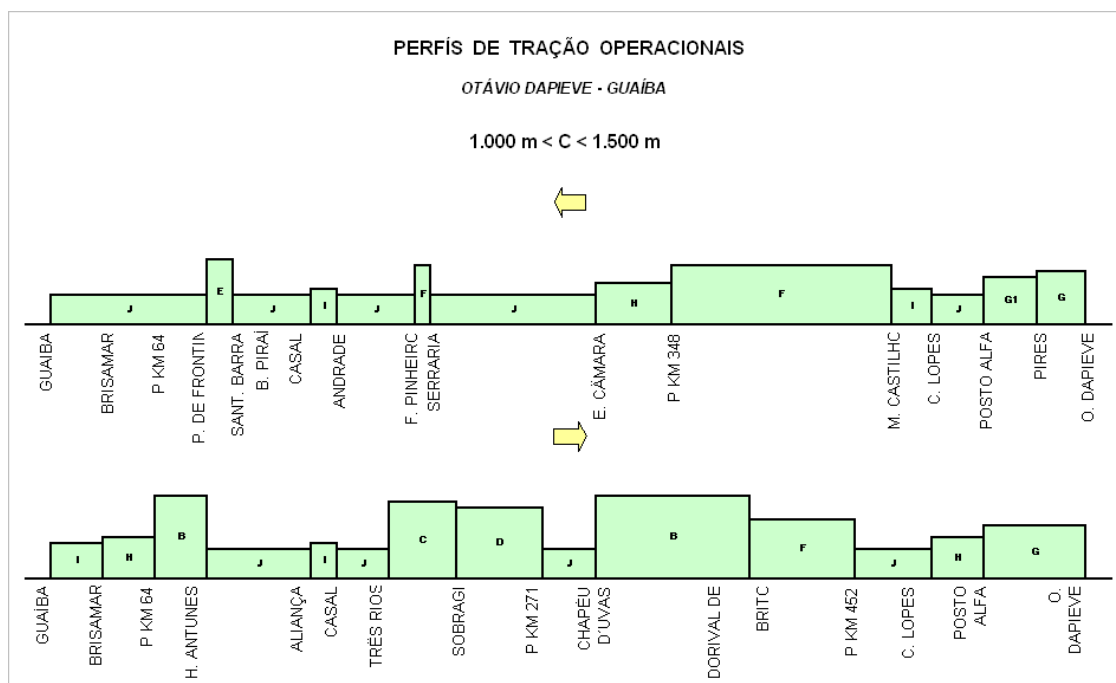


FIG. 4.5—Agrupamento de perfis por trecho em rota de trem.

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

A determinação do fracionamento das regiões a serem divididas para classificação devem seguir as orientações a seguir. Primeiramente, não se pode

trocar, adicionar e retirar locomotivas do trem em qualquer estação ou pátio. Para isso são necessários muitos recursos. Desta forma, um primeiro critério é realizar a divisão da classificação em locais onde é possível realizar estas manobras. Um segundo critério é o da sensibilidade a mudança de perfil. Geralmente ao se identificar uma rampa muito acentuada destoando das demais na região deve-se isolar o trecho, mesmo que pequeno, para mostrar que existe uma alteração pontual, o que pode indicar e favorecer a necessidade do uso de um *helper*.

4.2.3 AGRUPAMENTO DE LOCOMOTIVAS E QUADRO DE BLOCAGEM DE GRUPOS TRATORES

Posteriormente, passa-se para o levantamento da frota disponível (etapas 3), onde se deve saber a quantidade de cada tipo e modelo de locomotivas e as informações dos fabricantes (potência, autonomia, esforço trator e outras). Os grupos devem considerar suas similaridades para que as combinações entre elas não gerem muitas perdas por diferença de características e restrições na hora de tracionar um trem facilitando a formação dos grupos tratores e limitando as opções que geram perda de aproveitamento por diferença de características conforme explicado no capítulo 2. Este primeiro agrupamento, portanto, é mais simples e depende apenas das características básicas das locomotivas.

Os autores estudados criaram suas formas de se chegar a essas opções de grupos tratores. Os que obtiveram maior sucesso - Piu *et al.*(2015) e Su *et al.* (2015) -, fracionaram o problema em sendo justamente esta a primeira parte a ser resolvida na alocação. Com isso, não sobrecarregaram demais as decisões ao longo do processo com infinitas opções e cálculos.

Piu *et al.*(2015) criou um algoritmo com os parâmetros do quadro de tração para que a blocagem das locomotivas seja feita previamente de forma otimizada, reduzindo o leque de opções da modelagem que faz a otimização da alocação dos blocos já pré-determinados. Os autores constroem grupos de tração adotando os seguintes requisitos:

- Potência (HP);
- Máximo Esforço de Tração (ET);
- Classes de variações de capacidade do tanque (autonomia), devido as grandes extensões das viagens e taxa de consumo de combustível (eficiência energética).

Em Su *et al.* (2015), os autores conseguem converter o problema de alocação de múltiplas locomotivas em um problema mais simples a partir de regras de blocagem pré-determinadas pela ferrovia. Os autores agruparam as locomotivas por tipo/modelo, não as misturando para evitar perdas nas combinações de locomotivas de diferentes potências, ET, velocidades mínimas de regime, autonomia, eficiência e demais parâmetros.

Sendo uma grande vantagem o ganho de velocidade de processamento e a simplificação do modelo, ambos os artigos possuem suas similaridades quanto as variáveis que influenciam a blocagem e inspiram o presente trabalho. O agrupamento recomendado então é o da análise e blocagem prévia sem uso de algoritmos como em Su *et al.* (2015). Sabendo que as frotas nacionais são extremamente diversificadas, é recomendável considerar válido o agrupamento de modelos diferentes. Para isso, as variáveis usadas em Piu *et al.* (2015) devem ser utilizadas e, além destas o presente trabalho acrescenta outras. Os fatores recomendados neste trabalho são:

- Esforço trator máximo ($ET_{m\acute{a}x}$);
- Velocidade mínima de regime ($Vel_{m\acute{i}n}$);
- Potência máxima ($P_{m\acute{a}x}$);
- Autonomia ou capacidade do tanque de combustível;

Apesar do trabalho prévio de determinação dos blocos ser extenso, é feito uma única vez, tendo um resultado positivo na resposta do problema. Alterações parciais deste trabalho prévio são necessárias somente quando algum trem muda a rota,

locomotivas novas e de diferentes modelos integram a frota ou há alterações no traçado topográfico da ferrovia como novas linhas, construção de variantes e etc.

O Quadro de Tração das locomotivas também deve ser desenvolvido fazendo-se uso dos níveis de classificação dos perfis determinados pela etapa 2 e das locomotivas para que o quadro de tração será feito. Como mostrado anteriormente em 2.2.3, o produto final do quadro de tração é uma tabela, onde a capacidade de tração das locomotivas com suas possíveis combinações para cada classificação de perfil via (A, B, C e assim por diante até J), é mostrada quando se cruza linha e coluna. Portanto, a proposta de se utilizar a classificação de rampa compensada por faixas é gerar uma tabela de quadro de tração para cada faixa de perfil e não ter que recalculá-la para cada valor encontrado.

Baseado neste quadro de tração e no peso de arraste do trem a ser tracionado é que as possíveis combinações serão transformadas em um “cardápio” de opções para que o grupo trator seja escolhido para utilização em determinadas tabelas buscando a redução de custo. Com isso, a etapa 3 propõe a construção do Quadro de Blocagem de Grupos de Tração, que é uma matriz bidimensional onde cada elemento é a quantidade de locomotivas de determinado agrupamento j necessárias para tracionar o trem i em sua rota baseado no perfil mais crítico encontrado. A Tabela 4.3 mostra um exemplo de como é a saída desta etapa. Os números indicam a quantidade de locomotivas de cada grupo (A, B, C ou D), que tem que ser acoplada ao trem para conseguir tracioná-lo por sua rota.

TAB. 4.3 Exemplo de Quadro de Blocagem dos Grupos Tratores

#	ID Trem Tipo	Agrupamento de Locomotivas			
		A	B	C	D
1	Trem Tipo 1	2	2	3	3
2	Trem Tipo 2	3	4	5	6

Uma tarefa essencial é a determinação correta de qual o perfil da rota deve ser utilizado como crítico pois deve-se levar em conta o uso de *helpers*. Para rotas onde a criticidade maior está localizada em uma região específica, o uso de *helper* pode ser uma boa solução para resolver o problema de tração pontualmente sem sobrecarregar todos os trens com locomotivas a mais que ficarão ociosas por todo o resto do percurso.

4.2.4 CUSTO UNITÁRIO DE MANUTENÇÃO

Esta seção mostra como deve ser feita a etapa 4. As revisões e inspeções de manutenção acontecem periodicamente nas viagens, mas existem ainda revisões trimestrais, semestrais, anuais, bianuais, trisanuais e revisões gerais. Geralmente, o gatilho de manutenção das locomotivas se dá pela quilometragem percorrida ou pela quantidade de óleo diesel consumido. Portanto, fatores como extensão do trajeto, tempo de viagem, a disponibilidade e utilização da frota afetam diretamente na periodicidade que a locomotiva vai as oficinas, trocam de peças e utilizam recursos. Visto isso, existe um ponto estratégico que atribui um peso dado pelo custo de manutenção no momento da alocação ao direcionar locomotivas de alto custo para trens onde os gatilhos serão acelerados pelas ineficiências gerais como altos tempos de viagens, consumo, paradas de trem e grandes distâncias. O trabalho então propõe a determinação de um custo unitário médio de manutenção (C_{UM}), que deve ser composto pelo somatório de todo o custo dado o fechamento de um ciclo de manutenção de uma determinada locomotiva pelo fator “gatilho” da manutenção, que no caso deste trabalho é considerado o consumo de diesel. Então têm-se que o custo total do ciclo fechado de manutenção pelo consumo total durante este mesmo período. Por exemplo, um determinado modelo possui manutenções disparadas pelo consumo de óleo diesel e inspeções quinzenais, revisões trimestrais, semestrais, anuais e revisão geral bianual fechando assim um ciclo de manutenção em dois anos. Desta forma o C_{UM} será dado pelo valor gasto nestes dois anos com peças e serviços dividido pela quantidade de óleo diesel consumida pela locomotiva também neste período conforme a equação abaixo.

$$C_{UM} = \frac{\text{Custo de manutenções e revisões durante o ciclo}}{\text{Total de litros de diesel consumidos no ciclo}} \quad \text{EQ. 4.2}$$

4.2.5 MATRIZ DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A montagem de uma matriz de eficiência energética envolve uma trabalhosa tarefa de coleta de informações (etapa 5). 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 a 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, que se houver desvios, distorce o dado de abastecimento que deixa de ser útil ao propósito de EE de uma locomotiva j atuando especificamente em um trem i .

No segundo caso, é necessário o *download* dos dados do registrador de eventos da locomotiva que pode ser realizado com cartões de memória, notebooks ou através de algum ponto de rede *wi-fi* ao longo da malha. Estes dados são contínuos e remontam todo tipo de operação praticada nas viagens da locomotiva em específico. O acelerador das locomotivas varia por pontos de 0 ou *idle* a 8, sendo 8 a maior potência disponibilizada e *idle* para a menor potência (sem tracionar). O fabricante fornece o valor consumido para ponto de aceleração em fração de tempo como na figura abaixo.

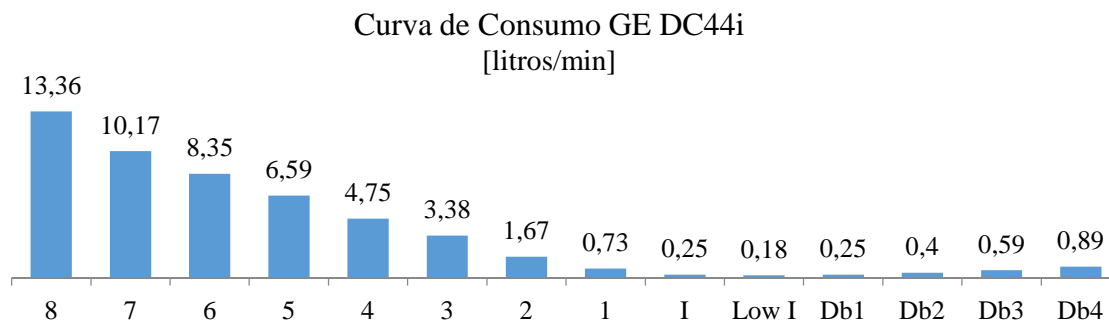


FIG. 4.6– Curva de Consumo GE DC44i

Fonte: Adaptado pelo autor através de dados do fabricante

O software que faz a leitura do arquivo do registrador de eventos realiza uma varredura tomando como referência os horários de início e fim das viagens para que, através das informações dos fabricantes possa obter um valor de consumo total da locomotiva. Apesar de ser um consumo teórico, a variação é aceitável para os propósitos deste trabalho. Casando a informação de Tkb real é possível ter a informação de EE da viagem, mais especificamente da locomotiva j no trem i . A Figura 16 mostra a visão de um software de leitura de registrador de eventos onde a informação demarcada com o retângulo vermelho indica a informação utilizada (acelerador), para medir o consumo.

Coletar toda esta informação e montar a matriz, é difícil e trabalhoso mesmo com os recursos disponíveis. Casos onde não se tem histórico de dados não são difíceis de acontecer. Por exemplo, certo modelo de locomotiva nunca ter tracionado um tipo específico de trem. Com isso, deve-se optar por estimar a EE desta locomotiva neste trem (i) através de ferramentas de simulação de condução de trens, com os parâmetros configurados de forma mais realista possível; ou (ii) estimando estatisticamente através do uso de dados de trens com características similares e que circulam pela mesma rota ou rota parecida. A Tabela 4.4 indica 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. 4.4 Exemplo de Matriz de Eficiência Energética dos grupos tratores por trem tipo

Trem Tipo	Agrupamento de Locomotivas			
	A	B	C	D
Trem Tipo 1	2,454	3,150	5,211	5,462
Trem Tipo 2	4,066	6,698	5,852	6,134

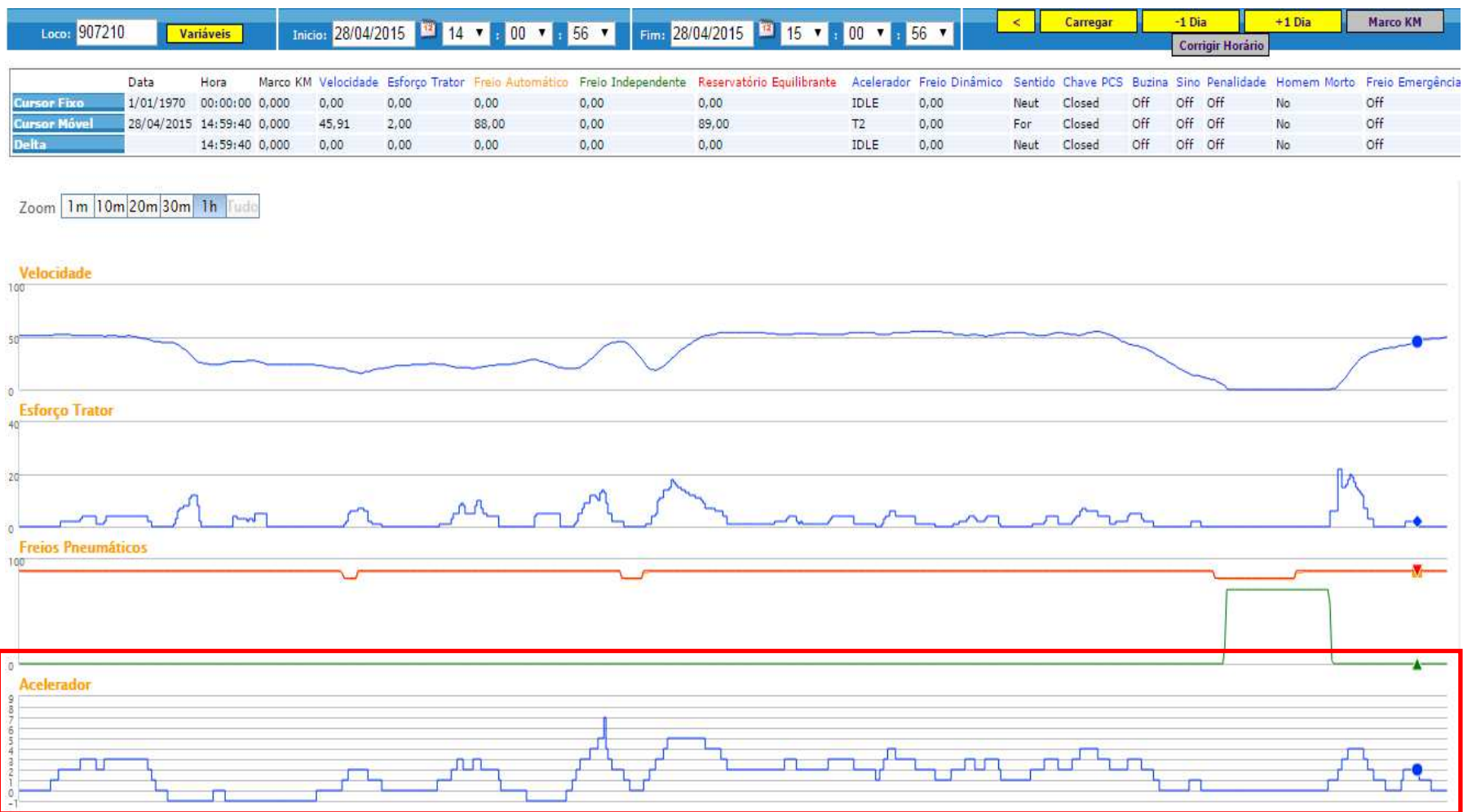


FIG. 4.7 –Visão temporal dos dados do Acelerador de uma locomotiva GE DC44I

Fonte: Software de Leitura de Registradores de Eventos SIL

4.2.6 INFORMAÇÕES DE PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

A etapa 6 consiste numa série de informações de demanda dos clientes e do próprio planejamento do transporte. O preço do óleo diesel é uma delas. Este preço está sujeito a variações regionais, temporais e usualmente o valor pago pelas ferrovias não é o mesmo valor de mercado. Ou seja, este parâmetro deve ser calibrado com uma análise particular da ferrovia em questão.

Uma composição é formada por um conjunto de vagões interligados que são tracionados pelas locomotivas através de uma malha férrea, transportando cargas ou circulando vazios. Quando se agrupa uma quantidade de vagões interligados de uma maneira padrão, apenas variando estas formações para cada trem tipo é dado o nome de tabela. Uma tabela é capaz de fazer vários ciclos de viagens, carregando, transportando, descarregando e retornando a origem sucessivas vezes por um período de tempo, a fim de realizar uma quantidade de Tkb (tonelada bruta transportada multiplicada pela quilometragem percorrida), durante um período. A quantidade de tabelas (grupos de vagões que formam um trem e necessitam de locomotivas para serem tracionados), geralmente é determinada baseando-se no volume Tu (tonelada útil), contratada pelos clientes e pelo ciclo do trem. Considerando quantidades fixas de vagões por tabela, quanto mais lento o ciclo mais tabelas serão necessárias para suprir o volume contratado, e quanto mais rápido menor a quantidade de tabelas necessárias.

Com a ajuda da Figura 4.8 pode-se fazer algumas afirmações: (i) se a tabela do trem tipo tem determinada capacidade, então é preciso fazer uma certa quantidade de viagens para transportar todo o volume; (ii) um ciclo é uma volta completa (carga, viagem carregado, descarga e viagem vazio), então se cada ciclo tem determinada duração, é preciso ter uma certa quantidade de tabelas disponíveis para transportar o volume total planejado do mês.

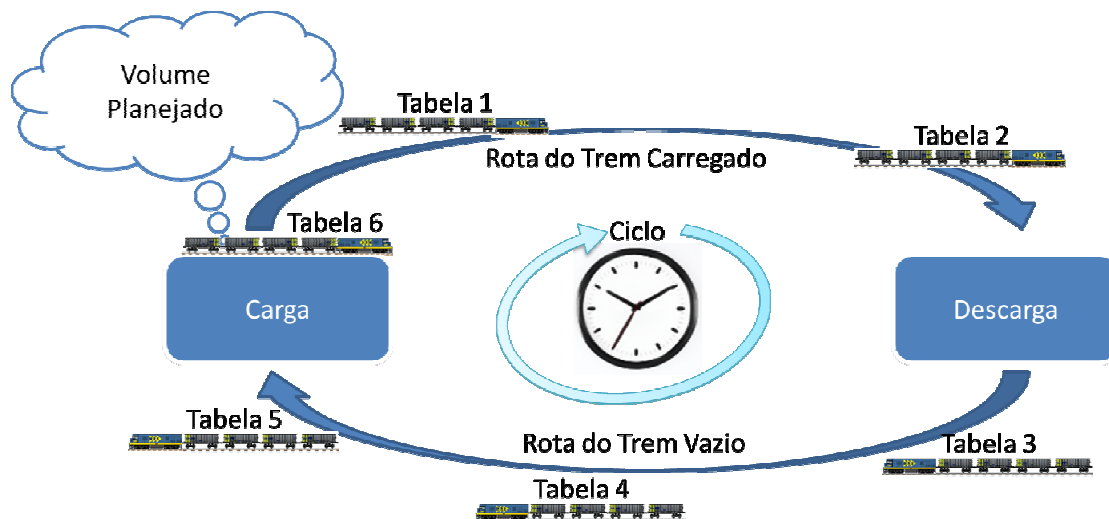


FIG. 4.8- Ilustração dos conceitos: trem, rota, ciclo e tabela.

Fonte: Autor

O Tkb que cada trem irá tracionar deve ser levantado de forma coincidente ao período em que se quer fazer o planejamento de alocação das locomotivas. Portanto, este vetor de dados é constituído pelo Tkb total de cada tipo de trem que ainda será transportado. É o planejamento mensal ou semanal de transporte já desmembrado por tipo de trem.

4.2.7 ALOCAÇÃO DOS GRUPOS DE TRAÇÃO

A etapa 7 é a alocação propriamente dita. O presente trabalho propõe, baseado nos autores pesquisados na revisão bibliográfica, o desenvolvimento e a aplicação de um modelo de otimização. O modelo proposto é simplificado, genérico e de fácil aplicação após o levantamento das informações.

A modelagem leva em conta apenas os trens que podem ser considerados cíclicos, como forma de garantir que as locomotivas tracionem sempre um mesmo trem em uma mesma rota. Considerar outros trens implica enfrentar o maior problema apontado pelos autores pesquisados que é o problema de *scheduling*,

onde os horários e rotas dos trens tem que ser considerados pátio a pátio para que em determinado pátio a alocação de um grupo trator em um trem que vai partir seja coberta em tempo hábil pelo grupo que está em um trem que ainda vai chegar considerando tempos de manobra, tempos de espera, recursos do pátio e garantia de lotação. Os modelos que consideraram o problema de *scheduling* tem tempos de solução impraticáveis, onde em vários casos os inputs se alteram antes que a resposta seja fornecida. Além disso, nas ferrovias brasileiras, trens agendados são menos frequentes já que os principais produtos transportados são *commodities* e principalmente à granel. O primeiro passo na modelagem é, portanto, a seleção dos trens tipo.

4.2.7.1 FUNÇÃO OBJETIVO

Inicialmente, é preciso considerar que j é um elemento correspondente a um grupo trator formado por uma ou mais locomotivas, então $j \in J$, onde J é o conjunto que representa todos os agrupamentos de locomotivas existentes na frota. Da mesma forma, se i é um elemento correspondente a um trem então $i \in I$, onde I é o conjunto de trens considerados na modelagem.

Com esses conjuntos definidos e analisando a diversidade dos trens em uma ferrovia, suas diferenças de trajeto ou distância percorrida, volume transportado ou Tkb (tonelada bruta x quilômetro transportado), consumo de diesel e tipos de locomotivas utilizadas, é possível entender, por meio da equação da eficiência energética (Equação 4.1), que cada trem tipo terá sua eficiência energética (EE_i). Então, é possível expandir a formulação como na Equação 4.3.

$$EE = \frac{L}{Tkb} \cdot 10^{-3} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_1}{Tkb_1} + \frac{L_2}{Tkb_2} + \frac{L_3}{Tkb_3} + \dots + \frac{L_n}{Tkb_n} \right) \cdot 10^{-3} \quad \text{EQ. 4.3}$$

Onde

n : número de tipos de trens selecionados;

EE : eficiência energética da ferrovia

Supondo um tipo de trem específico e sua EE_i , a formulação da Equação 4.3 pode ser representada conforme a Equação 4.4, onde se pode encontrar o total de litros consumidos pelo trem tipo.

$$L_i = EE_i.Tkb_i.10^{-3} \quad \text{EQ. 4.4}$$

Onde

i : tipo de trem i .

Considerando-se os diversos grupos de tração que formam as diversas composições (ou tabelas), obtêm-se a Equação 4.5, como uma expansão da Equação 4.4 onde se aplica o somatório do consumo de todos os tipos de trem i variando agora os grupos tratores j .

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m EE_{ij}.Tkb_{ij}.10^{-3} \quad \text{EQ. 4.5}$$

Onde

j : variação dos diversos grupos tratores que estão formando as composições.

i : variação dos diversos tipos de composições ou trens tipo.

EE_{ij} : a eficiência energética de um determinado tipo de locomotiva j no trem tipo i .

Tkb_{ij} : o Tkb realizado pelo tipo de locomotiva j no trem tipo i .

n, m : são as quantidade total de elementos nos conjuntos de trens e grupos tratores respectivamente.

Se cada trem tipo tem uma Tkb_i total planejado para ser realizado no período, pode-se dizer que será necessária uma quantidade de tabelas T_i circulando simultaneamente para que o plano seja atendido neste mesmo período. Portanto, a quantidade de tabelas depende da Tkb , e do ciclo do trem, ou seja, quanto menor o ciclo, mais Tkb uma única tabela será capaz de fazer dentro do período planejado.

Considerando que a variável de saída do modelo deveria ser a variável X_{ij} - que representa a quantidade de locomotivas do grupo j destinadas e alocadas ao trem tipo i -, e que l_{ij} é o Quadro de Blocagem dos Grupos Tratores definido anteriormente, ou seja, a quantidade de locomotivas do grupo j necessárias para tracionar uma tabela do trem tipo i , então pode-se dividir X_{ij} por l_{ij} e obter a quantidade de tabelas do trem tipo i tracionadas por locomotivas do tipo j . Portanto, o Tkb_{ij} é uma parte do Tkb_i que estão sendo tracionada pelas locomotivas tipo j . Ou seja, o Tkb_{ij} é o percentual de tabelas do trem i formadas por locomotivas do tipo j multiplicado pelo Tkb_i (Equação 4.6).

$$Tkb_{ij} = \frac{X_{ij}}{l_{ij}} \cdot Tkb_i \quad \text{EQ. 4.6}$$

Onde

X_{ij} : quantidade de locomotivas do grupo j que serão alocadas no trem tipo i ;

l_{ij} : quantidade de locomotivas do grupo j necessárias para tracionar uma tabela do trem i ;

t_i : número de tabelas total do trem tipo i ;

Tkb_i : Tkb total do trem tipo i .

Logo,

$$L_{ij} = EE_{ij} \cdot \frac{X_{ij}}{t_i \cdot l_{ij}} \cdot Tkb_i \cdot 10^{-3} \quad \text{EQ. 4.7}$$

Como a quantidade de litros consumidos por cada tipo de locomotiva dispara os gatilhos de manutenção, pode-se ainda atrelar a modelagem o custo unitário de manutenção C_{UMj} e ao custo real do diesel C_D .

Assim, como o objetivo do modelo proposto é minimizar o consumo de combustível L na ferrovia, substitui-se a Equação 4.6 na Equação 4.7, de modo a se obter a função objetivo do modelo proposto apresentada na Equação 4.8, sendo X_{ij} as variáveis de resposta como descritas anteriormente.

$$\text{Min}_{_} \text{CustoTotal} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} \cdot (C_D + C_{UMj}) \cdot EE_{ij} \cdot \frac{Tkb_i}{t_i \cdot l_{ij}} \cdot 10^{-3} \quad \text{EQ. 4.8}$$

4.2.7.2 RESTRIÇÕES BÁSICAS DO MODELO

Esta função de otimização está sujeita às restrições básicas e genéricas de quantidade de locomotivas disponíveis por grupo (Equação 4.9) e pela quantidade de tabelas necessárias para cada tipo de trem (Equação 4.10), conforme equações a seguir.

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq L_j \quad \text{EQ. 4.9}$$

Sendo $1 \leq j \leq n$;

$$\sum_{j=1}^m \frac{X_{ij}}{l_{ij}} = t_i \quad \text{EQ. 4.10}$$

Sendo $1 \leq j \leq m$;

$$X_{ij} \geq 0 \quad \text{EQ. 4.11}$$

$$X_{ij} \text{ inteiro} \quad \text{EQ. 4.12}$$

Outras restrições além destas devem ser complementadas de acordo com as particularidades de cada aplicação e cada ferrovia em questão. Por exemplo, por uma restrição de via permanente, uma determinada locomotiva que possui maior peso por eixo e não é autorizada a trafegar em determinado trecho ou possui bitola diferente da via que é parte da rota de algum trem. Deve haver, portanto uma restrição para $X_{ij} = 0$ para determinado grupo trator j no trem i restringindo o uso deste grupo trator no determinado trem. Reunindo então todas as variáveis, temos a tabela resumo.

TAB. 4.5 Tabela resumo de variáveis do modelo

Variável	Definição	Unidade
X_{ij}	Quantidade de Locomotivas do grupo j no trem i	Locomotivas
C_D	Custo do litro de óleo diesel	R\$
C_{UMj}	Custo unitário de manutenção para cada locomotivas do grupo j	R\$ / litro
EE_{ij}	Eficiência Energética do grupo de locomotivas j no trem tipo i	litros / 1000. Tkb.
Tkb_i	Tkb total tracionada pelos trens tipo i	Ton.bruta x km
t_i	Quantidade de tabelas no trem tipo i	Tabelas
I_{ij}	Quantidade de locomotivas do grupo j necessárias para tracionar 1 trem i	Locomotivas
L_j	Total de locomotivas disponíveis do grupo j para alocação	Locomotivas

5 APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE PLANEJAMENTO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Esta seção traz uma aplicação prática do modelo estruturado neste trabalho. A aplicação e estudo de caso foi realizada baseada nos dados da MRS Logística S.A., que na divulgação deste trabalho se apresentam ligeiramente distorcido por uma questão de sigilo. Para a aplicação do modelo, o processo da empresa foi estudado no detalhe e é destacado neste capítulo.

5.1 AS ETAPAS DO PROCESSO DE ALOCAÇÃO DE LOCOMOTIVAS

Toda operação em uma empresa de transporte ferroviário tem início na geração de demanda pelo cliente, cuja responsabilidade de solicitação de atendimento é da área Comercial. Porém, compete a área de Planejamento, Programação e Controle Operacional (PPCO), viabilizar o atendimento da demanda solicitada pelo Comercial, sendo responsável pelos seguintes pontos:

1. Dimensionar os recursos e planejar os meios de atender esta demanda;
2. Negociar com as áreas responsáveis pela disponibilização de ativos e equipes todos os recursos;
3. Planejar com o auxílio das áreas executoras (Operação de Trens, Centro de Controle de Operações, Pátios e Terminais), e também com áreas de suporte técnico da empresa como Engenharia de Operações, os detalhes relativos ao atendimento.

Toda solicitação de atendimento a volumes de transporte feitos pelo Comercial deve levar em conta as regras de lote mínimo de vagões para faturamento e transporte, já que a ferrovia trabalha com ganhos em escala. A Comercial é responsável por manter atualizadas as informações relativas aos volumes de transporte de curto, médio e longo prazo. Estas informações são utilizadas para o dimensionamento e planejamento dos Planos de Produção dando origem aos planos e orçamentos de volumes a serem transportados.

Com base na demanda o dimensionamento de recursos, o planejamento da operação é feito buscando o atendimento total da demanda solicitada pelo Comercial. São previstos os seguintes dimensionamentos para atendimento a demanda de transporte:

- 1) Quantidade de vagões previsto para atendimento de transporte;
- 2) Quantidades de vagões/dia previstos para definição dos Planos Produção;
- 3) Quantidade de trens por modelo padrão que precisamos para movimentar estes vagões (tabelas);
- 4) Quantidade de locomotivas para tração fixa e, caso seja preciso, tração auxiliar necessárias para atendimento a essas tabelas;
- 5) Quantidade de equipes (maquinistas e auxiliares), necessários para atendimento destes trens em todo o seu itinerário.

O dimensionamento de recursos é elaborado baseado em dados históricos do ciclo quando pertinente, podendo também ser utilizado o Desenho Operacional Padrão do trem. O plano é submetido a análise dos responsáveis pela disponibilização de ativos e equipes de operação de trens e comunicados antecipadamente às áreas executoras. O presente trabalho entra na quarta etapa da metodologia adotada pela ferrovia em questão.

5.2 TIPO DE TREM

Conforme exposto no Capítulo 4, o modelo foca na alocação das locomotivas em trens com características cíclicas. Desta forma, um levantamento de todos os trens elegíveis foi realizado, e com isso a listagem abaixo foi obtida totalizando 14 trens tipo.

As Figuras 5.1 e 5.2 mostram as rotas dos trens selecionados no mapa da malha.

TAB. 5.1 Resumo dos Trens Selecionados

ID do Trem	Mercadoria	Origem	Destino	Tkb (i)	T (i)
FER	Ferro Gusa	Terminal Sarzedo Novo (MG)	Arará/Porto do Rio de Janeiro (RJ)	35.007.783	5
JDN1	Produtos Agrícolas	Terminal de Boa Vista (SP)	Porto de Santos (SP)	24.420.296	2
JDN2	Produtos Agrícolas	Itirapina (SP)	Porto de Santos (SP)	89.027.449	4
JDN3	Produtos Agrícolas	Porto Hidroviário Pederneiras (SP)	Porto de Santos (SP)	88.062.539	8
JDN5	Produtos Agrícolas	Terminal Pradópolis (SP)	Porto de Santos (SP)	18.807.960	1
JDU	Produtos Agrícolas	Porto Hidroviário Pederneiras (SP)	Porto de Santos- Margem Esquerda(SP)	8.018.884	2
NEXP	Minério de Ferro	Região do Paropeba (MG)	Portos do Rio de Janeiro (RJ)	6.053.716.142	62
NEV	Minério de Ferro	Terminal Casa de Pedra (MG)	Terminal Volta Redonda (RJ)	151.274.347	4
AUX-FA	Helper	Pátio P1-07 (MG)	Pátio Bom Jardim (MG)	1.067.617.833	42
AUX-SM	Helper	Pátio de Barra do Pirai (RJ)	Pátio Humberto Antunes (RJ)	123.413.500	4
NEZ	Minério	Terminal Córrego do Feijão (MG)	Terminal de Ouro Branco (MG)	34.031.091	3

TOD	Bauxita	Pátio Barão de Angra (RJ)	Alumínio (SP)	57.738.516	4
HPN	Celulose	Pátio São Silvestre (SP)	Porto de Santos (SP)	14.532.954	5
QVL	Carvão Coque	Porto de Sepetiba (RJ)	Terminal Volta Redonda (RJ)	42.448.345	5

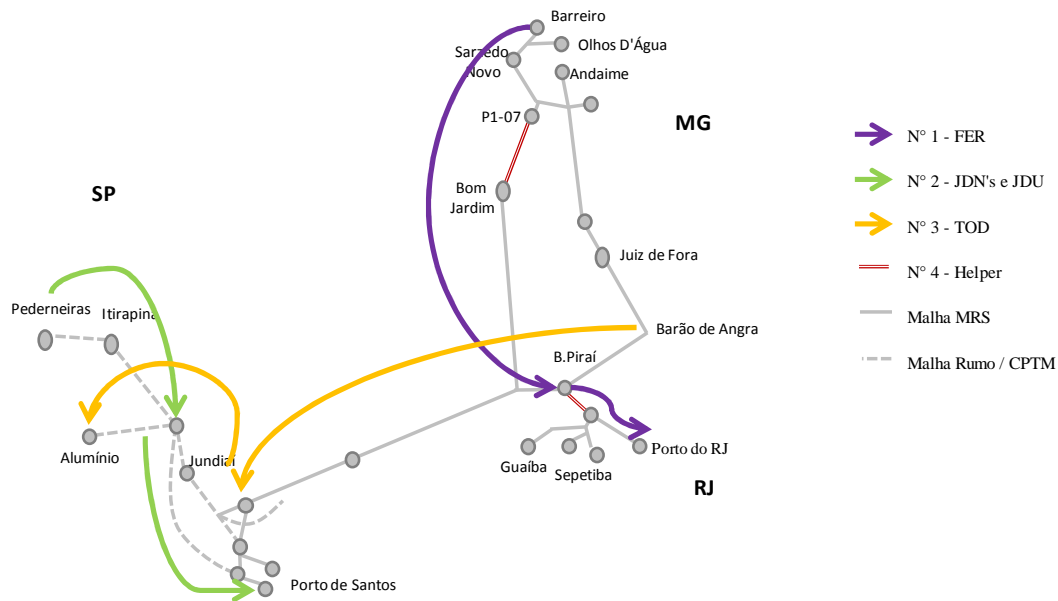


FIG. 5.1– Rotas dos trens seleccionados – parte 1

Fonte: Adaptado pelo autor

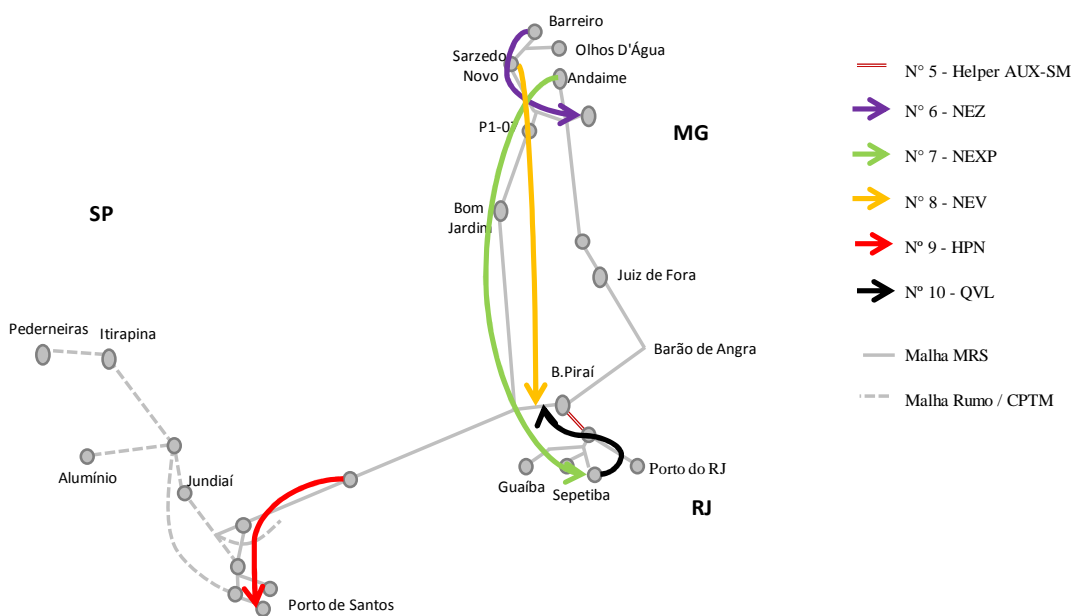


FIG. 5.2– Rotas dos trens selecionados – parte 2

Fonte: Adaptado pelo autor

O gráfico abaixo mostra a divisão total do Tkb durante o período estudado. Os trens estão agrupados de acordo com sua primeira letra do ID do trem tipo da Tabela 5.1.

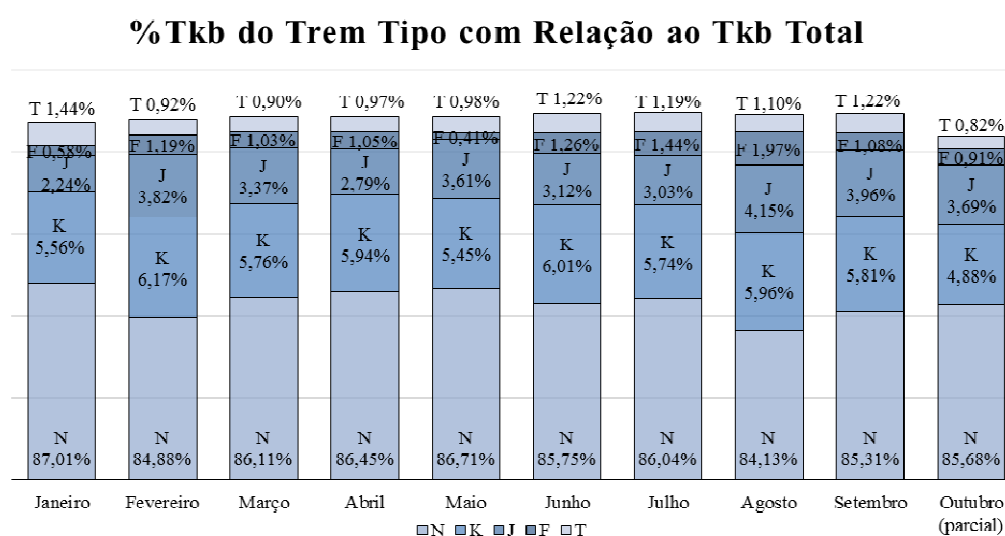


FIG. 5.3– % do Tkb total coberto pelos trens selecionados

Fonte: Adaptado pelo autor

Os trens selecionados representam mais que 90% do Tkb tracionado em quase todos os meses do ano de 2016, que é o período em que os dados foram coletados para o trabalho.

5.3 TIPO DE LOCOMOTIVAS DA FROTA

Através das informações dos fabricantes, as principais locomotivas em uso foram agrupadas segundo suas principais características. O nome dos grupos foi adotado de forma aleatória como sendo 10 as mais potentes e que aguentam maior

esforço e decrescendo a partir desta lógica. Este processo se mostrou vantajoso pois constatou-se muitos 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 dentre outras. Essas modificações, que aconteceram principalmente nas locomotivas mais antigas (grupos 7 e 8), homogeneizou um pouco mais a frota. A tabela abaixo resume os dados utilizados.

TAB. 5.2 Resumo do Agrupamento de Locomotivas

Grupo	Locomotiva	Potência Máxima (HP)	Capacidade do Tanque (l)	ET _{MAX} (ton)	Vel _{Min} (km/h)
10	GE-AC44i	4.400	18.000	68000	15,0
9	GE-C44-EMI	4.400	18.000	49546	20,0
8	GE-C36-7	3.600	15.000	40969	19,2
8	GE-C36-S7	3.600	15.000	40969	19,2
8	GE-MX36-MP	3.600	15.000	40969	19,2
8	GE-C30-8	3.600	15.000	40969	19,2
8	GE-C36-ME	3.600	15.000	40969	19,2
7	GE-C30-7	3.000	15.000	40969	17,4
7	GE-U30C	3.000	15.000	40969	17,4
7	GE-C30-7MP	3.000	15.000	40969	17,4
7	GE-SF30-C	3.000	15.000	40969	17,4
7	GM-SD40/3	3.000	15.000	40969	17,1

As locomotivas mais antigas sofreram adaptações tecnológicas, a grande maioria delas recebeu um sistema de controle de tração e proteção do sistema de motores. Os valores similares de esforço trator se devem a limitação imposta pelo dispositivo que limitou essa força ao parâmetro do peso aderente das locomotivas

do grupo 8 e 7 que é idêntico (180 ton). Ao ultrapassar determinado valor de força, pode haver deslizamento de rodas. Outro fator que contribui é que muitas delas, por serem do mesmo fabricante, utilizam o mesmo conjunto de motor diesel e/ou tração, variando o modelo em outros aspectos.

5.4 BLOCAGEM DOS GRUPOS DE TRAÇÃO

O quadro de tração da empresa foi revisado e atualizado em 2015. Esta revisão foi utilizada no trabalho. Através do desenho das rotas dos trens, exemplificado anteriormente pela Figura 4.5, encontra-se o perfil crítico e assim pode-se determinar quantas locomotivas de cada grupo são necessárias para tracionar o trem.

Como exemplo, serão demonstrados os valores encontrados para o NEXP. O trajeto percorrido por este trem é o representado na Tabela 5.3. O trem carregado parte da região de Otávio Dapieve e segue para a região do porto de Guaíba. As variações de locais próximos a origem ou destino não interferem na criticidade das seções de rampas aqui demonstradas.

TAB. 5.3 Mapeamento de perfis críticos da rota do NEXP

Início	Fim	Perfis Críticos por trecho da rota	Uso de <i>Helper</i> ?
FOO	FLO	G	AUX-FA
FLO	FOJ	GG	AUX-FA
FOJ	FBP	JJ	-
FBP	FSB	JJ	-
FSB	FER	E	AUX-SM
FER	FGI	J	-

A partir do mapeamento dos perfis e de informações da empresa, vemos que nos locais de classificação de perfis G, GG e E, são utilizados *helpers*. Este procedimento é normal na empresa devido ao grande volume e variedade de trens que passam por estes trechos que são curtos mas muito relevantes em termos de resistência ao movimento. Portanto os demais trechos críticos são JJ e J. Considerando que o pior perfil é o J, podemos agora utilizar o quadro de tração com a planilha de perfil específica. Para não estender, utilizou-se apenas as principais locomotivas de cada grupo resumindo o quadro na Tabela 5.4.

TAB. 5.4 Quadro de Tração para Perfil J Resumido

PERFIL: J	GE-AC44i	GE-C30	GE-C36	GE-C44
(Representantes dos grupos)	13,5	17,4	19,2	20,0
GE-AC44i	9.288	7.315	6.557	6.302
GE-C30		4.945	4.445	4.284
GE-C36			4.926	4.648
GE-C44				5.973

Como o trem NEXP pesa cerca de 17.000 Tb, com esse quadro é possível verificar a capacidade de tração das locomotivas no perfil J quando combinadas e verificar a necessidade de cada uma em termos de quantidades. Sendo então 2 para grupo 10, 3 para grupo 9 e 4 para grupos 7 e 8.

TAB. 5.5 Quadro de Capacidade de Tração NEXP

Tipo de Locomotiva	Capacidade de Tração das Locomotivas x Quantidade Perfil J					
	1	2	3	4	5	6
Grupo 10	9.288	18.576	27.864	37.152	46.440	55.728

Grupo 9	5.973	11.946	17.919	23.892	29.864	35.837
Grupo 8	4.926	9.852	14.779	19.705	24.631	29.557
Grupo 7	4.945	9.889	14.834	19.778	24.723	29.668

Já o helper, este deve ser dimensionado para o trem mais pesado que passa pelo local e que irá utilizá-lo, neste caso o próprio NEXP. Então temos a mesma tabela de capacidade de tração para o perfil G. A quantidade então é dada pelo excedente a quantidade encontrada na Tabela 5.2.

TAB. 5.6 Quadro de Capacidade de Tração AUX-FA

Tipo de Locomotiva	Capacidade de Tração das Locomotivas x Quantidade - Perfil G					
	1	2	3	4	5	6
Grupo 10	5.696	11.393	17.089	22.785	28.482	34.178
Grupo 9	3.659	7.317	10.976	14.635	18.294	21.952
Grupo 8	3.009	6.017	9.026	12.034	15.043	18.051
Grupo 7	3.016	6.032	9.048	12.064	15.080	18.096

O Quadro de Blocagem dos Grupos Tratores então é estabelecido ao se repetir este procedimento para todos os outros trens.

TAB. 5.7 Quadro de Blocagem dos Grupos Tratores

#	ID Trem	10	9	8	7
1	FER	2	2	3	3
2	JDN1	3	4	5	6
3	JDN2	3	4	5	6
4	JDN3	3	4	5	6
5	JDN4	3	4	5	6

6	JDU	2	3	4	5
7	NEXP	2	3	4	4
8	NEV	2	3	3	3
9	AUX-FA	1	2	2	2
10	AUX-SM	2	3	3	4
11	NEZ	2	3	3	4
12	TOD	1	2	3	3
13	HPN	1	2	2	2
14	QVL	2	2	3	3

5.5 CUSTO UNITÁRIO DE MANUTENÇÃO E CUSTO DO DIESEL

Analisando o histórico dos gastos com manutenção dos últimos 3 anos das locomotivas agrupadas e também o histórico de abastecimento de cada uma, é possível chegar no custo unitário de manutenção. Foram levantados os valores de gastos referentes aos últimos 3 anos e igualmente alterados por uma constante de proporcionalidade apenas com o intuito de não expor os dados diretamente. Existe uma certa similaridade nos custos de grupo 9 e 10, mas um salto discrepante para os grupos 8 e 7 talvez denotando a idade da frota e sua maior necessidade de intervenções preventivas e corretivas. A Tabela 5.8 mostra os valores do custo unitário de manutenção.

TAB. 5.8 Tabela de custo unitário de manutenção

Grupo	R\$/litros consumidos
10	0,0012

9	0,0065
8	0,0470
7	0,0717

O custo do diesel adotado foi uma referência que difere dos postos de abastecimentos comuns de rodovia, pois como os postos ferroviários consomem em larga escala o preço é reduzido não se comparando ao mercado comum. O valor de R\$ 2,10 foi adotado arbitrariamente.

5.6 MATRIZ DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A matriz de EE foi obtida com dados de viagens cruzados com os dados dos registradores de eventos das locomotivas. No caso da empresa em questão, em boa parte da malha as informações dos registradores de eventos são coletadas via um sistema *wi-fi* instalado nas margens da ferrovia. O sistema faz o *download* de pequenos blocos de arquivos sempre que o trem passa por uma de suas antenas. Um outro sistema de desenvolvimento próprio, junta essas informações identificando a locomotiva que enviou o dado, o trem, o maquinista, local e horário de passagem. Todas essas informações ficam armazenadas em um banco de dados temporal PIMS (*Process Information Management System*), que compacta e armazena os dados de diversas variáveis de todas as locomotivas da empresa que possuem registradores de eventos. Um outro sistema de construção própria da empresa, sincroniza a informação de horário de passagem dos trens pelos pátios e faz varreduras através de lógicas buscando erros de condução e condições inseguras de operação dos trens. Este mesmo sistema foi adaptado para que fizesse varreduras no parâmetro do acelerador (*throttle*), integrando a informação de viagens completas e cruzando com as informações do fabricante para mostrar os resultados de consumo teórico obtidos nas viagens.

De posse de todas essas informações, foi levantada uma base histórica de janeiro a setembro de 2016 onde foram obtidos 116.198 registros de viagens dos trens escolhidos. Com base na média dos valores litros consumidos e Tkb transportados, foram coletados para cada trem tipo eleito o valor da EE aplicando-se a formulação anteriormente apresentada. Um extenso trabalho de tratamento de dados e seleção de viagens foi realizado para a formação desta base. As informações foram tratadas em planilhas eletrônicas, e com isso o tratamento de dados foi pautado na exclusão de erros de medição e dados não conforme.

Dos vários problemas apresentados um dos principais foi a descoberta de erros na medição por diferença de horário entre os relógios do software da locomotiva e do software do banco de dados da ferrovia, que marca os horários das viagens com chegada e partida dos pátios e dos locais. Um exemplo clássico deste caso é o erro pelo não ajuste do horário de verão no software das locomotivas, que se mostrou comum. Com horários incorretos, o cálculo dos litros consumidos também se distorce e por vezes com magnitude suficiente para distorcer as análises.

Outro erro é o que foi denominado como falta de registro. Este erro denomina a simples falta injustificada de um pedaço do registro da viagem em uma locomotiva. Não foi possível achar motivos aparentes para a causa, porém não é incomum a ausência de alguns minutos da viagem, que dependendo da relevância do trecho pode impactar no resultado final.

Para todos estes erros, foi identificada uma forma de identifica-los na imensa base de dados e excluir casos suspeitos. Houve ainda a retirada dos *outliers* baseado no consumo em litros, para mais e para menos, das referências médias. Como alguns trens em alguns trechos possuíam pouquíssimas amostras, o corte foi manual, sem regra evidente. Nos demais, onde as bases dados era extensa e abundante, foi adotado o corte dos trens que consumiam mais que os percentis P90 e dos abaixo do P10.

Todo este esforço resultou na quantidade de viagens descritas anteriormente e que foi considerada satisfatória para a aplicação. Logicamente, atualizações e incrementos destas bases de dados são bem vindas e desejáveis de tempos em tempos, pois não são tão incomuns mudanças em procedimentos de condução,

aumentos ou reduções nas velocidades limites da via, incremento de manutenções em determinados trechos e épocas e alterações sazonais, sejam devido a modificações da demanda ou seja devido a alterações climáticas que podem influenciar não só na ferrovia mas também nas atividades dos clientes.

Os valores podem ser vistos na Tabela 5.9.

TAB. 5.9 Tabela de Eficiência Energética dos grupos tratores por trem

Trem	Grupo trator			
	10	9	8	7
FER	2,454	3,150	5,211	5,462
JDN1	4,066	6,698	5,852	6,134
JDN2	3,832	5,355	6,333	6,638
JDN3	3,953	3,052	5,867	6,150
JDN5	3,759	5,255	5,919	6,204
JDU	3,872	5,412	5,658	5,930
NEXP	2,259	2,777	5,614	5,884
NEV	2,317	2,605	5,266	5,519
AUX-FA	2,085	2,130	4,306	4,840
AUX-SM	3,177	3,246	4,447	5,000
NEZ	2,571	3,398	5,860	6,588
TOD	2,419	3,185	4,365	4,907
HPN	3,619	4,766	9,002	10,120
QVL	3,303	3,550	4,865	5,469

O grande desafio desta etapa é que locomotivas em posições diferentes em uma mesma composição e viagem possuem consumos diferentes. Deve-se então utilizar

viagens que possuam apenas informação completa de todas as locomotivas da composição, isso elimina muitas viagens e dificulta a coleta de dados naqueles trens onde raramente o trem passa por um ponto de rede *wi-fi*. Alguns casos fazem necessário realizar o *download* manualmente, e a falta de infraestrutura do local algumas vezes dificulta a coleta. Outro ponto é que principalmente a região do interior de São Paulo, eixo de escoamento de produtos agrícolas, boa parte das locomotivas utilizadas não possuem registrador de eventos e torna-se ainda mais raro um trem com informações completas para se extrair dados. Outras locomotivas nunca tracionaram ou viajaram por lá, gerando ausência de informações.

Essas lacunas foram completadas forçando situações favoráveis a coleta de dados e inevitavelmente através de estimativas de EE baseado em trens com características similares (geográficas e operacionais), onde locomotivas do mesmo modelo tracionaram com dados disponíveis.

5.7 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A implementação desta modelagem foi realizada no software AIMMS 4.21.5 sendo resolvido como um problema de programação linear inteira mista (MIP) através de um solver CPLEX 12.6.3, que com 57 variáveis e 19 restrições apresentou a resposta ótima. O modelo partiu de uma alocação manual feita pelo próprio autor orientando-se pelas regras de alocação da ferrovia em estudo.

5.8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O objetivo desta seção é realizar a análise dos dados de saída do modelo. Foram realizadas duas análises básicas a respeito da alocação. No caso estudado, buscou-se alocar as locomotivas nas tabelas dos trens selecionados para o problema da forma como é realizado atualmente. A área de planejamento faz o

plano de alocação sem a ajuda de quaisquer ferramentas, considerando alguns critérios e regras básicas onde as melhores locomotivas são alocadas (i) aos trens de *heavy haul* e (ii) aos clientes de maior volume contratado. Desta forma, os trens de minério são sempre priorizados em detrimento dos trens de carga geral, recebendo sempre as locomotivas mais modernas. Por uma antiga determinação da área de engenharia, um *mix* de locomotivas dos grupos 9 e 10 é adotado exclusivamente para os trens de minério de ferro, tanto para mercado interno quanto exportação. Os motivos da preferência para estes trens são maior peso e carga concentrada, maior regularidade de volume e da formação do trem. Ou seja, estes trens possuem sempre 134 vagões e o peso variando entre 14.000 ton e 18.000 ton dependendo do tipo de minério e da variação do carregamento. Esses dois grupos atendem a esta variação de peso com um número reduzido de locomotivas.

Suprindo então a necessidade das tabelas com locomotivas destes grupos, o restante foi alocado de acordo com o histórico de utilização. A Figura 5.4 apresenta o resultado da alocação e a quantidade de locomotivas utilizada em cada trem.

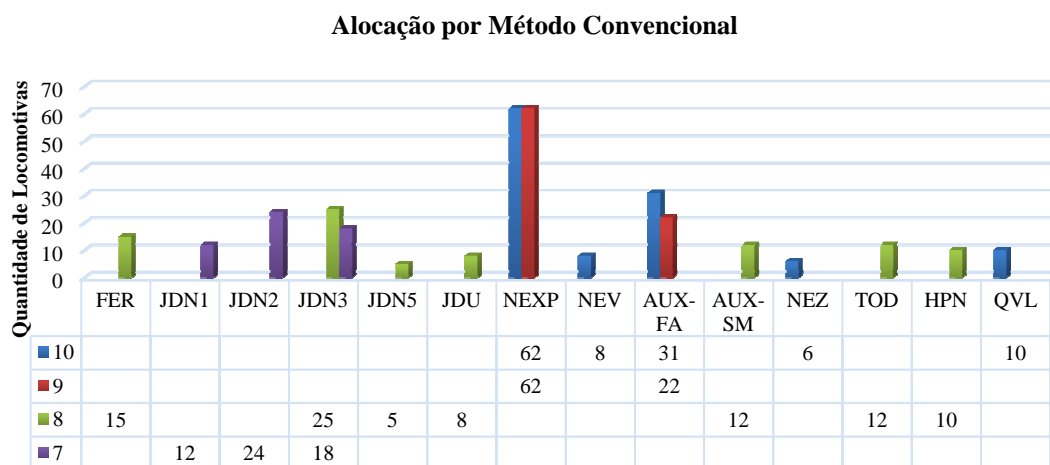


FIG. 5.4– Alocação manual de locomotivas

Fonte: Adaptado pelo autor

Uma calculadora de custo foi construída com os mesmos parâmetros do modelo para que fosse possível estimar o custo da operação no *status quo* do processo de

alocação de locomotivas. A Tabela 5.10, mostra quantas locomotivas foram utilizadas e o custo mensal.

TAB. 5.10 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – alocação manual

Grupos	10	9	8	7
Total de utilizadas	117	84	87	54
Custo da Operação R\$	43.469.177,93			

Na primeira rodada com o modelo duas restrições a mais foram inseridas. As locomotivas do grupo 10 não podem circular no trecho de acesso do Terminal Portuário de Pederneiras devido a uma restrição de via permanente que as limita pelo seu peso por eixo e não é possível se fazer alguma substituição ao longo do caminho por falta de recursos. Portanto estão restritas a esta rota.

Com base nessas quantidades de locomotivas o modelo foi alimentado para uma primeira análise do problema, onde as quantidades de locomotivas utilizadas como entrada é a mesma gerada pela necessidade de alocação manual exposta no exemplo anterior.

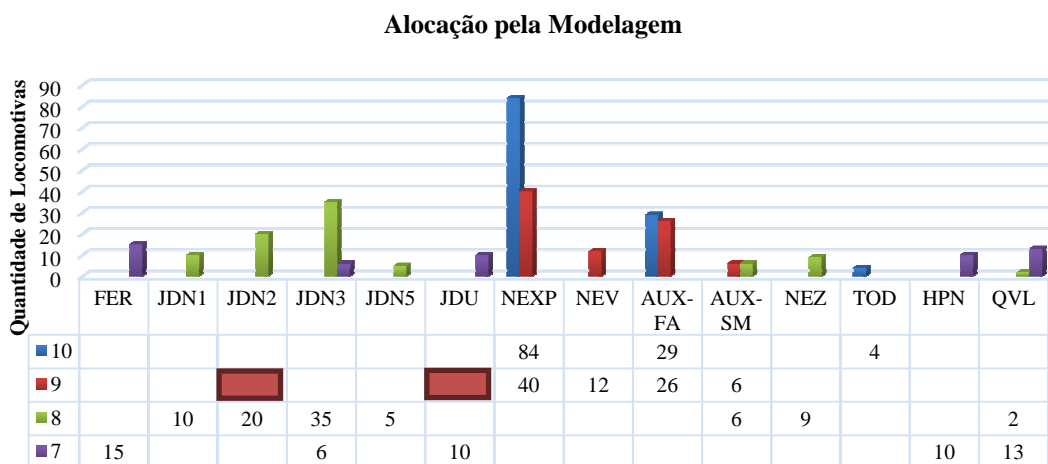


FIG. 5.5 - Primeira alocação pela modelagem

Fonte: Adaptado pelo autor

As locomotivas do grupo 7, que eram todas dedicadas aos fluxos de trens agrícolas agora também tracionam HPN (celulose) e QVL (carvão), sendo que o QVL antes considerado prioritário para grupo 10 é indicado para ser tracionado com grupo 7 e 8.

Os trens de agrícolas (JDN's e JDU), se mantêm sendo tracionados pelos grupos 7 e 8. Porém algumas alterações entre quais rotas tracionam quais grupos indicam melhorias e redução de custos nesses fluxos mesmo trabalhando com os mesmos grupos.

O minério exportação (NEXP), recebe maior ênfase no uso de grupo 10, reduzindo a proporção meio a meio estabelecido como regra pela empresa. O minério interno NEV por sua vez, perde as locomotivas do grupo 10 para o NEXP e passa a ser tracionado exclusivamente com grupo 9. Assim como o minério interno NEZ que também perde as locomotivas grupo 10 para utilizar grupo 8. O *helper* AUX-FA, permanece sem muitas alterações e o AUX-SM passa a receber locomotivas do grupo 9 indicando uma tendência a priorização.

Um grande destaque deve ser dado para o TOD, que sempre foi tracionado com grupo 8 e recebeu a recomendação para grupo 10, o que historicamente não existe de forma sistêmica no registro nos dados reais no período avaliado.

Com isso, a mesma quantidade de locomotivas foi utilizada, mas o resultado de custo foi menor que o anterior. Para efeito de comparação segue a tabela no mesmo formato anterior. A diferença de R\$ 1.097.524,90 mensais é relevante. Certamente haveria uma variação mensal de acordo com a mudança das demandas e disponibilidade de locomotivas, mas o valor anual de ganho gira em torno de R\$ 12 milhões de reais por ano. Considerando que o valor aproximado de uma locomotiva no mercado é de cerca de R\$8 milhões, o ganho pode ser considerado relevante. O procedimento proposto, portanto, é satisfatório.

TAB. 5.11 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – alocação do modelo

Grupos	10	9	8	7
Total de utilizadas	117	84	87	54
Custo da Operação R\$	42.371.653,03			
Diferença R\$	1.097.524,90			

Uma limitação da forma em que o problema foi empregado é que as quantidades de locomotiva disponíveis em cada grupo foram artificialmente estabelecidas a partir dos conceitos reais de aplicação. A diferença para o caso prático é que geralmente quando se aloca as locomotivas, trabalha-se com uma pequena margem de sobra e não com o número contado e restrito como aqui ilustrado. Essas sobras tem a função de cobrir indisponibilidades, acidentes, atrasos e ocorrências diversas, porém acaba por gerar mais opções na hora do planejamento e alocação.

5.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A seção a seguir irá explorar as variações da disponibilidade da frota de locomotivas aumentando-se o input do modelo em degraus de 10%, simulando

assim toda a frota da empresa disponível para que primeiro sejam alocadas as locomotivas aos trens cíclicos e depois aos demais modelos de trens. Este resultado é importante pois não limita tanto o modelo, o que o torna além de ferramenta de alocação, uma boa ferramenta para avaliar aquisição e priorização de serviços e liberações em oficinas de manutenção, sempre pautado nos ganhos implícitos a utilização e operação das locomotivas.

Aumentando-se a disponibilidade de todos os grupos de locomotivas em 10% observamos que NEXP agora é totalmente tracionado por locomotivas do grupo 10. TOD também começa a receber algumas locomotivas do grupo 10 o que é uma surpresa para os envolvidos no processo, pois nunca de forma estruturada essas locomotivas haviam circulado neste tipo de trem. O *helper* AUX-FA quase todo por locomotivas de grupo 9. QVL continua sem a prioridade de grupo 10 recebendo locomotivas de grupo 8, demonstrando um erro da alocação manual que priorizava este trem. Desta forma, os ganhos saltam para R\$ 3 milhões de reais mensais ao se comparar com a alocação manual, e R\$1,9 milhões com a modelagem anterior.

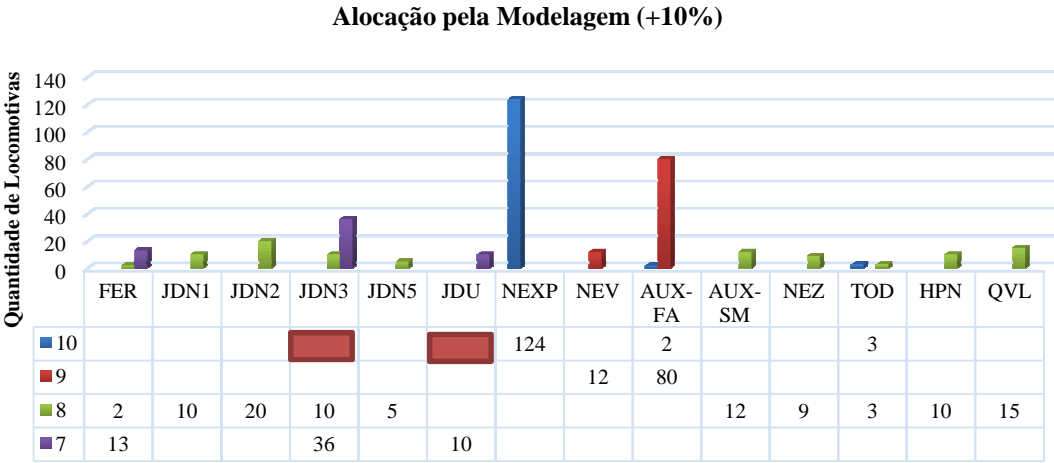


FIG. 5.6– Primeira alocação pela modelagem com 10% a mais de disponibilidade

Fonte: Adaptado pelo autor

TAB. 5.12 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +10%

Grupos	10	9	8	7
Total de utilizadas	129	92	96	59
Custo da Operação	R\$ 40.466.804,13			
Diferença (manual)	R\$ 3.002.373,80			
Diferença (modelagem)	R\$ 1.904.848,90			

Com o incremento de mais 10% na disponibilidade, ou seja 20% do valor original, nota-se que é reforçada a ideia que os trens de bauxita TOD se mostram em segundo lugar na ordem da priorização das locomotivas do grupo 10, apesar da pouca quantidade de tabelas. O outro grupo que inicia o recebimento de locomotivas de grupo 10 é o de agrícolas. Neste caso o JDN2 é o que possui maior Tkb desta modalidade de carga, mas bem próximo de JDN3 que possui restrição de locomotivas de grupo 10 em seu trajeto. O AUX-SM agora é todo tracionado por grupo 9. Os demais trens não sofrem muitas alterações, mas a redução do custo operacional agora passa para R\$3,8 milhões.

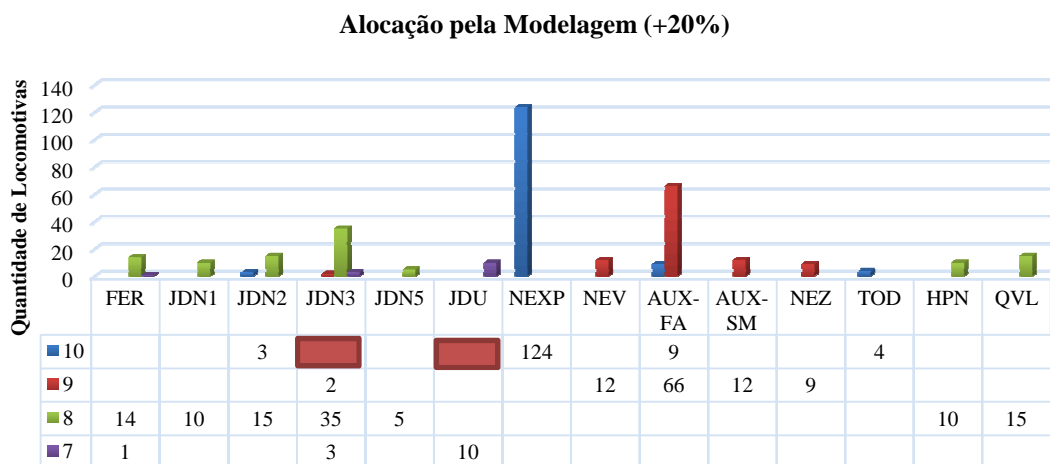


FIG. 5.7 - Primeira alocação pela modelagem com 20% a mais de disponibilidade

Fonte: Adaptado pelo autor

TAB. 5.13 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +20%

Grupos	10	9	8	7
Total de utilizadas	140	101	104	65
Custo da Operação	R\$	39.644.826,96		
Diferença (manual)	R\$	3.824.350,97		
Diferença (modelagem)	R\$	2.726.826,07		

No próximo passo é aumentada em 30% a disponibilidade com relação a proposta inicial. Evidentemente, se as locomotivas dos grupos 8, 9 e 10 são suficientes para tracionar todos os trens, as de grupo 7 começam a ser deixadas de lado devido a sua perda de eficiência e menor capacidade de tração, e é o que se

nota nesta análise. A necessidade delas é zerada ao se atingir os 30% de disponibilidade, destacando ainda que apenas 88 das 113 locomotivas de grupo 8 são usadas. JDN2 e NEV passam a ser totalmente tracionados por locomotivas de grupo 10 e JDN3 começa a receber locomotivas do grupo 9. Os ganhos agora giram em torno de R\$4,4 milhões.

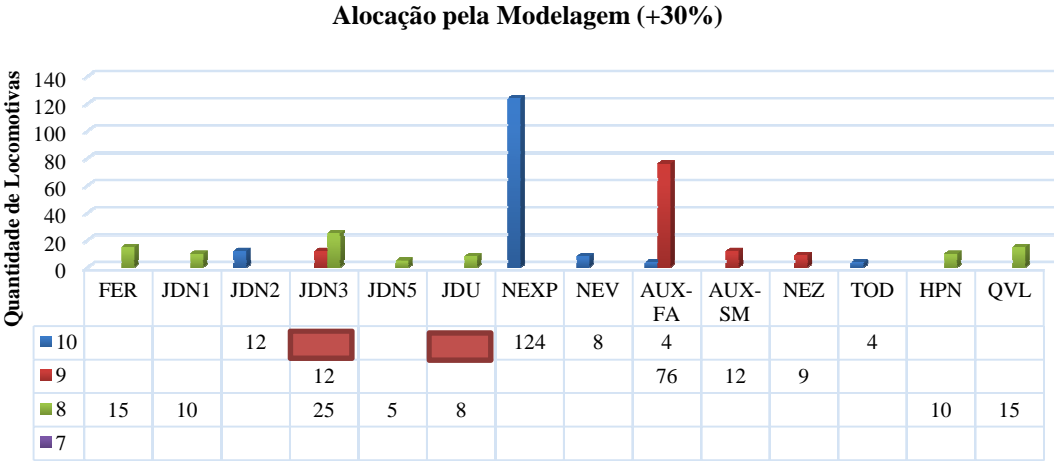


FIG. 5.8– Primeira alocação pela modelagem com 30% a mais de disponibilidade

Fonte: Adaptado pelo autor

TAB. 5.14 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +30%

Total de utilizadas	152	109	113	70
Custo da Operação	R\$	39.013.053,48		
Diferença (manual)	R\$	4.456.124,45		
Diferença (modelagem)	R\$	3.358.599,55		

Com 40% a mais de disponibilidade é possível notar que os trens que devem ser menos priorizados são aqueles que ainda estão recebendo locomotivas do grupo 8, o JDN1, JDN5, JDU e QVL. Outros, não muito diferentes, só agora começam a

receber as melhores locomotivas como o HPN, o NEZ e o AUX-FA começando a receber o grupo 10, o FER e JDN3 completando-se com o grupo 9. Os ganhos se aproximam de R\$5 milhões.

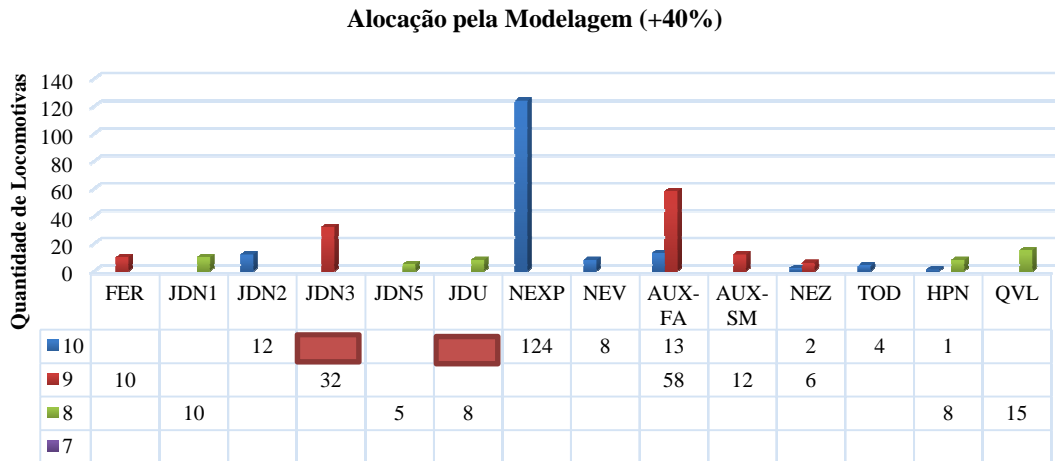


FIG. 5.9– Primeira alocação pela modelagem com 40% a mais de disponibilidade

Fonte: Adaptado pelo autor

TAB. 5.15 Utilização de locomotivas e custo mensal da operação – Modelo +40%

Grupos	10	9	8	7
Total de utilizadas	164	118	122	76
Custo da Operação	R\$	38.436.021,89		
Diferença (manual)	R\$	5.033.156,04		
Diferença (modelagem)	R\$	3.935.631,14		

5.9.1 RESUMO FINAL DOS RESULTADOS

O gráfico da Figura 5.8 permite notar que as variações entre consumo de diesel e custo de manutenção não são proporcionais e que o modelo preza pela redução do custo total. A primeira transição de alocação manual para a modelagem já apresenta uma queda proporcional nas duas variáveis de influência de custo mostrando que o procedimento de alocação consegue estruturar o raciocínio do planejamento de alocação de forma satisfatória e traz ganhos mesmo sem investimentos.

Os primeiros 10% de variação da disponibilidade mostra que o incremento da quantidade de locomotivas, que gerou um pico de aumento de custo de manutenção, foi responsável também pela taxa de queda mais acentuada no montante de litros de diesel consumidos compensando o aumento da manutenção comprovada pela queda do custo total. Ao se analisar a utilização das locomotivas de forma mais detalhada, conforme exposto no item 5.9.1, nota-se que este ganho expressivo em diesel se deu pela agregação direta dos 10% a mais de locomotivas na frota disponível sem ocorrer nenhum descarte, nem das locomotivas de grupo 7, operando de forma menos enxuta, porém mais lucrativa.

Deve-se neste caso, analisar a solução por dois pontos de vista: (i) quando se tem este excedente de locomotivas em algum local, porém não disponível para a frota, deve-se priorizar a disponibilização das mesmas para que o custo reduza, pois o modelo mostra ser vantajoso trabalhar com este excedente; (ii) quando não se possui este excedente disponível, deve-se fazer uma análise de investimento, buscando ampliação da capacidade de manutenção e a aquisição ou aluguel/arrendamento desses modelos.

Considerando que o incremento de potência devido a adição destas locomotivas foi de cerca de 135 mil HP, e o preço de mercado considerado para uma locomotiva de 4400 HP é de R\$ 7 milhões, o investimento inicial é de R\$ 210 milhões. O *payback* descontado a uma taxa de 11% a.a. acontece no início do 10º ano após o investimento para o ganho mensal da implementação do modelo e aumento de 10% de disponibilidade.

Na verdade, o preço de um HP de uma locomotiva bem mais antiga (década de 60), não pode ser comparado a locomotiva atual com toda a tecnologia embarcada.

Se for considerado uma equivalência de 60% do HP do grupo 7 e 80% do grupo 8 com relação aos grupos 9 e 10, então temos 123 mil HP com um investimento de R\$ 196 milhões e um *payback* descontado no 9º ano de operação. Isso se torna factível quando as concessões ferroviárias brasileiras são de 30 anos.

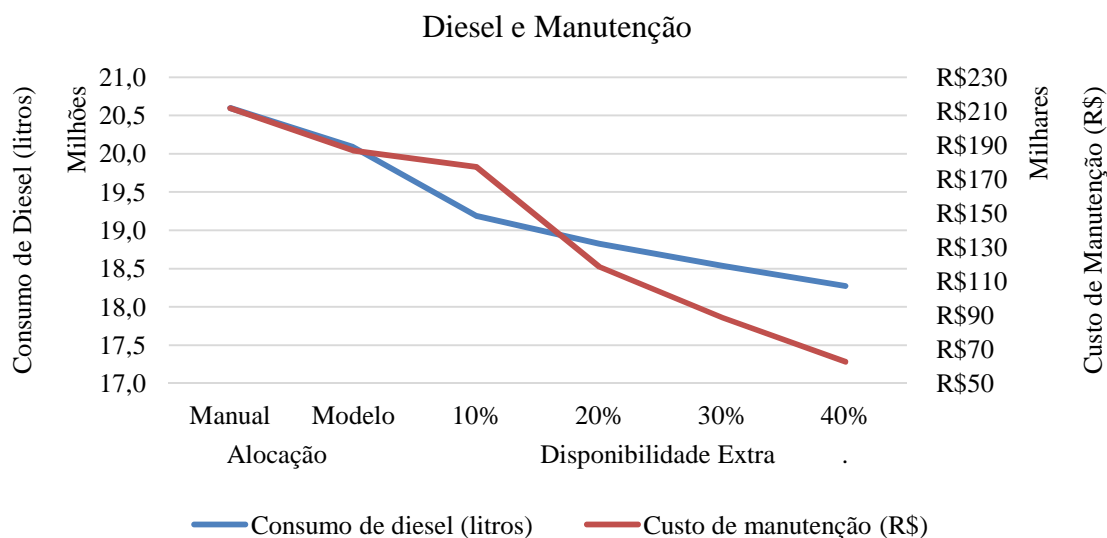


FIG. 5.10– Gráfico de sensibilidade do consumo de diesel e custo de manutenção

Fonte: Adaptado pelo autor

Nas demais variações de percentual de disponibilidade o custo de manutenção cai de forma mais expressiva devido a menor utilização das locomotivas de grupos 7 e 8, que possuem maior custo de manutenção. Porém, é notável que o consumo de diesel não cai na mesma faixa mesmo sendo as locomotivas dos grupos 9 e 10 mais eficientes que as de 7 e 8. Uma justificativa plausível é o fato de por serem dotadas de maior potência, os trens com menor T_b de arraste acabam por não terem um aproveitamento completo destas locomotivas. A matriz de EE evidencia este ponto de vista mostrando que ocorre um aumento do número, ou seja, há uma piora relativa de EE para estas locomotivas em trens de menor T_b de arraste. Pelo gráfico da Figura 5.9, nota-se que os incrementos das diferenças perdem o ritmo de aumento após os primeiros 10%, concluindo o raciocínio de que, após esta taxa de disponibilidade, os ganhos relativos são menores e existe a clara possibilidade de

haver um ponto de corte entre 10% e 20%. A determinação exata deste ponto de corte depende de uma análise de investimento que pode ser feita a partir do levantamento dos custos de aumento de disponibilidade ou aquisição de mais locomotivas para a frota.

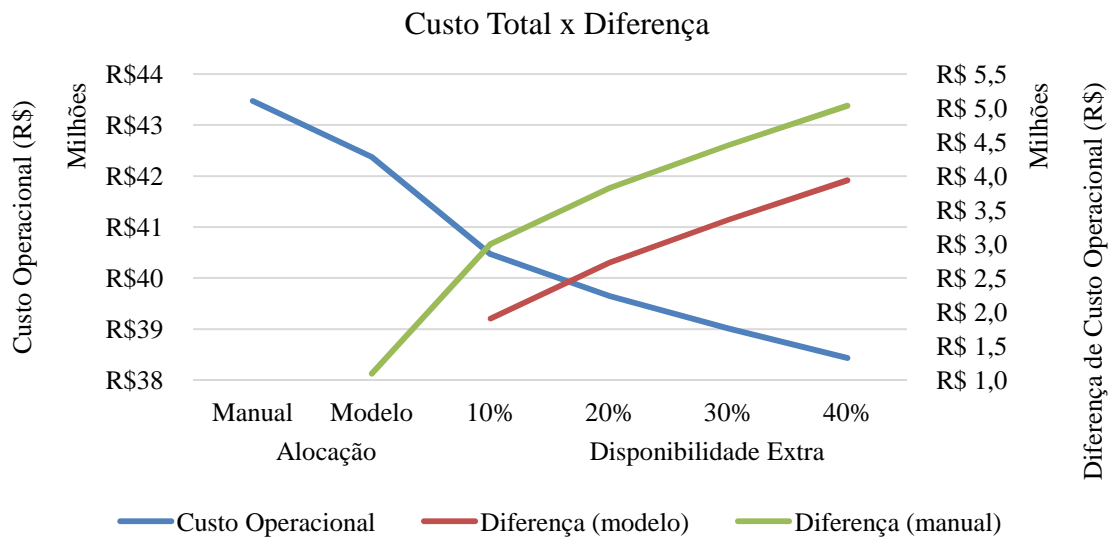


FIG. 5.11– Gráfico de sensibilidade do custo total e diferenças

Fonte: Adaptado pelo autor

Adotando-se as mesmas proporções de HP dos grupos 7 e 8 para o 9 e 10, temos resultados inviáveis de *payback* descontado com mesma taxa de retorno não justificando os outros aumentos(maiores que 10%), de disponibilidade de frota.

Na Figura 5.10, a mesma constatação pode ser feita observando-se os valores de EE Total calculados para as diferentes alocações. O maior salto é de 4,5% de redução e acontece da disponibilidade inalterada para a etapa com 10% de disponibilidade a mais. Do modo manual para o modo com procedimento e mais 10% a diferença chega a ser de 6,9%.

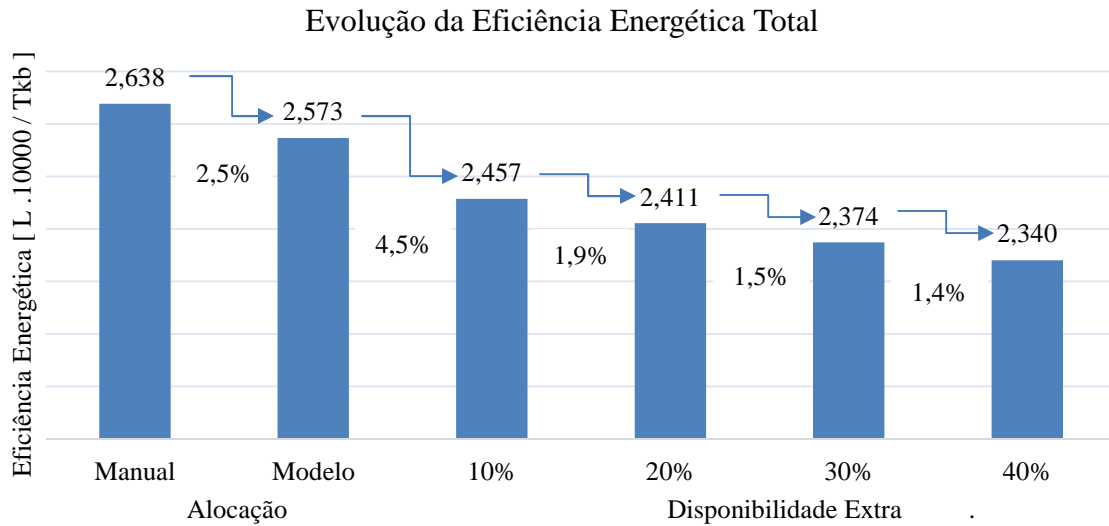


FIG. 5.12 - Gráfico de sensibilidade da Eficiência Energética Total

Fonte: Adaptado pelo autor

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho buscou apresentar uma forma de avaliar e propor de acordo com os trabalhos de maior relevância publicados a respeito do assunto um procedimento para a alocação de uma frota de locomotivas para um conjunto de trens de carga. É conhecido na bibliografia como PAL (Problema de Alocação de Locomotivas), e o presente trabalho buscou resolvê-lo propondo um procedimento de coleta e análise

de dados estatísticos para a obtenção de uma resposta final a respeito da forma de alocar reduzindo dois dos principais pilares de custo de operação de locomotivas. Este problema é de grande relevância visto que atualmente no transporte ferroviário de cargas brasileiro não existe ferramentas ou procedimentos que garantam que as locomotivas são alocadas da maneira mais eficiente nas composições.

O diferencial do procedimento proposto é que ele não busca resolver o problema totalmente através de um modelo de otimização como é proposto nas tentativas de solução resumidas pela revisão bibliográfica, pois essas modelagens se esbarrraram em tempos de soluções impraticáveis para o cenário de uma ferrovia real e se tornaram extremamente complicadas e inflexíveis a simples mudanças de horários de partidas, chegadas e lotação dos trens.

A proposta deste trabalho é desenvolver um procedimento de levantamento e análises de dados, que apesar de longo, é feita uma única vez e permite ajustes e revisões de informações de um trem sem impactar a análise dos outros. O desenvolvimento do procedimento partiu da metodologia de custeio das operações ferroviárias das locomotivas e das teorias de dimensionamento de tração para os trens. Por fim, para a etapa final do procedimento é proposto um modelo de otimização bem mais simples do que os que foram estudados na literatura, porém baseado em várias simplificações que foram adotadas pelos autores de forma geral, principalmente Su *et al.*() e Piu *et al.* (). Porém, o ponto de partida da modelagem matemática foi a formulação de Eficiência Energética, utilizada por ferrovias do mundo todo, agregando ao contexto as demais variáveis que influenciam no custo de operação. Esta é mais uma grande vantagem deste trabalho, o procedimento é feito pautado em uma linguagem genérica e internacional, sendo a aplicabilidade e adaptação do procedimento adaptável a qualquer ferrovia de carga que possua os dados indicados tendo assim um mínimo grau de personalização ao caso estudado na aplicação.

A aplicação do modelo em um estudo de caso mostrou que existe grande possibilidade de ganho frente ao cenário de alocação manual existente na ferrovia de cargas estudada trazendo ganhos relevantes através da redução dos custos de operação. A análise dos resultados após a aplicação completa do procedimento

revelou um ganho mínimo de cerca de R\$ 1 milhão mensal, e deixando claro que investimentos em aumento de disponibilidade de cerca de 10% são bem-vindos e possuem grande chance de ser rentável trazendo ganhos diretos e indiretos ao processo. Este fato foi constatado simulando uma maior disponibilidade de locomotivas, quando o modelo mostrou ganho ainda maior quando trabalha com maior liberdade de escolha, se mostrando capaz de melhorar não só em cenários de escassez, mas também em cenário de sobra de recursos.

Portanto, o modelo se mostrou capaz de realizar uma análise de sensibilidade de locomotivas dos grupos 9 e 10, mostrando o direcionamento da frota a cada incremento na disponibilidade. As saídas do modelo com direcionamento da utilização das locomotivas e com a estimativa de ganho permitem analisar renovação de frota, quando convém ou não adquirir novas locomotivas de grupos 8, 9 ou 10 para substituir as de grupo 7 por exemplo. O ganho ou redução de custo pode compor uma análise de viabilidade financeira complementando estes resultados. Ainda, com os resultados, novos fluxos podem ser avaliados quanto a custo, tipos de locomotivas a serem utilizadas e possibilidade de aquisições para atendimento.

Em termos de limitações, o procedimento trata de forma diferente os tipos de trens quando se tratando de trens não cíclicos. Na etapa final, que faz o uso do modelo de otimização, estes trens não podem ser utilizados como entrada da modelagem devendo assim receber as locomotivas que sobram desta alocação inicial, que são alocadas manualmente. Portanto, demonstra uma certa fragilidade na alocação do restante dos trens e apesar de reduzir a alocação manual ele não a elimina por completo. Apesar disso, no estudo de caso abordado, os trens cíclicos, foram responsáveis por mais de 97% da Tkb da ferrovia em questão, não trazendo muito impacto ao custo total e não gerando também trabalho adicional a alocação inicial coberta pelo procedimento proposto. Esse mesmo padrão de distribuição de carga para os trens cíclicos deve acontecer em todas as ferrovias de cargas majoritariamente granel e *heavy haul*.

Por fim, este trabalho não objetivou resolver o PAL por completo, mas sim iniciar um estudo sob uma ótica diferente aproveitando os conceitos já existente nas

bibliografias estudadas e o cenário brasileiro de planejamento de recursos para transportes ferroviários. As limitações, simplificações e métodos foram agregados para que este trabalho pudesse mostrar uma abordagem diferente a respeito do assunto com uma aplicação prática. O estudo aqui exposto referiu-se a um caso simplificado de uma ferrovia brasileira de transporte de cargas mas pode ser replicado em sua totalidade e em outras ferrovias apenas adaptando-se os conceitos de coleta dos dados. Conclui-se então que os objetivos deste trabalho foram atingidos, mas inúmeras sugestões de novos estudos podem ser enumeradas a partir deste estudo. Dentre essas sugestões destacam-se:

- Inclusão de trens não cíclicos ou a inserção de grupos de tração cíclicos que mesmo tracionando diversos trens diferentes acabam retornando ao seu ponto de partida;
- Formação de grupos de tração mistos, o que pode gerar perda no desempenho de tração como citado anteriormente, mas dependendo do caso e da ferrovia pode ser uma solução para a falta de disponibilidade de locomotivas;
- A expansão do modelo apresentado com a inclusão do custo de capital investido nas locomotivas pautado em uma TMA também é uma possibilidade de extensão do presente estudo.

Por fim, este trabalho não objetivou resolver todas as vertentes do PAL, mas propor uma metodologia que simplifica e reduz o problema aproveitando os conceitos já existente nas bibliografias. O estudo de caso mostra que a solução do problema traz ganhos relativamente altos e pode ter um estudo mais aprofundado.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AHUJA, R.K., Liu, J., Orlin, J.B., Sharma, D., Shughart, L.A., 2005. **Solving real-life locomotive-scheduling problems**. *Transportation Science* 39, 503–517.

- ASSAD, A. A. **Models for rail transportation**. Transportation Research Part A, 14, pp. 205-220, 1980.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. Quinta edição. Bookman Editora, 2004.
- BAMBINI, G. **Balanço do Transporte Ferroviário de Cargas no Brasil de 2013**. Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF). Brasília. Agosto. 2014.
- BORBA, J. L. **Mecânica de Locomotivas**. Pós Graduação em Engenharia Ferroviária– Notas de Aula – Instituto de Educação Continuada - PUC Minas – 2011
- BRINA, H. L. **Estradas de Ferro**, volumes 1 e 2. Livros Técnicos e Científicos Editora. Rio de Janeiro. 1983.
- FAVERO, L.P. BELFIORE, P. **Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia**. Rio de Janeiro. Elsevier, 2013.
- CORDEAU, J.F., Desaulniers,G., Lingaya,N., Soumis, F., Desrosiers, J., 2001. **Simultaneous locomotive and car assignment at VIA Rail Canada**. Transportation Research Part B: Methodological 35, 767–787.
- CORDEAU, J.F., Soumis, F., Desrosiers, J., 2000. **A Benders decomposition approach for the locomotive and car assignment problem**. Transportation Science 34, 133–149.
- CORDEAU, J.F., Toth, P., Vigo, D., 1998. **A survey of optimization models for train routing and scheduling**. Transportation Science 32, 380–404.
- CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. **Análise multivariada para os cursos de administração, ciência contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, 2009.

CSX Corporation. **Company Overview.** disponível em:
<https://www.csx.com/index.cfm/about-us/company-overview/>. Acesso em:
30/11/2016

FLORIAN, M., Bushell, G., Ferland, J., Guerin, G., Nastansky, L., 1976. **The engine scheduling problem in a railway network.** INFOR 14, 121–138. FREITAS FILHO, P. J. Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena. 2ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena.** 2ª ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

HILLIER, F. S. Lieberman, G. J. **Introdução à pesquisa operacional.** Tradução: Ariovaldo Griesi; revisão técnica: Pierre J. Ehrlich. 9ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2013.

LISBOA, Erico, Apostila de Pesquisa Operacional, 2002. Disponível em:
<<http://www.ericolisboa.eng.br/cursos/apostilas/po/po.pdf>> Acesso em:
Março/2016

FONTES LIMA, O. J. **Qualidade em serviços de transportes: conceituação e procedimento para diagnóstico.** São Paulo. 1995, 223 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 1995.

HU, H., Li, K., Xu, X., 2013. **A multi-objective train-scheduling optimization model considering locomotive assignment and segment emission constraints for energy saving.** Journal of Modern Transportation. (2013) 21(1):9–16

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.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. **Projeto de reavaliação de estimativas e metas do Plano Nacional de Logística e Transportes. Relatório Final.** 2012. Brasília-DF, 2012.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT). **Transportes 2014 e Resultados 2011 a 2014.** 2014. Disponível em: http://www.transportes.gov.br/images/2014/12/Transportes_2014_FINAL_08_12_2014.pdf. Acesso em: 18 de jan. 2016.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (MT); MINISTÉRIO DA DEFESA (MD). **Plano Nacional De Logística E Transportes (PNLT). RELATÓRIO EXECUTIVO.** 2007

MONTEIRO FILHO, Jerônimo. **Traçados das estradas.** 4ª ed., Rio de Janeiro, Editora Borsoi, 1955.

PAOLETTI, B., Cappelletti, S., 2007. **The optimization model for locomotive rostering in the fleet planning project.** The Proceedings of the Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications. Institute of Electrical and Electronics Engineers—IEEE, Beijing, China. Available at http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4281679 (access. ed 31 March 2011), pp. 362–365.

PIU, F., Speranza, M.G., 2013. **The locomotive assignment problem: a survey on optimization models.** International Transaction in Operational Research. Volume 21, Issue 3, May 2014, Pages 327–352.

PIU, F., Prem Kumar, V. , Bierlaire, M. Speranza, M.G., 2015, **Introducing a preliminary consists selection in the locomotive assignment problem.** Transportation Research Part E 82 (2015) 217–237

STEVENSON, C. W. **Da resistência dos trens e suas aplicações.** 2ª ed., Campinas, Tipografia Livro Azul, 1930.

SU, R., Zhou, L., Tang, J., 2015. **Locomotive Schedule Optimization for Da-qin Heavy Haul Railway.** Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, Volume 2015, Article ID 607376.

THEEG, G., VLASENKO, S. **Railway Signalling & Interlocking**. International Compendium Eurail Press, 2009.

WINSTON, W. L. (1994). **Operations Research, Applications and Algorithm**. 3rd Ed. Belmont (CA): Duxbury Press.

ZIARATI, K., Chizari, H., Nezhad, A., 2005. **Locomotive optimization using artificial intelligence approach**. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering 29, 93–105.

ZIARATI, K., Soumis, F., Desrosiers, J., Gelinias, S., Saintonge, A., 1997. **Locomotive assignment with heterogeneous consists at CN North America**. European Journal of Operational Research 97, 281–292.