

ANDRÉ CORDEIRO RECKEVÍCIUS

**MODELO DE APOIO À DECISÃO PARA A PROGRAMAÇÃO
DO TRANSPORTE MULTIMODAL DE CONTÊINERES COM
FOCO NO TRANSPORTE FERROVIÁRIO**

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do
Diploma de Engenheiro de Produção**

Orientador:

Prof. Dr. Hugo T. Y. Yoshizaki

São Paulo

2005

Aos meus pais, meu irmão, minha
avó e a todos que compartilharam
comigo estes anos inesquecíveis.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Hugo Yoshizaki, meu orientador, pelo valioso aprendizado e por ajudar em todos os momentos;

À Hamburg Sued, a empresa que me deu a oportunidade de realizar o estágio e possibilitou a elaboração deste Trabalho;

Ao Luis Emmanuel Carvalho de Andrade que foi decisivo na escolha do tema e me ajudou o tempo todo. Ao Gustavo Costa pelo apoio e valiosas dicas. Aos colegas da Hamburg Sued que deram uma grande força;

Aos meus colegas de POLI, pelas dicas, pela força e pela amizade;

À minha família, meu pai, minha mãe, meu irmão, minha avó, pelo apoio incansável especialmente durante o período de elaboração deste trabalho que foi bastante atribulado;

RESUMO

A empresa de navegação onde o estágio foi efetuado oferece serviços de transporte porta-a-porta, isto é, oferece não somente o transporte marítimo, mas também o transporte terrestre desde a origem até o destino final. No Estado de São Paulo a empresa opera serviços de transporte multimodal (rodoviário e ferroviário) para entregar e coletar contêineres no interior.

Este Trabalho aborda um processo importante do transporte multimodal: a programação do transporte. O objetivo é a construção de um modelo que apóie a decisão de quando e por qual serviço de transporte cada contêiner deve ser transportado de modo a reduzir o custo total. Na literatura esse problema se enquadra nos chamados problemas de alocação de recursos que são resolvidos através de programação dinâmica.

Os processos relacionados à programação do transporte foram mapeados e cada aspecto relevante foi investigado. O modelo foi implementado no programa GAMS.

O modelo de apoio à decisão foi validado em um cenário real e apresentou redução de custo. Análises foram feitas e mostraram que o modelo de apoio à decisão atingiu o objetivo e mostrou ser uma ferramenta confiável para a redução dos custos de transporte.

ABSTRACT

The company where the internship was done offers a door-to-door transport service, i.e., it offers not only the maritime but also the inland transport service from the origin to the final destination. In the state of Sao Paulo the company offers a multimodal transport service to collect and deliver containers.

The objective of this paper is the development of a model that supports the decision about when and how (which service) to transport each container. The model must reduce the transport total cost. In the literature this problem fits the so-called resource allocation problems, which are solved with dynamic programming.

Related processes inside the company and papers were studied in order to develop the model. It was implemented in the program GAMS.

The model was validated under a real scenario and showed cost reduction. Some analysis showed that the model fulfilled its objectives and is a reliable tool to reduce costs.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Agradecimentos..... | 3 |
| Resumo..... | 4 |
| Abstract..... | 5 |
| Sumário..... | 6 |
| Lista de figuras..... | 8 |
| Lista de tabela..... | 11 |
| Lista de abreviaturas e siglas..... | 13 |
| Lista de símbolos..... | 14 |
| <u>1 Introdução.....</u> | <u>15</u> |
| <u>1.1 Objetivos deste trabalho.....</u> | <u>15</u> |
| <u>1.2 A empresa.....</u> | <u>16</u> |
| <u>1.3 O estágio.....</u> | <u>19</u> |
| <u>1.4 A estrutura deste Trabalho.....</u> | <u>20</u> |
| <u>2 Diagnóstico da situação atual.....</u> | <u>21</u> |
| <u>2.1 Transporte de carga em contêineres.....</u> | <u>21</u> |
| <u>2.2 Os fluxos de coleta e entrega.....</u> | <u>27</u> |
| <u>2.3 Os serviços de transporte.....</u> | <u>35</u> |
| <u>2.4 Intervalos de tempos da coleta e da entrega.....</u> | <u>43</u> |
| <u>3 Revisão bibliográfica.....</u> | <u>47</u> |
| <u>3.1 Os níveis de decisão.....</u> | <u>47</u> |
| <u>3.2 O problema da alocação de recursos.....</u> | <u>48</u> |
| <u>4 Solução proposta.....</u> | <u>52</u> |
| <u>4.1 Descrição do modelo de apoio à decisão.....</u> | <u>52</u> |

| | |
|---|----------------------------|
| <u>4.2 Cálculo dos custos de transporte.....</u> | <u>55</u> |
| <u>4.3 Cálculo do intervalo de tempo para o transporte.....</u> | <u>64</u> |
| <u>4.4 Modelo de programação matemática.....</u> | <u>65</u> |
| <u>5 Resultados.....</u> | <u>76</u> |
| <u>5.1 Validação.....</u> | <u>76</u> |
| <u>5.2 Análises.....</u> | <u>81</u> |
| <u>6 Conclusões.....</u> | <u>93</u> |
| <u>7 Bibliografia.....</u> | <u>95</u> |
| <u>8 Glossário.....</u> | <u>97</u> |
| <u>9 Anexo I - Principais portos do Brasil.....</u> | <u>98</u> |
| <u>10 Anexo II – Principais tipos de contêineres.....</u> | <u>99</u> |
| <u>11 Anexo III – Tabela de distâncias rodoviárias.....</u> | <u>100</u> |
| <u>12 Anexo IV – Modelagem do cenário de validação no GAMS.....</u> | <u>105</u> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Contexto geográfico das operações multimodais no estado de São Paulo. Elaboração própria..... | 19 |
| Figura 2: Contêiner de 20 pés para carga geral (ou carga seca). Fonte: Hamburg Sued..... | 22 |
| Figura 3: Veículo para movimentação e transbordo de contêineres. Fonte: Hamburg Sued..... | 23 |
| Figura 4: Os contêineres podem ser empilhados; dois contêineres de 20 pés ocupam a mesma área que um contêiner de 40 pés. Fonte: Hamburg Sued..... | 23 |
| Figura 5: Navio sendo carregado. Fonte: Hamburg Sued..... | 23 |
| Figura 6: Municípios paulistas com a maior parte da demanda. Elaboração Própria..... | 26 |
| Figura 7: Descrição do processo de coleta. Elaboração própria..... | 30 |
| Figura 8: Descrição do transporte rodo-ferroviário de coleta. Elaboração própria..... | 31 |
| Figura 9: Descrição do transporte puro rodoviário de coleta. Elaboração própria..... | 32 |
| Figura 10: Descrição do processo físico de entrega. Elaboração própria..... | 33 |
| Figura 11: Descrição do transporte rodo-ferroviário de coleta. Elaboração própria..... | 34 |
| Figura 12: Descrição do transporte puro rodoviário de coleta. Elaboração própria..... | 35 |
| Figura 13: Esquema de transporte de um contêiner pelo serviço puro rodoviário. Elaboração própria..... | 37 |
| Figura 14: Esquema do transporte de ponta com um ICT. Elaboração própria..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 15: Esquema de comparação dos serviços puro rodoviário e rodo-ferroviário com relação ao custo total do transporte. Elaboração própria..... | 40 |
| Figura 16: Esquema das escalas dos terminais interiores e o terminal portuário pelos dois trens. Elaboração própria..... | 44 |
| Figura 17: Período dentro de qual um contêiner pode ser transportado ao porto. Elaboração própria..... | 45 |
| Figura 18: Período dentro de qual um contêiner pode ser removido do porto. Elaboração própria..... | 46 |
| Figura 19: Exemplo de uma rede dinâmica de serviços. Adaptado de Crainic e Laporte (1996)..... | 49 |
| Figura 20: Esquema do modelo de apoio à decisão. Elaboração própria..... | 54 |
| Figura 21: Gráfico de dispersão dos fretes contratados (mais pedágio) por distância percorrida para um veículo leve. Elaboração própria..... | 57 |
| Figura 22: Gráfico de dispersão dos fretes contratados (mais pedágio) por distância percorrida para um veículo pesado. Elaboração própria..... | 57 |
| Figura 23: Esquema de cálculo dos custos de transporte de contêineres vazios (valores em R\$). Elaboração própria..... | 60 |
| Figura 24: Comparação de custos na entrega: serviço puro rodoviário acima e serviço rodo-ferroviário abaixo. Elaboração própria..... | 62 |
| Figura 25: Comparação de custos na coleta: serviço puro rodoviário acima e serviço rodo-ferroviário abaixo. Elaboração própria..... | 62 |
| Figura 26: Impressão da tela do GAMS com o modelo de programação que é objeto deste Trabalho. Elaboração própria..... | 74 |
| Figura 27: Gráfico de custos unitário versus o número de contêineres. Elaboração própria..... | 87 |
| Figura 28: A maior parte dos contêineres transportados pelo serviço rodo-ferroviário eram pesados. Elaboração própria..... | 89 |

Figura 29: Quanto maior a vantagem pelo uso dos serviços rodo-ferroviários, mais contêineres o modelo aloca para esses serviços. Elaboração própria.....89

Figura 30: Análise de sensibilidade do custo unitário para cada situação de desbalanceamento entre coletas e entregas. Elaboração própria.....91

Figura 31: Efeito do tamanho do horizonte de programação sobre o custo total unitário. Elaboração própria.....92

Figura 32: Principais portos no Brasil. Fonte: Ministério dos transportes.....98

Figura 33: Principais contêineres da frota da empresa e suas dimensões. Fonte: Hamburg Sued.....99

LISTA DE TABELA

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Distribuição da demanda por município no Estado de São Paulo..... | 26 |
| Tabela 2: Custo de transporte rodoviário (frete rodoviário)..... | 57 |
| Tabela 3: Custos de ad-valorem (seguro da carga)..... | 58 |
| Tabela 4: Custo ou penalização pela ociosidade da composição ferroviária.... | 59 |
| Tabela 5: Tarifas ferroviárias..... | 59 |
| Tabela 6: Custo de cada operação de transbordo..... | 59 |
| Tabela 7: Custo do transporte de contêineres vazios pela ferrovia..... | 61 |
| Tabela 8: Custo total de transporte de um contêiner cheio..... | 63 |
| Tabela 9: Custo simplificado de transporte de um contêiner cheio..... | 63 |
| Tabela 10: Resumo do cenário de validação antes do filtro..... | 77 |
| Tabela 11: Cenário de validação..... | 77 |
| Tabela 12: Resumo do cenário de validação..... | 78 |
| Tabela 13: Resultado do modelo para o cenário de validação..... | 78 |
| Tabela 14: Comparação entre os serviços de transporte realizados e os resultados do modelo de apoio à decisão..... | 79 |
| Tabela 15: Resumo do cenário base..... | 82 |
| Tabela 16: Resumo do cenário 2..... | 82 |
| Tabela 17: Cenário base depois do filtro inicial (cenário 2) – todas as cargas têm 2 contêineres, a data de reserva é 0 e o valor da carga de cada contêiner é R\$97.000,00..... | 83 |
| Tabela 18: Total de contêineres por cenário..... | 86 |
| Tabela 19: Análise dos resultados segundo uma variação constantes na quantidade total de contêineres (horizonte de 7 dias)..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 20: Participação de cada um dos ICT segundo o resultado no modelo para o cenário 10..... | 88 |
| Tabela 21: Análise do desbalanceamento entre coletas e entregas..... | 90 |
| Tabela 22: Análise dos custos unitários segundo variação no tamanho do horizonte de programação..... | 91 |
| Tabela 23: Distância rodoviária em km entre várias cidades e os terminais... | 100 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ICT: (*inland container terminal*) Terminal interior de contêineres.

CY: (*inland container terminal*) Terminal de contêineres vazios.

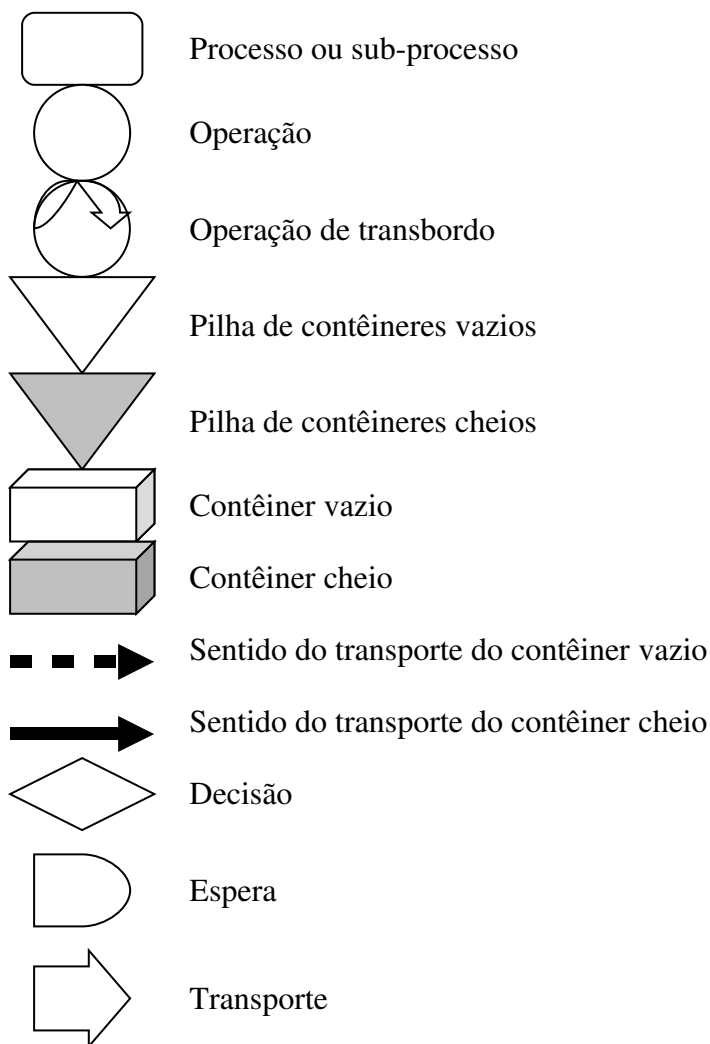
TEU: (*Twenty-foot Equivalent Unit*) Unidade equivalente a um contêiner de 20 pés. Vide Tipos de contêineres (página 23).

20DC: Contêiner de 20 pés para carga seca

40HC: Contêiner de 40 pés do tipo *High Cube*.

vFOB: valor FOB (*free on board*), valor da nota fiscal da carga do contêiner.

LISTA DE SÍMBOLOS



1 INTRODUÇÃO

Este capítulo expõe o objetivo deste Trabalho, apresenta a empresa onde o estágio foi efetuado e discorre sobre seus negócios: a navegação de cabotagem e o transporte multimodal.

1.1 Objetivos deste trabalho

O objetivo deste Trabalho é criar um modelo de apoio à decisão para a programação do transporte multimodal de contêineres da Hamburg Sued, empresa onde o estágio foi efetuado. Esse modelo deve ser uma ferramenta que vise à redução dos custos totais de transporte e o foco deve estar no transporte ferroviário, devido à maior necessidade de programação quando comparado ao transporte rodoviário.

O objetivo fundamental deste modelo é a decisão relacionada para qual serviço de transporte (serviço puro rodoviário ou os serviços rodo-ferroviários) cada contêiner deve ser direcionado. Além disso, o problema considera dois terminais interiores de contêineres e há necessidade de decidir qual terminal cada um dos dois trens deve escalar, pois não há frequência fixa de escalas nos terminais.

O modelo deve ser analisado num cenário em que a demanda pelos serviços ferroviários é maior do que sua capacidade. É justamente nesse cenário que a decisão do modelo se mostra necessária.

Em suma, o modelo de apoio à decisão deve ser submetido a um cenário de grande demanda pelos serviços ferroviários e ser capaz de fornecer respostas às seguintes perguntas:

- Quando e por qual serviço de transporte multimodal (serviço puro rodoviário ou os serviços rodo-ferroviários) cada contêiner deve ser transportado?
- Qual terminal interior de contêineres deve ser escalado pela composição ferroviária em cada dia?

Somente os dados relacionados aos serviços de cabotagem serão usados neste Trabalho porque atualmente as cargas desse serviço têm a maior participação no transporte multimodal (terrestre). Cargas de longo curso (transporte internacional) não serão consideradas.

1.2 A empresa

O estágio foi realizado na Hamburg Sued, empresa especializada em transporte marítimo de cabotagem e longo curso (internacional). O principal negócio é o transporte de carga em contêineres. A Hamburg Sued é atualmente o maior armador do Brasil.

Containerização é um método para se transportar mercadorias em recipientes modulares padrão os quais podem ser movidos por um sistema integrado dos modais rodoviário, ferroviário ou hidroviário (Barco, 1998).

O grupo conta com escritórios espalhados por todo o mundo. No Brasil a Hamburg Sued tem unidades de negócio Manaus, Fortaleza, Recife, Salvador, Rio de

Janeiro, Santos, Paranaguá, Itajaí e Porto Alegre além do escritório em São Paulo que atua como centro administrativo da empresa no país.

A empresa opera sete navios porta-contêiner no Brasil dedicados ao serviço de cabotagem.

Além dos serviços de transporte exclusivamente marítimo (porto-a-porto), a empresa oferece os serviços de transporte terrestre (porta-a-porta). Esses serviços complementam o marítimo e consistem na coleta ou entrega da carga nos locais definidos pelo cliente. Este Trabalho tem como foco o serviço de transporte do tipo porta no Estado de São Paulo.

A empresa oferece ainda os serviços de transporte de cargas de grandes dimensões, cargas rolantes (ônibus, caminhões e tratores) e transporte de graneis sólidos e líquidos com destaque para a importação de trigo argentino, fertilizante do Báltico e exportação de soja para a Europa. (Aliança, 2005)

A empresa conta com uma ampla rede nacional de transporte multimodal terrestre com operações rodoviárias, ferroviárias e com terminais interiores de contêineres (ICT). No estado de São Paulo, que é o foco deste trabalho, a empresa não possui infra-estrutura própria, contrata outras empresas que operam os serviços de transporte terrestre e os terminais interiores.

O objetivo da existência dos terminais interiores de contêineres (ICT) é reduzir o custo de movimentação de contêineres vazios que ocorre no transporte puro rodoviário e, além disso, aproveitar as tarifas do transporte ferroviário que são mais baixas em relação às do transporte rodoviário. O terminal de contêineres vazios (CY) tem como objetivo armazenar contêineres vazios para que estejam disponíveis sempre que forem solicitados.

A Figura 1 exibe a infra-estrutura usada pela empresa no Estado de São Paulo. São três terminais de contêineres: dois ICT (um em Jundiaí e outro em Mogi das Cruzes), um CY no Guarujá (próximo ao terminal portuário) e o terminal portuário também no Guarujá. Desses terminais somente o CY não tem acesso ferroviário.

A inclusão de um terminal multimodal interior na rede de transportes aumenta a complexidade da operação como um todo. Isso decorre da necessidade de

programação conjunta dos serviços ferroviário e rodoviário no terminal, em ambos os fluxos de transporte (de coleta e entrega).

A Hamburg Sued tem um contrato com uma concessionária de transporte ferroviário que disponibiliza dois trens diários que viajam entre os terminais interiores e o porto.



Figura 1: Contexto geográfico das operações multimodais no estado de São Paulo. Elaboração própria.

1.3 O estágio

O estágio foi realizado no departamento Multimodal, que tem a função de estudar a viabilidade e implementar projetos de transporte multimodal em todo o país. Os esforços deste departamento estão dedicados totalmente ao transporte de carga em contêineres.

Logo no início do estágio a Hamburg Sued solicitou um estudo que posteriormente se tornou o tema deste Trabalho de Formatura.

1.4 A estrutura deste Trabalho

O capítulo 1 introduz a empresa e o problema em questão bem como expõe o objetivo deste Trabalho.

O capítulo 2 traz um diagnóstico da situação atual detalhando os processos envolvidos.

O capítulo 3 faz uma pesquisa bibliográfica do problema e o capítulo 4 descreve o modelo de apoio à decisão proposto em termos de seu funcionamento, dos dados de entrada e das premissas assumidas.

O capítulo 5 expõe a validação do modelo e análises de seus resultados quando submetidos aos diversos cenários propostos. O capítulo 6 apresenta a conclusão deste Trabalho.

O capítulo 7 relaciona a bibliografia consultada e no capítulo 8 um glossário de termos relevantes.

2 DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO ATUAL

Este capítulo faz um diagnóstico do transporte multimodal de cargas que é efetuado pela empresa. Cada aspecto relevante para o desenvolvimento do modelo de apoio à decisão é detalhando e serve como base para a pesquisa bibliográfica e a definição da solução.

2.1 Transporte de carga em contêineres

Segundo (Barco, 1998), a containerização tem se desenvolvido internacionalmente desde os anos 60 e representa grandes vantagens para as companhias de navegação. “A carga lacrada dentro de contêineres é menos vulnerável a avarias e roubos, os custos de empacotamento, o tempo de transporte e o tempo de porto dos navios são significativamente reduzidos, e, além disso, há uma maior facilidade de movimentação da carga containerizada, incluindo os transportes *house to house* (da fábrica do transportador até o armazém do cliente)”.

O custo de implantação do sistema de containerização exige um investimento inicial alto não só nos contêineres, mas também nos navios porta-contêineres e nos equipamentos portuários que são mais caros. (Barco, 1998)

De acordo com Barco (1998), uma grande “desvantagem do uso do contêiner é o próprio fato de ter que se preocupar com a embalagem. Ou seja, não se descarta um contêiner depois de ele ter completado uma viagem”. Surge então a necessidade de se planejar toda uma rede logística para que os contêineres possam ser reutilizados. Nessa rede normalmente os portos e os terminais interiores não tem equilíbrio entre as quantidades de contêineres que entram e que saem (importadas e exportadas). Esse fato gera um problema muito importante, o desbalanceamento de contêineres vazios: os locais onde há excesso de contêineres vazios (entradas maiores que saídas) devem suprir os locais onde há escassez deles (saídas são maiores que as entradas). O transporte de contêineres vazios entre esses locais deve, portanto, ser realizado da maneira mais racional possível, pois que não agrega nenhum valor ao transporte da carga.

A utilização de contêineres de cargas, principalmente de carga geral, está em expansão no Brasil seguindo uma tendência mundial. Esses equipamentos estão

presentes não somente nos portos, mas também, cada vez mais nos transportes rodoviário e ferroviário com o objetivo de facilitar as operações intermodais, em que mais de um modal está envolvido no transporte, e os processos de importação e exportação. (Log&Man, 2003).



Figura 2: Contêiner de 20 pés para carga geral (ou carga seca). Fonte: Hamburg Sued.

A grande vantagem do contêiner é que ele pode ser transbordado com facilidade sem que haja necessidade do manuseio direto da carga. Além disso, os contêineres podem ser empilhados (Figura 4) de modo a reduzir a área necessária para o armazenamento. O uso de contêineres no transporte multimodal reduz os custos com a movimentação, com a mão-de-obra envolvida, com avarias, roubos.

Máquinas específicas são usadas para efetuar o transbordo (*handling*) do contêiner. A carga ou descarga de contêineres dos navios é feita por enormes guindastes chamados *portainers* (Figura 5), o transbordo rodo-ferroviário pode ser feito por máquinas menores como a da Figura 3.



Figura 3: Veículo para movimentação e transbordo de contêineres. Fonte: Hamburg Sued.



Figura 4: Os contêineres podem ser empilhados; dois contêineres de 20 pés ocupam a mesma área que um contêiner de 40 pés. Fonte: Hamburg Sued.



Figura 5: Navio sendo carregado. Fonte: Hamburg Sued.

2.1.1 Tipos de contêineres

Os contêineres são fabricados em diversos modelos e tipos cada qual adequado para certa finalidade. As medidas são padronizadas e os contêineres mais comuns têm as características abaixo. O Anexo II descreve detalhadamente as características dos vários contêineres da frota da empresa.

- Largura de 8 pés;

- Altura de 8 pés 6 polegadas (ou de 9 pés 6 polegadas para os modelo *High Cube*);
- O comprimento de 20 ou 40 pés;
- Peso bruto máximo (peso da carga mais a tara do contêiner) varia entre 30 e 40 toneladas;
- O volume interno varia de 28m³ (para contêineres de 20 pés) a 64m³ (para os de 40 pés).

A unidade TEU (*Twenty-foot Equivalent Unit*) representa o tamanho de um contêiner de 20 pés em termos da área que ele ocupa. A área ocupada por um contêiner de 20 pés é igual a 1 TEU e a área ocupada por um contêiner de 40 pés é igual a 2 TEU. Dois contêineres de 20 pés colocados frente a frente ocupam a mesma área que um contêiner de 40 pés.

O tipo mais comum é o contêiner para carga seca ou *dry* (cargas sólidas como peças, caixas, sacarias). É, geralmente, fabricado em aço. Dispõe de uma porta no fundo com duas folhas que abrem totalmente acompanhando a largura do contêiner. Seu assoalho é de pinho naval ou madeira superior.

Além do modelo convencional existem outros contêineres muito usados:

- *Open top*: contêiner sem a superfície superior para cargas que excedam a altura interna do contêiner convencional;
- *High cube*: contêiner com dimensões iguais a um contêiner convencional, porém com 1 pé a mais de altura;
- *Ventilado*: contêiner com ventiladores nas laterais;
- *Flat rack*: contêiner sem as laterais nem o teto para cargas com formato irregular;
- *Tanque*: para cargas líquidas ou gases liquefeitos;
- *Reefer*: contêiner refrigerado.

O contêiner refrigerado é usado para o transporte de produtos perecíveis como carnes, sucos e frutas. Tem assoalho de alumínio, porta de aço reforçado, revestimento de aço inoxidável e encaixe para gerador de energia. Este contêiner possui uma tomada de energia elétrica para abastecer seu sistema de refrigeração enquanto está no navio ou num terminal em que o serviço de monitoramento seja disponível. A ele, ainda, pode ser acoplado um gerador a Diesel chamado *Gen-set*.

O contêiner tanque é usado para o transporte de produtos líquidos ou gases liquefeitos, principalmente por indústrias químicas e de alimentos.

Neste texto, sempre que um contêiner for mencionado sem a devida indicação de tipo, deve-se considerar que se trata de um contêiner de 20 pés para carga seca (20DC) ou um contêiner de 40 pés *High Cube* (40HC), ambos para carga seca.

2.1.2 Mapeamento da demanda

A demanda por serviços no Estado de São Paulo foi mapeada. A Figura 6 exhibe os municípios do Estado de São Paulo em que houve demanda por serviços do tipo porta. Devem-se incluir os municípios de Lorena e São Carlos que estão fora da área da figura. Os dados foram obtidos nos registros da empresa e se referem às operações de num intervalo de um ano.

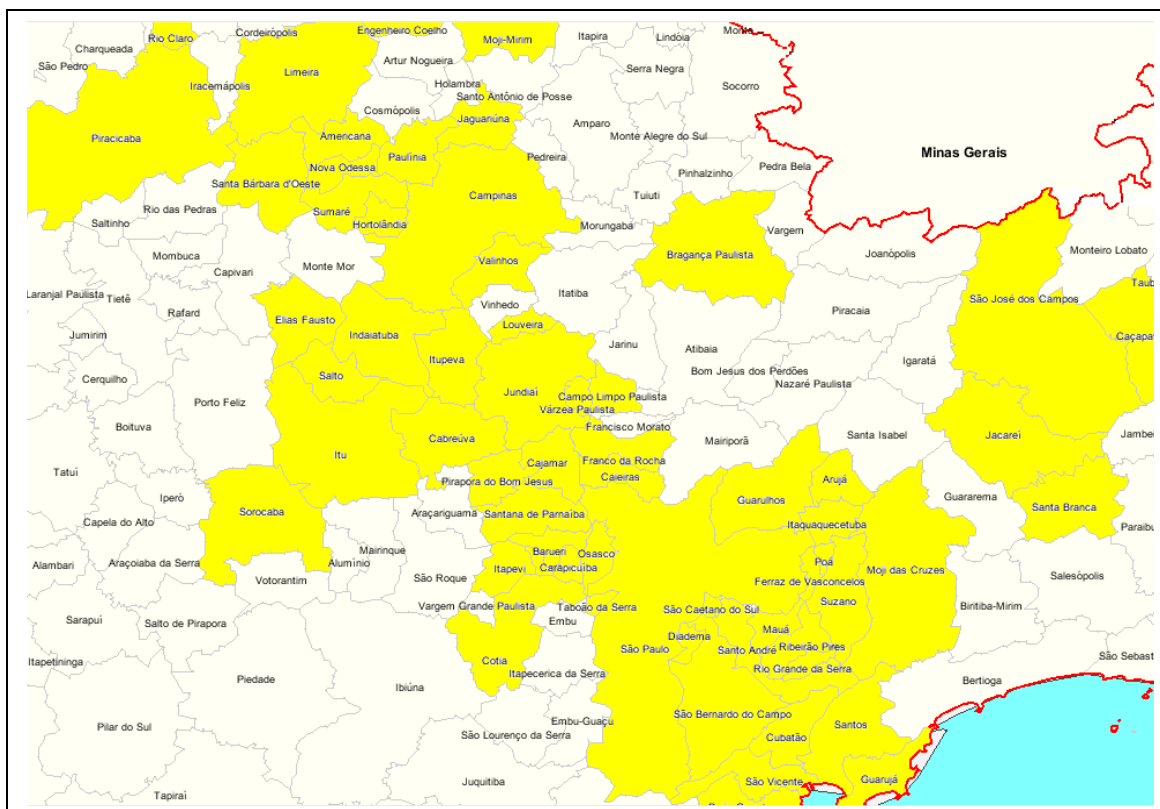


Figura 6: Municípios paulistas com a maior parte da demanda. Elaboração Própria.

A Tabela 1 mostra a distribuição da demanda dentre os municípios paulistas com maior volume transportado pela empresa. Observa-se que as cidades no entorno de Jundiaí tem grande participação no volume transportado pela empresa. Isso é o efeito da presença do ICT em Jundiaí, que atrai as cargas das empresas que se localizam próximas a ele. O mesmo não se observa para cidades próximas do terminal de Mogi das Cruzes porque ele foi inaugurado há pouco tempo.

Tabela 1: Distribuição da demanda por município no Estado de São Paulo

| Cidade | Participação |
|-----------------------|--------------|
| JUNDIAI | 19,53% |
| LOUVEIRA | 16,79% |
| CAMPINAS | 9,54% |
| INDAIATUBA | 9,10% |
| ITUPEVA | 8,03% |
| SAO PAULO | 7,64% |
| BARUERI | 4,48% |
| GUARUJA | 4,12% |
| JAGUARIUNA | 2,75% |
| JACAREI | 2,57% |
| PIRAPORA DO BOM JESUS | 1,96% |
| OSASCO | 1,69% |

| | |
|-----------------------|-------|
| GUARULHOS | 1,54% |
| LORENA | 1,44% |
| RIBEIRAO PRETO | 1,26% |
| SAO BERNARDO DO CAMPO | 1,08% |
| OUTROS MUNICÍPIOS | 6,49% |

2.2 Os fluxos de coleta e entrega

A empresa oferece os serviços do tipo porta nos dois fluxos de transporte: o fluxo de coleta e o de entrega:

- A coleta é o processo em que um contêiner vazio é transportado ao local onde deve ser carregado (ovado ou estufado). Em seguida esse contêiner cheio será transportado ao terminal portuário onde será embarcado num navio;
- O processo de entrega é o inverso: um contêiner cheio é desembarcado de um navio e deve ser transportado até o local onde será descarregado (desova). Após a desova o contêiner vazio deverá ser transportado a um terminal de contêineres (ICT ou CY) onde permanecerá até que seja novamente solicitado em outro serviço de coleta.

Hoje a decisão a respeito do serviço por qual cada contêiner será transportado está inserida no processo de agendamento e programação do transporte. Por agendamento se entende a marcação da data, hora e local junto ao cliente para realização do serviço. Por programação se entende a alocação de recursos num curto horizonte de tempo para a realização do transporte nas condições já agendadas.

O agendamento e a programação do transporte ocorrem quase simultaneamente e há grande interação entre as pessoas que operam cada um dos processos. Da mesma forma é a interação dessas pessoas com os clientes e os prestadores de serviço de transporte (rodoviário, ferroviário e terminais).

O processo de agendamento e programação é diferente para cada fluxo de transporte. No fluxo de entrega os contêineres são desembarcados do navio e devem ter o transporte agendado e programado ao longo dos dias seguintes. No fluxo de coleta a

demanda surge ao longo do tempo e o transporte deve ser agendado e programado de modo a possibilitar o embarque no próximo navio.

Atualmente não é estruturada a decisão que é o objetivo deste Trabalho. Sempre que a demanda pelo serviço de transporte ferroviário é superior à oferta, os programadores optam por transportar os contêineres dos clientes com maior volume ou que sejam considerados prioritários do ponto de vista comercial. Essa decisão não minimiza o custo total de transporte.

2.2.1 Descrição do fluxo de coleta

O fluxo de coleta é iniciado a partir da solicitação de um *booking* por parte do cliente. *Booking* (ou reserva) é o documento emitido pelo armador que comprova a reserva de espaço no navio e contém toda a informação necessária para o transporte da carga. Antes disso deve estar aprovada a proposta comercial que vale para um número de reservas ou um período acordado entre as partes. A proposta comercial contém o preço ou tarifa acordado do serviço e detalha cada aspecto do mesmo: tipo de contêiner, tipo de carga, local etc.

Os departamentos responsáveis pelo agendamento e programação do transporte recebem a proposta comercial e fazem o *booking*. A seguir, verificam se há disponibilidade de recursos (como carretas, vagões, contêiner vazios). Caso haja disponibilidade para a realização do transporte na data solicitada, confirmam junto ao cliente esse serviço e fazem o agendamento no sistema de informação da empresa. Se não houver disponibilidade, entram em contato com o cliente a fim de negociar outra data.

Quando o agendamento estiver confirmado e inserido no sistema da empresa, emite-se uma ordem de serviço de transporte nas condições agendadas. O sistema de informação envia a ordem de serviço para a empresa que realizará o transporte.

As coletas são agendadas somente dentro do período em que o porto permite armazenagem dos contêineres cheios sem cobrar a taxa de armazenagem. Atualmente esse período é de 7 dias antes da data de atracação do navio.

No último dia antes da atracação do navio ocorre o pré-empilhamento que consiste no empilhamento de todos os contêineres que serão embarcados no próximo navio. Esse empilhamento é feito da maneira inversa ao empilhamento no navio – os contêineres que estiverem sobre da pilha serão transbordados primeiro para o navio e ficarão embaixo, sobre os quais os outros contêineres serão empilhados. Esse processo serve para dar mais rapidez à estiva do navio. O pré-empilhamento deve estar completo logo antes de o navio atracar. Normalmente não são embarcados contêineres que derem entrada no porto durante o pré-empilhamento. Considera-se então que a data máxima para que um contêiner dê entrada no porto seja de um dia antes da atracação do navio. Cargas de longo curso (exportação) necessitam dar entrada no porto com mais antecedência devido aos processos aduaneiros, porém não serão consideradas neste Trabalho dados em que o foco é a cabotagem.

O processo físico de coleta está detalhado na Figura 7. Nela, além dos sub-processos de agendamento e programação do transporte, está detalhado o fluxo físico de um contêiner: um contêiner adequado é selecionado, transbordado para o veículo de transporte (carreta ou vagão), então o transporte e a ova são realizados. O contêiner é transportado ao porto, onde é transbordado, aguarda o pré-empilhamento e posterior embarque no navio.

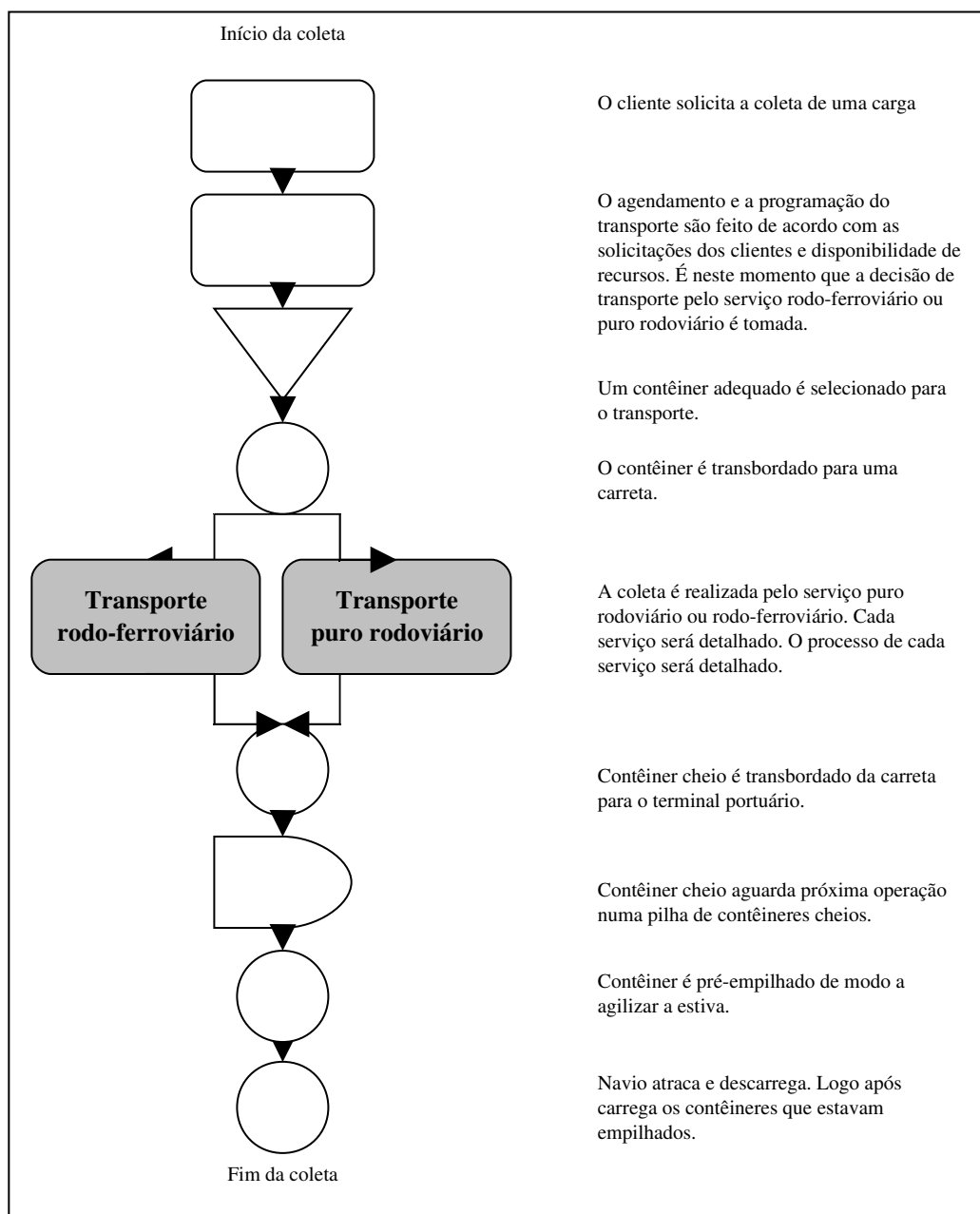


Figura 7: Descrição do processo de coleta. Elaboração própria.

O processo de transporte puro rodoviário está detalhado na Figura 9 e o transporte rodo-ferroviário na Figura 8.

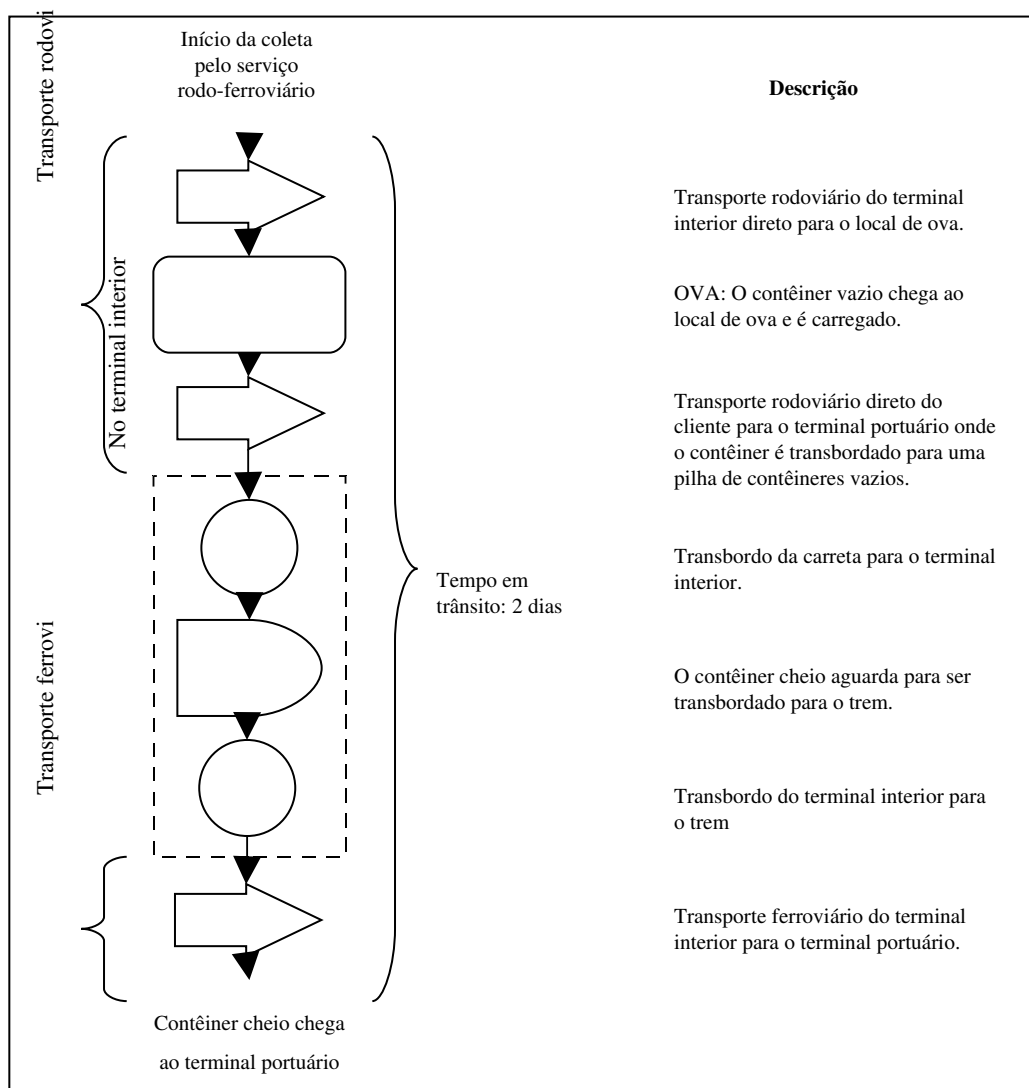


Figura 8: Descrição do transporte rodo-ferroviário de coleta. Elaboração própria.

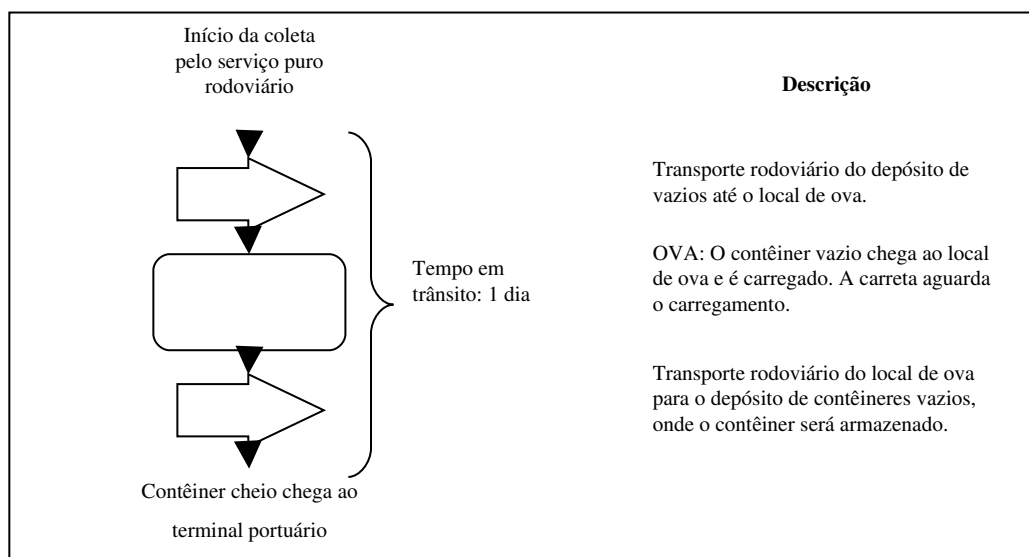


Figura 9: Descrição do transporte puro rodoviário de coleta. Elaboração própria.

2.2.2 Descrição do fluxo de entrega

O fluxo de entrega é mais simples do ponto de vista do agendamento e programação, pois neste fluxo todas as informações estão disponíveis no sistema da empresa antes do navio atracar. O sistema de informação da empresa permite que os agendamentos sejam feitos somente depois que a descarga do navio estiver completa.

O agendamento e a programação do transporte são feitos da mesma forma que no processo de coleta com a diferença de que quando o navio atraca emite-se eletronicamente um aviso de chegada aos clientes, a partir do que os clientes devem entrar em contato com a empresa para solicitar o transporte de suas cargas.

Muitas vezes a entrega é agendada para o dia seguinte do término da descarga do navio principalmente se o navio atracar com atraso. Em outros casos os embarcadores solicitam que os contêineres sejam armazenados no terminal portuário e/ou no terminal interior durante o período que o não é cobrada taxa de armazenagem. Cada situação deve ser administrada individualmente pelo departamento de agendamento e programação do transporte. Neste texto não consideraremos estes casos por se tratarem de exceções.

O processo de entrega está detalhado na Figura 10: após o término da descarga do navio o transporte é agendado e programado. O contêiner cheio é transbordado do

porto para uma carreta ou vagão que realiza o transporte. Após a desova o contêiner vazio é transportado para o terminal interior (ICT) ou terminal de vazios (CY) onde será empilhado. Lá o contêiner deve permanecer até que seja solicitado novamente.

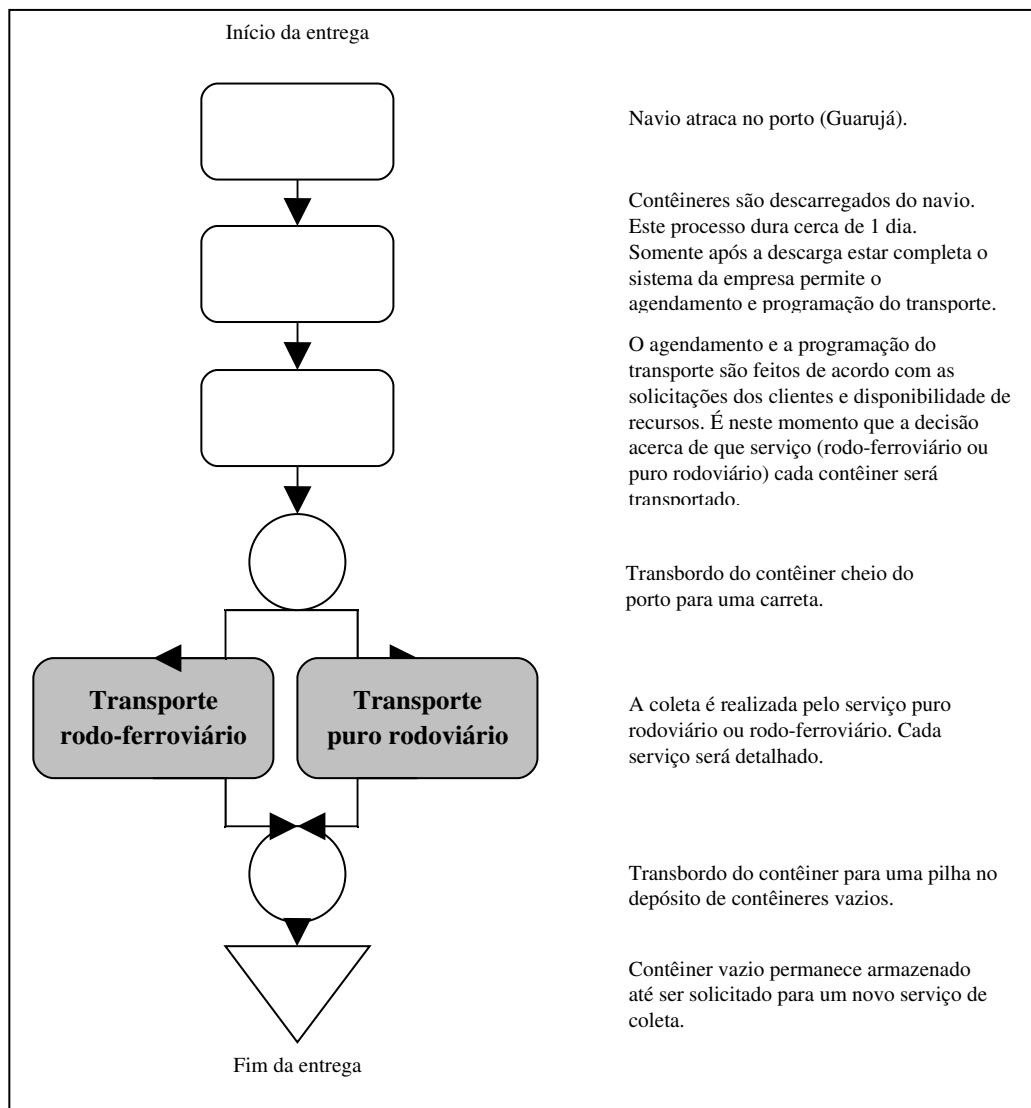


Figura 10: Descrição do processo físico de entrega. Elaboração própria.

O processo de transporte puro rodoviário está detalhado na Figura 12 e o transporte rodo-ferroviário na Figura 11.

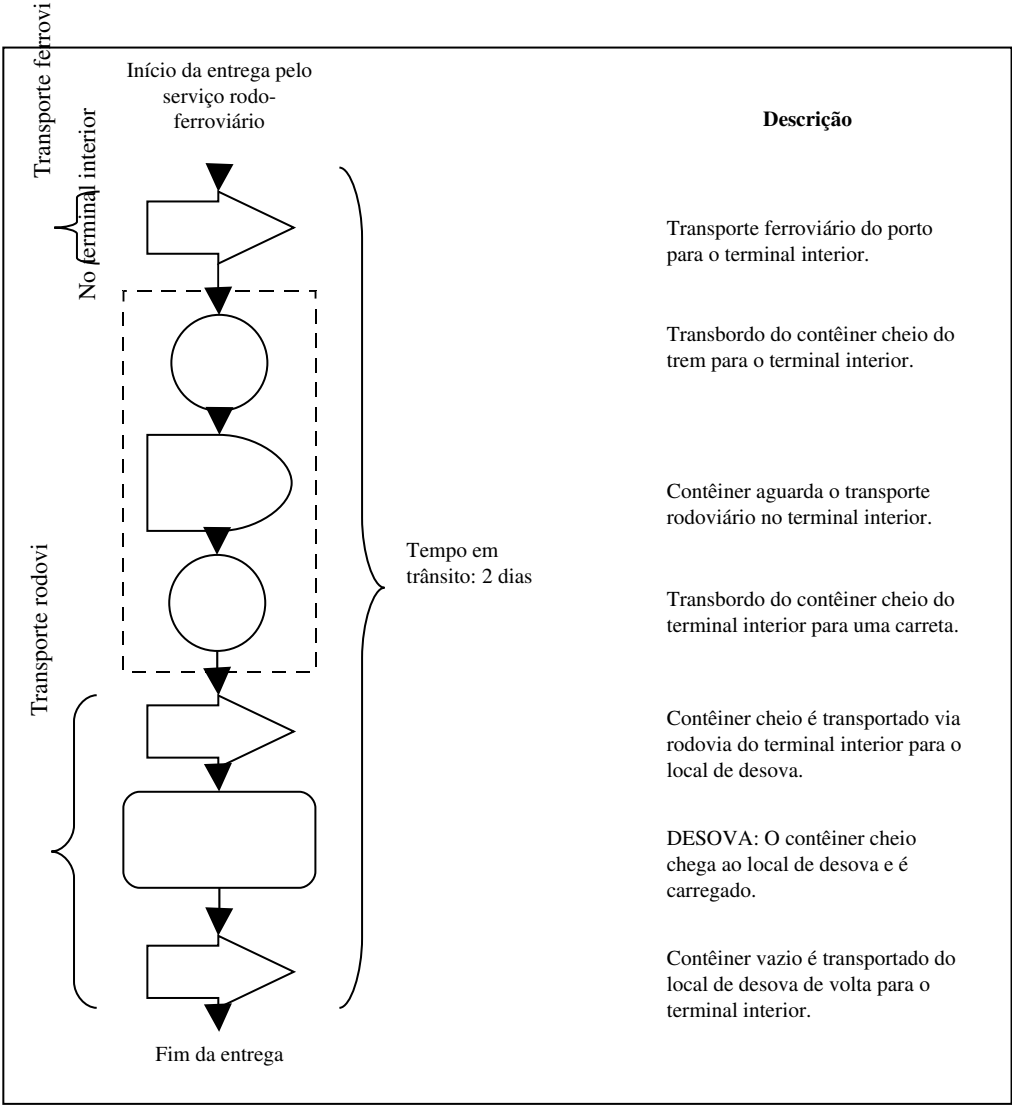


Figura 11: Descrição do transporte rodo-ferroviário de coleta. Elaboração própria.

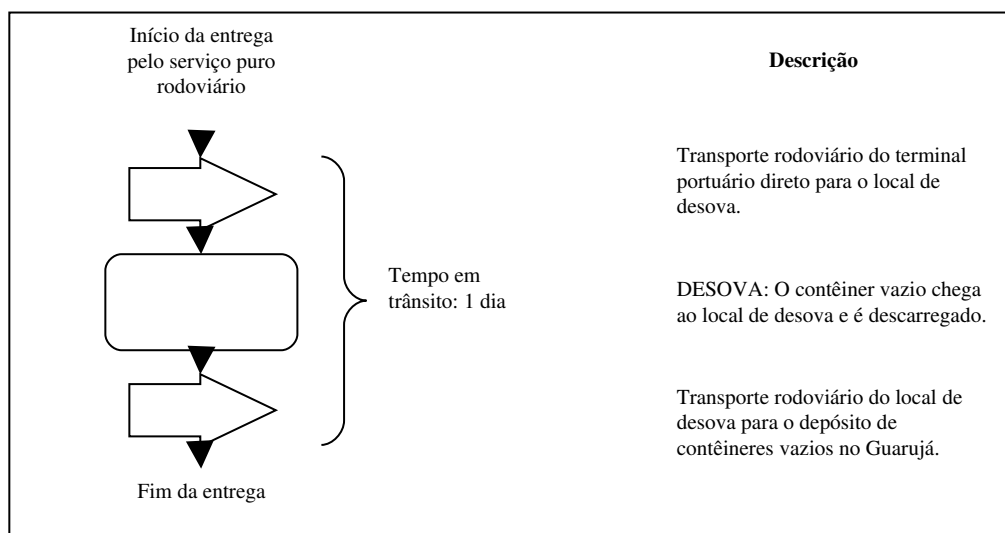


Figura 12: Descrição do transporte puro rodoviário de coleta. Elaboração própria.

As solicitações dos clientes por reservas surgem aleatoriamente e os agendamentos são normalmente solicitados para embarque no próximo navio, mesmo se houver pouco tempo para a realização do transporte e risco da carga não chegar a tempo de embarcar. Isso faz com que a demanda por transporte nos dias imediatamente anteriores ao à atracação do navio seja elevada e nos outros dias baixa, com a possibilidade de haver ociosidade na composição ferroviária.

2.3 Os serviços de transporte

A empresa realiza o transporte das coletas e entregas através de dois tipos de serviço: o puro rodoviário e o rodo-ferroviário:

- O serviço puro rodoviário consiste na entrega ou coleta de um contêiner somente através do modal rodoviário;
- O serviço rodo-ferroviário consiste na entrega ou coleta de um contêiner usando os modais rodoviário e ferroviário, com transbordo em um terminal interior de contêineres (ICT). A empresa atualmente oferece o serviço rodo-ferroviário através de dois terminais interiores, o ICT de Jundiaí e o ICT de Mogi das Cruzes.

Os tópicos a seguir detalham a movimentação de um único contêiner respectivamente pelos serviços puro rodoviário e rodo-ferroviário. Em suma, todo contêiner que chega cheio ao porto segue através de qualquer serviço de transporte para

ser desovado. Depois disso o contêiner vazio é armazenado e aguarda uma nova coleta. Quando surge essa nova coleta, o contêiner é transportado cheio novamente até o porto de onde segue ao destino final pelo transporte marítimo.

2.3.1 Serviço puro rodoviário

No serviço puro rodoviário (Figura 13), um contêiner de entrega é descarregado do navio e transbordado (1) para uma carreta. Então é realizado o transporte rodoviário do contêiner cheio (2) até o local de desova (3). Após a carga ser desovada o contêiner vazio retorna ao terminal de contêineres vazios (4) onde ficará armazenado numa pilha de contêineres vazios (5). Quando uma nova carga de coleta (exportação) surgir o contêiner vazio será transportado (6) do terminal de vazios até o local de ova (7), e depois disso retornará cheio (8) ao terminal portuário onde permanecerá até ser embarcado em num outro navio.

Se o número de entregas for superior ao número de coletas então o estoque de contêineres vazios no CY deverá cair continuamente. É necessário então trazer contêineres de outros portos ou até mesmo importar contêineres vazios de outros países para abastecer o CY. Esse processo se chama reposicionamento de contêineres vazios.

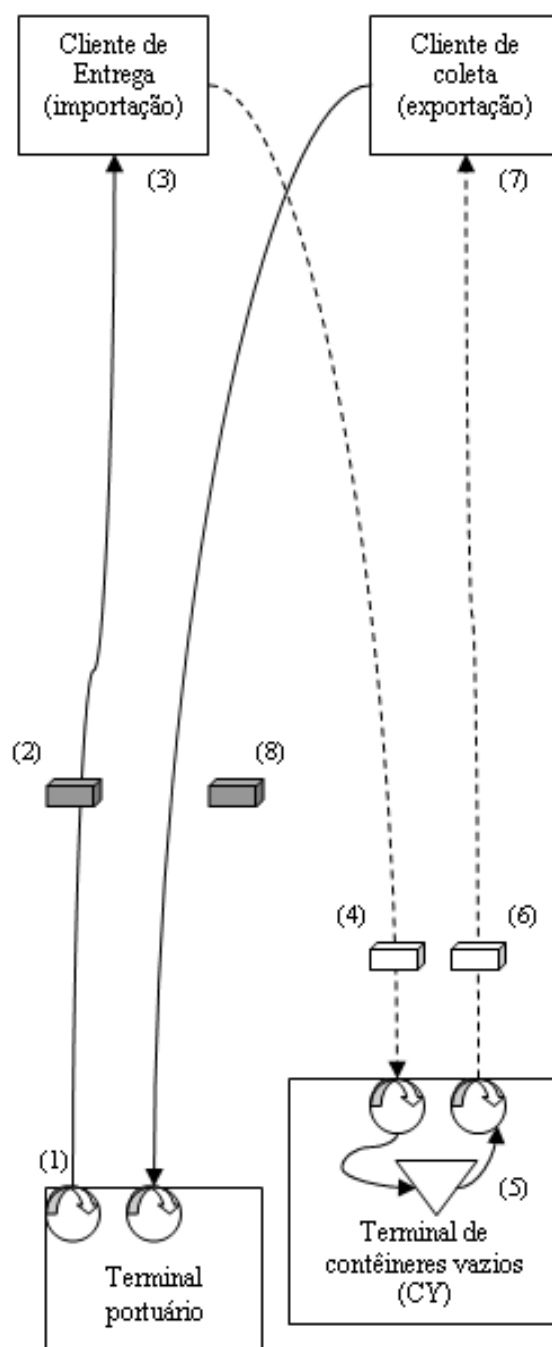


Figura 13: Esquema de transporte de um contêiner pelo serviço puro rodoviário. Elaboração própria.

O serviço de transporte rodoviário é feito por algumas empresas que tem tabelas de preços acordadas. As tarifas rodoviárias são diferenciadas para cargas leves (abaixo de 26 toneladas) e pesadas (até de 30,5 toneladas).

A grande disponibilidade de carretas para o transporte de contêineres evidencia que a capacidade do serviço puro rodoviário atualmente não é restrição ativa. Por isso este Trabalho não considerará maiores detalhes do serviço puro rodoviário.

2.3.2 Serviço rodo-ferroviário

No serviço rodo-ferroviário (Figura 14), um contêiner de entrega é transbordado para um vagão ferroviário (1) e segue em direção ao ICT (2). Lá esse contêiner é transbordado para uma pilha de contêineres cheios (3) onde aguardará a ponta rodoviária. Em seguida os contêineres cheios são transbordados para uma carreta (4) e são transportados ao local de desova (5), de onde voltam vazios (6) para o ICT. O contêiner vazio é armazenado numa pilha de vazios (7) até quando surgir uma nova carga de coleta. Então o contêiner vazio é transbordado novamente para uma carreta e segue (8) até o local de ova (9), de onde volta ao ICT cheio (10). Esse contêiner cheio aguarda numa pilha de contêineres cheios (11) o transbordo para a ferrovia (12). Os contêineres cheios são transportados pela ferrovia até o terminal portuário (13) onde aguardam ser carregados em um navio.

Vale ressaltar que um contêiner cheio não deve aguardar necessariamente em uma pilha de cheios. Sempre que possível é feito o transbordo do vagão ferroviário direto para a carreta, eliminando (3), e o transbordo da carreta para o vagão ferroviário eliminando (11).

O reposicionamento de contêineres vazios está identificado pelo fluxo (14). Se o número de coletas for maior que o número de entregas então há necessidade de transporte de contêineres vazios para o ICT. Se o número de coletas for menor que o número de entregas então haverá transporte de contêineres vazios do terminal interior para o terminal portuário.

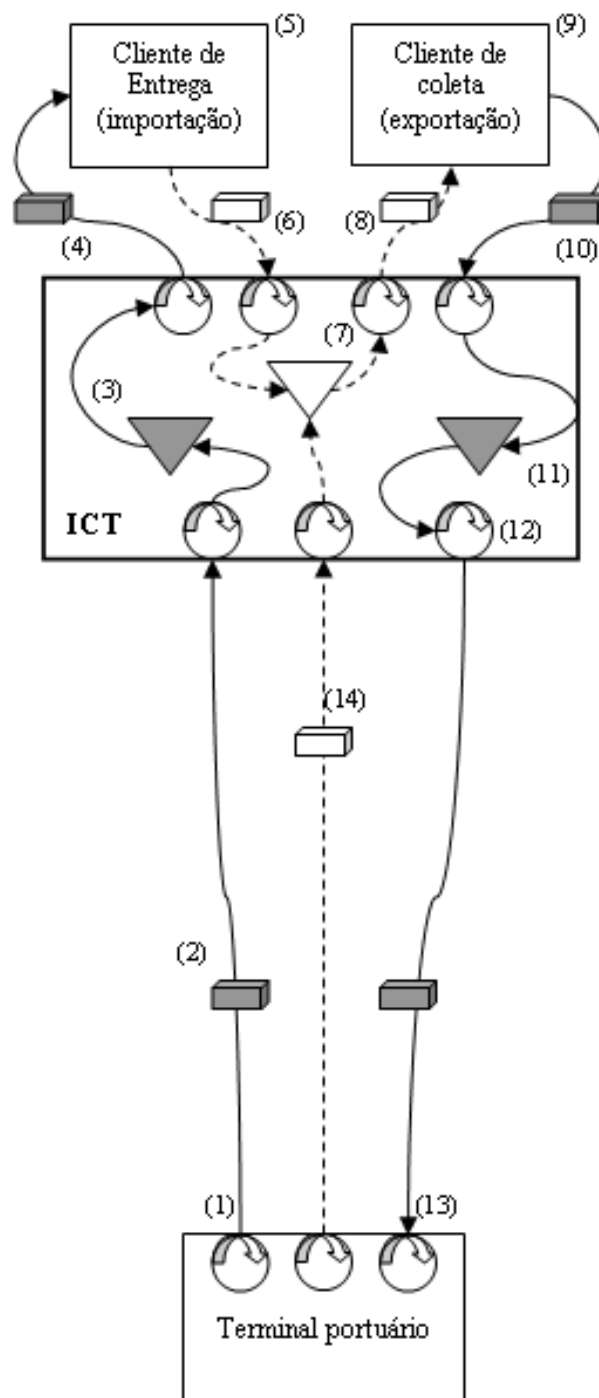


Figura 14: Esquema do transporte de ponta com um ICT. Elaboração própria.

O transporte de contêineres vazios compreende a metade do transporte no serviço puro rodoviário. No serviço rodo-ferroviário o transporte de vazios é menor e se concentra na ponta rodoviária. O custo de transporte de vazios pela ferrovia tem uma tarifa diferenciada (mais baixa do que a tarifa do contêiner cheio). Esse custo

(usualmente chamado de *custo de imbalance*) onera o serviço rodo-ferroviário e não agrega nenhum valor ao transporte.

O serviço de transporte através de um terminal interior necessita remunerar os custos fixos do terminal, do transporte ferroviário e os custos adicionais de transbordo. Por isso é fundamental que o terminal interior esteja localizado próximo de uma região com grande demanda.

Além disso, a proximidade entre o terminal e os clientes faz com que a produtividade das carretas seja maior, elas realizam mais entregas e coletas por mês. Por outro lado o terminal interior não é capaz de prover serviços competitivos para qualquer local, tendo, portanto, uma área de influência limitada dentro da qual o custo de transporte é menor do que o custo do serviço puro rodoviário (Figura 15). Este Trabalho não se prenderá ao problema de localização do terminal interior, que é, portanto, considerado uma premissa.

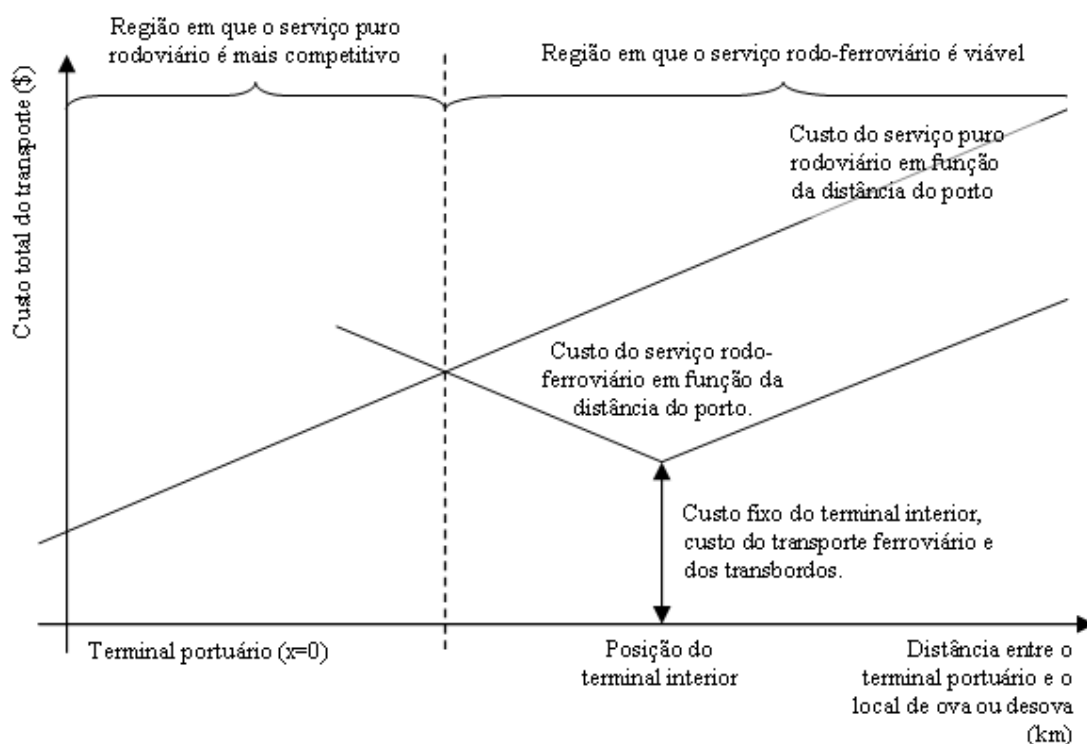


Figura 15: Esquema de comparação dos serviços puro rodoviário e rodo-ferroviário com relação ao custo total do transporte. Elaboração própria.

O contrato que a empresa tem com a concessionária de transporte ferroviário exige o cumprimento diário de um número mínimo fixo de 30 TEU por composição ferroviária. Esse contrato visa remunerar os altos custos fixos inerentes ao transporte ferroviário. O transporte entre os terminais interiores e o Guarujá utiliza uma linha férrea dotada de cremalheira na Serra do Mar, que tem capacidade para transportar no máximo 1500 toneladas de carga, segundo a concessionária.

Atualmente o contrato limita em 90 TEU a capacidade da composição ferroviária e em R\$ 6.000.000 o valor total das cargas devido à atual apólice de seguro. O valor total máximo pode ser alterado mediante negociações comerciais.

A empresa tem dois trens disponíveis que realizam diariamente o transporte entre o terminal portuário e um dos dois ICT. Os trens transitam na linha férrea urbana da cidade de São Paulo que é usada durante o dia pelos trens de passageiros da CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos). Por conta disso os trens de carga têm uma janela ou intervalo de tempo limitado para usar essa linha durante a madrugada.

Os dois trens realizam diariamente trajetos alternados: enquanto um trem está no Guarujá, o outro está no interior (ou em Jundiaí ou em Mogi das Cruzes). Durante a madrugada o trem que permaneceu no Guarujá sobe a Serra do Mar pela cremalheira em direção ao ICT e o trem que permanecer no ICT desce a Serra em direção ao terminal portuário do Guarujá.

Não há frequência fixa semanal em cada terminal interior, ou seja, com pelo menos um dia de antecedência a empresa deve decidir qual ICT será escalado e informar a empresa ferroviária.

2.3.3 Critérios de exclusão

O transporte de carga pelo serviço ferroviário está submetido a algumas restrições. Esse conjunto de restrições ao transporte ferroviário será chamado ao longo deste texto por *critérios de exclusão*:

- Se o contêiner contiver carga perigosa sem a devida autorização da CPTM para o transporte no trecho urbano da ferrovia, então esse contêiner não pode ser transportado por esse modal.

- Cargas com dimensões que extrapolem o gabarito da ferrovia estão proibidas de serem transportadas por esse modal.
- O contêiner não deverá ser transportado pelos serviços rodo-ferroviários caso o embarcador solicite isso.
- Contêineres com urgência no transporte não devem ser transportados pelo serviço rodo-ferroviário devido ao tempo em trânsito desse serviço que é de dois dias.
- Cargas cujo custo de transporte puro rodoviário é menor do que o rodo-ferroviário não devem ser transportados pelo serviço rodo-ferroviário.
- Somente contêineres dos tipos 40HC (40 pés High Cube) e 20DC (20 pés carga seca), podem ser transportados para os terminais interiores. Os outros contêineres têm pouca demanda a partir dos terminais interiores, portanto ficariam armazenados lá por muito tempo até que fossem reutilizados num novo serviço de coleta. Além disso, caso houvesse necessidade de reposicionamento desses contêineres vazios em um outro porto, haveria de se pagar o transporte deles do terminal interior até o porto. Contêineres refrigerados também não podem ser transportados pelos serviços rodo-ferroviários porque nem o trem, nem os ICT possuem equipamentos para alimentar esses contêineres com energia elétrica.

2.3.4 Nível de serviço

O nível de serviço do transporte multimodal está ligado ao nível de serviço do transporte marítimo. O transporte marítimo é o principal componente no transporte porta-a-porta oferecido pela empresa: é o que tem maior custo e maior tempo em trânsito.

O transporte multimodal apresenta tempos em trânsito bastante regulares (com pouca variabilidade) tanto no serviço puro rodoviário quando nos serviços rodo-ferroviários. Caso o navio atrase, existe a possibilidade de direcionar cargas urgentes para o serviço puro-rodoviário, que tem o menor tempo em trânsito. Por outro lado, o

transporte ferroviário ao porto é privilegiado e não sofre com os congestionamentos e outros gargalos logísticos que prejudicam o serviço puro-rodoviário (Sales, 2004).

Outro fator sensível do ponto de vista dos clientes é o risco de roubo da carga. Em comparação ao transporte puro rodoviário, que é a referência no Brasil, os modais ferroviário e marítimo são vantajosos por apresentarem pequeno histórico de sinistros.

Quanto ao preço, que é o fator determinante na escolha dos serviços de transporte de longa distância, o transporte multimodal oferece uma alternativa em que o custo benefício é favorável, pois o serviço rodo-ferroviário é mais barato que o puro-rodoviário e tem somente um dia a mais de tempo em trânsito.

2.4 Intervalos de tempos da coleta e da entrega

Neste problema é fundamental considerar os intervalos de tempo dentro dos quais cada contêiner pode ser transportada, bem como os tempos necessários para realizar o transporte por cada serviço.

2.4.1 Tempos de ciclo dos transportes puro rodoviário e rodo-ferroviário

Neste texto será considerado que uma coleta ou entrega pelo serviço puro rodoviário dura um dia, ou seja, todo o transporte rodoviário (ida e volta) mais o tempo de ova ou desova dura até 8 horas. Essa consideração é plausível, pois a grande maioria dos clientes da empresa se situa num raio de 300 km do porto (Guarujá) e o tempo de ova ou desova que a empresa oferece aos seus clientes sem custo adicional de estadia da carreta é de 5 h.

No serviço rodo-ferroviário os contêineres são entregues ou coletados durante o dia (da mesma forma que no serviço puro rodoviário) e aproximadamente às 16h00min a composição ferroviária deve estar carregada e pronta para partir. O tempo de trânsito ferroviário é de 12 h e a viagem ocorre na madrugada. A composição transita por dentro da cidade de São Paulo e por isso precisa aguardar as janelas de tempo em que a CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos) não opera. A composição ferroviária deve chegar ao destino às 8h00min do dia seguinte. O trem permanece no porto ou terminal durante o dia para que os vagões sejam descarregados e carregados. Considera-se, portanto, que o serviço rodo-ferroviário tem duração de dois dias.

2.4.2 Escalas dos trens nos terminais interiores

O problema que este texto aborda considera uma operação ferroviária contendo dois trens. Cada trem escala o porto em dias alternados, ou seja, não é permitido que ambos os trens escalem o porto no mesmo dia. Os terminais interiores são escalados sem frequência semanal fixa, ou seja, podem ser escalados por ambos os trens em quaisquer dias. A empresa ferroviária deve ser informada com um dia de antecedência sobre qual ICT será escalado.

A Figura 16 representa um exemplo das viagens que os dois trens podem realizar.

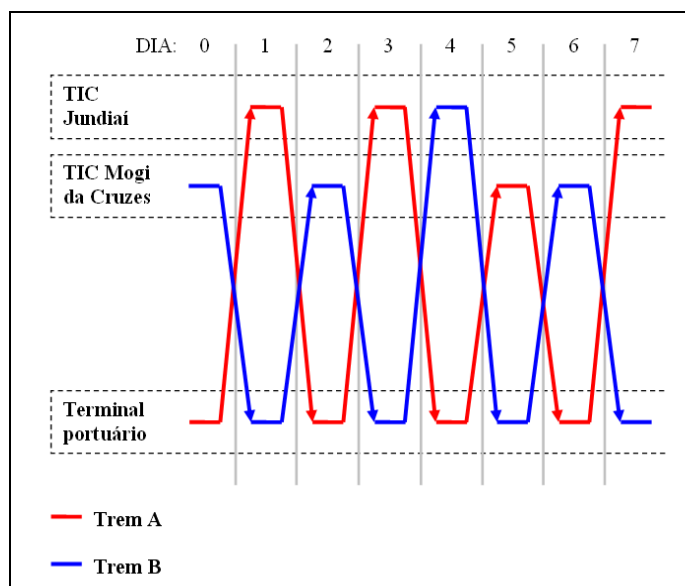


Figura 16: Esquema das escalas dos terminais interiores e o terminal portuário pelos dois trens.
Elaboração própria.

2.4.3 Períodos em que uma carga pode ser transportada do e para o porto

O porto considerado neste problema oferece um período de sete dias dentro dos quais os contêineres que embarcarão no próximo navio podem ficar armazenados em sua área sem cobrança de taxa de armazenamento. Desses sete dias deve-se excluir um dia imediatamente anterior à atracação do navio, que é o período em que os contêineres de embarque serão pré-empilhados.

Pelo serviço puro rodoviário um contêiner pode ser coletado e transportado ao porto dentro de um dia, portanto o período dentro do qual um contêiner pode ser transportado ao porto se inicia sete dias antes da atracação do navio e se encerra um dia antes do mesmo. Já pelo serviço rodo-ferroviário, por ter dois dias de tempo em transito, o transporte de cada contêiner de coleta deve ser feito até, no máximo, dois dias antes da atracação do navio. A data em que o cliente solicita o *booking* limita a data mais cedo do intervalo de coleta.

A Figura 17 representa os períodos de tempo dentro dos quais os contêineres de coleta podem ser transportados ao porto sem incorrer em custo de armazenagem.

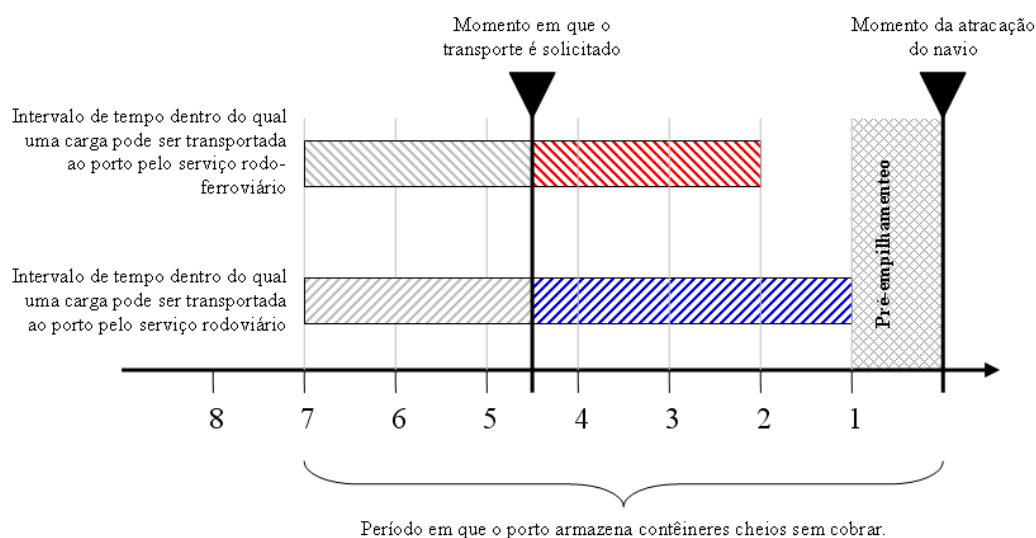


Figura 17: Período dentro do qual um contêiner pode ser transportado ao porto. Elaboração própria.

Os contêineres que desembarcam de um navio podem ficar armazenados no porto à espera de transporte terrestre pelos sete dias posteriores à descarga do navio. Será cobrada uma taxa de armazenamento se um contêiner extrapolar esse período. Desse deve-se excluir o dia imediatamente posterior ao da atracação do navio, quando o mesmo está sendo descarregado.

Tanto o serviço puro rodoviário quanto o rodo-ferroviário podem, portanto, remover os contêineres do porto a partir do primeiro dia após a atracação do navio. Todos os contêineres devem ser removidos do porto até o sétimo dia.

A Figura 18 representa o período dentro do qual um contêiner de entrega deve ser removido do porto sem incorrer em custo de armazenagem.

Este Trabalho considera que o transporte dos contêineres do e para o porto são feitos dentro dos períodos acima detalhados. Portanto não será considerado o pagamento de taxa de armazenagem no porto.

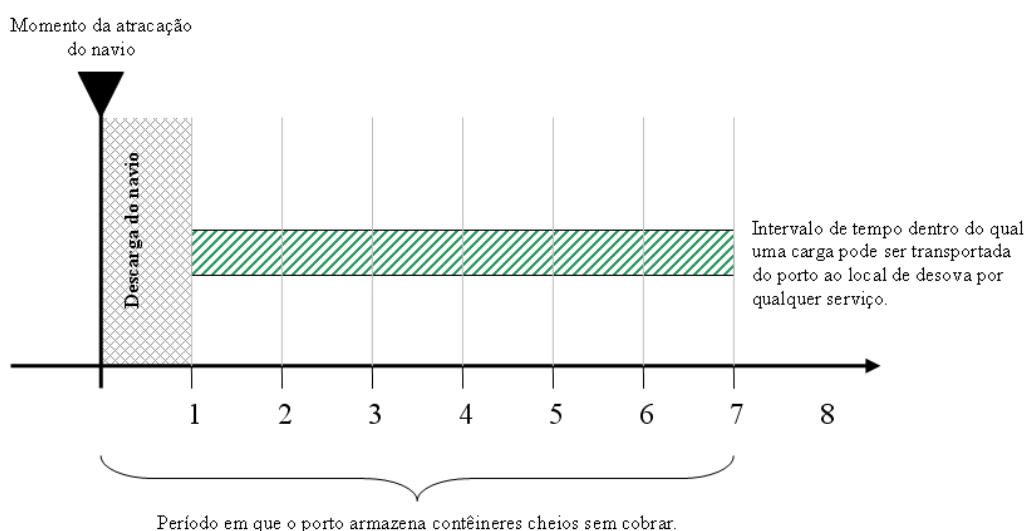


Figura 18: Período dentro do qual um contêiner pode ser removido do porto. Elaboração própria.

Neste capítulo foram abordadas as principais características do transporte multimodal desempenhado pela empresa, características estas que são de fundamental importância para uma adequada pesquisa bibliográfica e a construção do modelo de apoio à decisão é proposto nos próximos capítulos. O destaque foi dado para os fluxos de transporte (coleta e entrega) e os serviços de transporte (puro rodoviário e rodoviário-ferroviário).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica que foi feita sobre os temas relevantes para a construção do modelo de apoio à decisão proposto. O principal assunto estudado é o problema de programação dinâmica e a alocação de recursos que tem como objetivo obter respostas de nível operacional para perguntas como “quando” e “como” transportar cada carga.

3.1 Os níveis de decisão

Segundo Crainic e Laporte (1996) é conveniente classificar as decisões tomadas pelos diferentes níveis hierárquicos de uma empresa de transporte:

- Nível estratégico: normalmente envolve o nível hierárquico mais alto da empresa e diz respeito a grandes somas de investimento no longo prazo. As principais decisões deste nível são relativas ao projeto da rede de serviços e sua evolução, localização de fábricas, armazéns e terminais;
- Nível tático: tem como objetivo garantir no médio prazo um eficiente e racional uso dos recursos disponíveis. Neste nível as informações estão consolidadas e decisões são tomadas somente se ocorrerem variações relevantes no desempenho do sistema. As principais decisões deste nível estão relacionadas à que tipo de serviço de transporte oferecer, gerenciamento do tráfego, reposicionamento de equipamentos para uso no próximo período do horizonte de planejamento.
- Nível operacional: é o nível diretamente ligado à operação da empresa e toma decisões no curto ou curtíssimo prazo. Está exposto a um ambiente dinâmico e com imprevisibilidade onde o fator tempo é importante. Programação dos serviços, agendamento de manutenção, definição de rotas, regras de despacho e alocação de recursos às demandas são as decisões deste nível.

Ainda segundo Crainic e Laporte (1996) o objetivo principal de uma empresa de transporte é o de realizar lucros e melhorar, ou pelo menos manter, sua posição competitiva. Para tanto os níveis estratégico e tático guiam as decisões e ações do nível operacional, mas só este, o operacional, realizará o desempenho da empresa.

3.2 O problema da alocação de recursos

O problema deste Trabalho é do nível operacional e pode ser considerado um problema de alocação de recursos.

Winston (1995) afirma que o problema da alocação de recursos em que “um número limitado de recursos precisa ser designado a algumas atividades” são geralmente resolvidos por programação dinâmica. Um modelo dinâmico é aquele que considera decisões em mais do que um único período no tempo e a decisão de um certo período influencia as decisões dos outros períodos.

Shapiro (1984) descreve programação dinâmica como sendo aquela que o tomador de decisão necessita agir (tomar a decisão) num determinado período com base em eventos passados. Os eventos ocorrem, parcialmente devido às decisões tomadas, e, então, o processo de tomada de decisão se repete, agora com as novas informações do último período e o processo se repete nos períodos subseqüentes. Essa seqüência de tomada de decisões pode ser otimizada segundo algum critério (mínimo custo, máximo uso da capacidade etc) dentro de um horizonte de programação.

Crainic e Laporte (1996) dão exemplos desse problema relacionados à logística: a alocação de equipamentos vazios (veículos, vagões) a terminais, força motriz (locomotivas, cavalos mecânicos) a serviços de transporte; tripulações a viagens, contêineres vazios dos terminais de contêineres para os clientes e depois de volta para os terminais etc.

Crainic e Laporte (1996) representam o problema de alocação de recursos através de uma rede dinâmica (Figura 19).

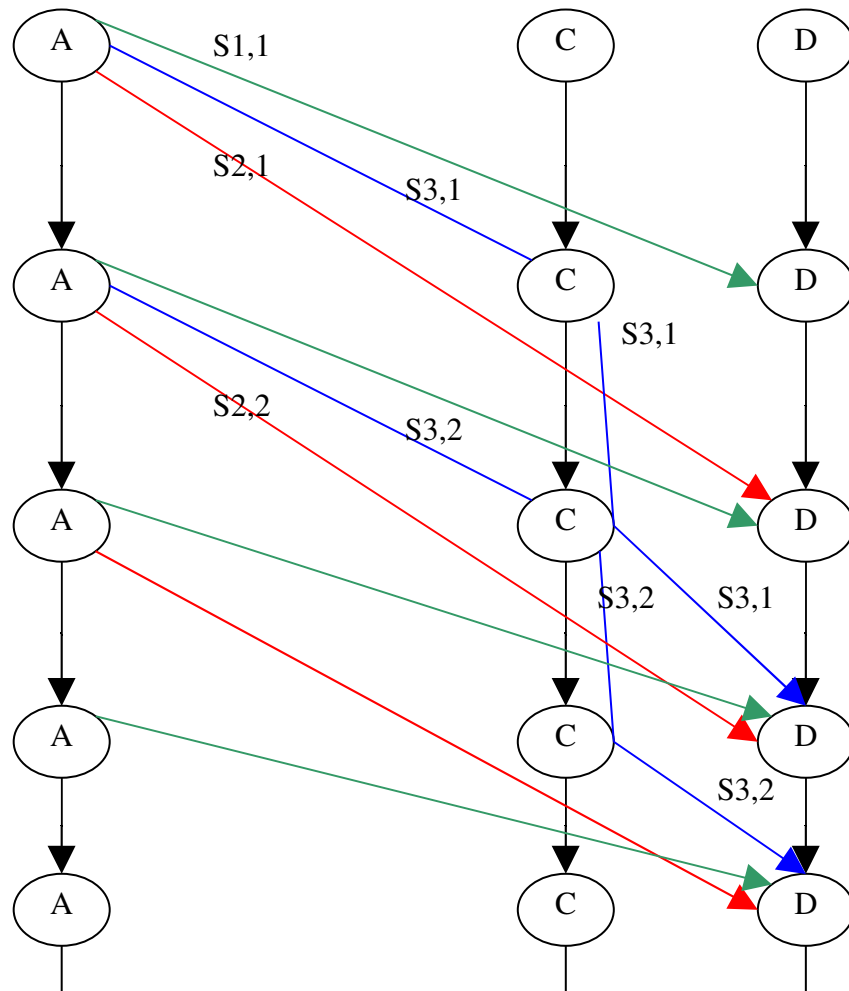


Figura 19: Exemplo de uma rede dinâmica de serviços. Adaptado de Crainic e Laporte (1996).

Essa figura representa uma rede de serviços de transporte com três terminais (A, C, e D) e três serviços de transporte (S1, S2 e S3) sendo que A é o terminal de origem, D é o terminal de destino e C é um terminal de transbordo. Cada nó representa um terminal num determinado dia (por exemplo, A2, é o terminal A no dia 2) e cada arco um serviço iniciado num certo dia (S2,1 representa o serviço 2 iniciado no dia 1). O serviço S1 representa um transporte direto de A até D com somente um dia de tempo em trânsito. O serviço S2 realiza o mesmo transporte mas com 2 dias de tempo em trânsito. O serviço S3 realiza o transporte com 3 dias de tempo em um transbordo no terminal C (o transbordo dura 1 dia). As setas verticais de cima para baixo representam as cargas estocadas em cada terminal de um dia para o outro. Essas setas garantem o balanço de massa em cada terminal.

Com esse tipo de modelagem é possível representar serviços de transporte originando em mais de um terminal e com destino a vários outros. A cada arco se associa uma variável binária em que 1 representa a prestação daquele serviço de transporte e 0 representa a não prestação.

Segundo Crainic e Laporte (1996) o problema de alocação dinâmica de recursos é um dos mais típicos e críticos aspectos relativos à operação de um sistema de transporte. Esse tipo de problema tem algumas características, conforme relaciono a seguir:

- Algumas demandas futuras são conhecidas, mas a maioria só pode ser estimada por previsões e eventos imprevistos podem ocorrer;
- Quando um recurso é alocado a certa demanda, esse recurso deixa de estar disponível por um determinado tempo;
- Quando um recurso está disponível novamente, na maioria das vezes está num local diferente do local de origem;

A modelagem clássica desse tipo de problema considera todo o horizonte de planejamento com o objetivo de maximizar o lucro total do sistema. Esse lucro é calculado somando-se o lucro do presente período mais os lucros esperados dos períodos futuros. Quando o estado do sistema e o ambiente no futuro são conhecidos, ou se assume que são, então a formulação resultante é determinística e geralmente escrita na forma de um modelo de otimização de uma rede dinâmica com restrições adicionais. A grande dificuldade aparece quando as incertezas na demanda futura são explicitamente consideradas. Nesse caso, variáveis aleatórias são usadas para representar elementos e decisões estocásticas. Consequentemente, a expectativa de lucros futuros aparece na função objetivo e o modelo adquire grande complexidade. (Crainic e Laporte, 1996)

O tema deste Trabalho se enquadra no nível operacional, pois tem como objetivo a criação de um modelo para a agendamento e programação do transporte de cada contêiner. Neste nível o fator tempo é importante e o modelo está exposto a imprevistos pontuais, ou seja, que não afetam o sistema como um todo.

A revisão bibliográfica foi feita destacando os principais pontos colocados no diagnóstico (efetuado no capítulo anterior). O foco esteve nos problemas de alocação de recursos e na programação dinâmica. O modelo proposto por Crainic e Laporte (1996) é a base do modelo de apoio a decisão proposto no próximo capítulo.

4 SOLUÇÃO PROPOSTA

Este capítulo apresenta a solução para o modelo de apoio à decisão que é o objetivo deste Trabalho. Para isso é detalhada a estrutura do modelo proposto que é composta por um filtro inicial que pré-seleciona as cargas a serem inseridas no modelo matemático e o próprio modelo matemático de programação inteira mista. Além disso, este capítulo apresenta os cálculos dos custos e demais dados de entrada.

4.1 Descrição do modelo de apoio à decisão

O modelo de decisão deve ser construído de modo a selecionar por qual serviço cada contêiner de coleta ou entrega deve ser transportado (rodo-ferroviário para Jundiaí, rodo-ferroviário para Mogi das Cruzes ou puro rodoviário). Dessa decisão devem ser antes excluídos os contêineres que não podem usar o serviço rodo-ferroviário.

Em um cenário que a demanda pelo transporte rodo-ferroviário é menor do que a capacidade desse serviço, todos os contêineres que puderem ser transportados por ele serão. Porém no cenário que é o objetivo deste trabalho, em que a demanda por pelo serviço rodo-ferroviário for maior que sua capacidade, de todos os contêineres que puderem ser transportados pelo serviço rodo-ferroviário, somente alguns serão; os restantes serão transportados pelo puro rodoviário.

O foco do modelo está no transporte ferroviário porque é mais barato, tem a capacidade limitada e exige certo esforço de programação e controle que o serviço rodoviário não exige.

O modelo deve programar o transporte de contêineres de coleta ou entrega para ambos os terminais considerando as restrições de capacidade da ferrovia (em peso e no número de TEU disponíveis), o contrato com o armador (que considera um volume mínimo diário que deve ser transportado), o fato de ter dois trens com tempo de ciclo do transporte de dois dias sendo que cada trem escala o terminal portuário em dias alternados. A decisão de qual terminal escalar em cada dia deve ser feita pelo modelo.

Além disso, o modelo deve considerar os prazos de transporte de cada contêiner sendo que o serviço puro rodoviário é realizado dentro de um dia e o serviço rodo-ferroviário precisa de dois dias.

O saldo de contêineres vazios em cada terminal interior também deve ser considerado, pois controla a necessidade ou não de reabastecimento do terminal com contêineres vazios, o que onera o transporte ferroviário e influencia na decisão de transporte.

Por não ser foco deste trabalho, o serviço puro-rodoviário não será detalhado no modelo de decisão. Não será considerada restrição para a capacidade desse serviço.

A figura 22 apresenta o modelo de apoio à decisão. O modelo é composto de três módulos. Os dois primeiros são executados numa planilha em Excel e o último é executado no programa *GAMS*.

- Um módulo de cálculo dos custos de transporte e ad-valorem de cada contêiner. Neste módulo recebe as informações em forma bruta e as trata de modo que possam ser inseridas no modelo matemático;
- Um Filtro que simplesmente exclui do modelo os contêineres que se enquadram nos critérios de exclusão (vide tópico 2.3.3) e que não podem, portanto, ser transportadas pelos serviços rodo-ferroviários.
- O modelo matemático de programação inteira mista que, dentre todos os contêineres não excluídos na etapa anterior, seleciona por qual serviço cada um deve ser transportado.

O modelo deve ser recalculado no início de cada dia. O resultado é a decisão de qual serviço e qual dia cada contêiner (individualmente) deve ser transportado. A decisão é dada para o dia atual e para os dias seguintes dentro do horizonte de programação. A decisão para os dias seguintes deve ser considerada uma previsão, mas está sujeita a alteração no próximo recálculo. No recálculo devem ser excluídos os contêineres cujo transporte foi realizado e incluídos os que surgiram nesse período.

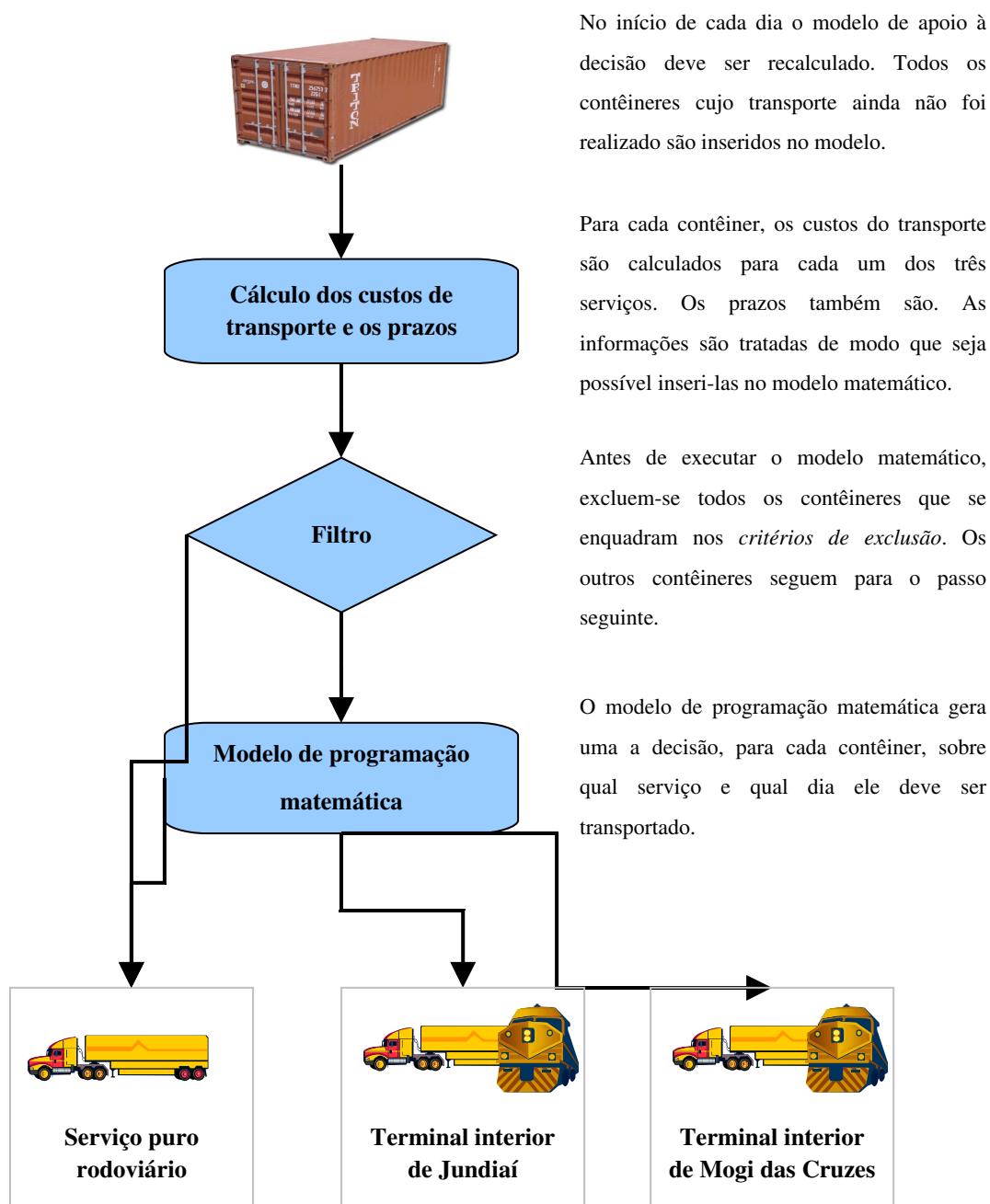


Figura 20: Esquema do modelo de apoio à decisão. Elaboração própria.

4.1.1 Dados de entrada

Cada contêiner tem uma combinação de parâmetros que é única: a combinação peso, tamanho, fluxo de transporte (coleta ou entrega), origem ou destino e prazo de transporte. Alguns clientes que transportam grandes volumes em contêineres podem eventualmente solicitar vários contêineres com as mesmas combinações de parâmetros.

Para reduzir a quantidade de informação a ser inserida no modelo matemático, considera-se *carga* (**c**) o conjunto de contêineres com as mesmas características. Cada carga tem um número Q_c de contêineres iguais.

Os seguintes dados de entrada devem ser dados para cada carga (**c**).

1. A cidade de origem (para uma carga de coleta) ou de destino (entrega). Esta informação serve para o cálculo dos custos de transporte em cada serviço (puro rodoviário e rodo-ferroviário) que é diferente para cada par origem-destino;
2. O valor da carga que está no contêiner. Esta informação serve para o cálculo do custo de ad-valorem;
3. Fluxo de transporte: coleta ou entrega;
4. Tamanho do contêiner: 20 pés ou 40 pés;
5. Peso bruto (peso do contêiner vazio mais o peso da carga): leve (abaixo de 26 toneladas) ou pesado (entre 26 e 30,5 toneladas);
6. Data da atracação do navio no qual o contêiner será embarcado ou desembarcado;
7. Data em que a carga de coleta dá entrada no sistema (data de solicitação do booking).
8. Quantidade de contêineres da carga (**c**) solicitados;

Os próximos tópicos deste capítulo detalham os dados de entrada no modelo com especial atenção para o cálculo dos custos de transporte e o cálculo das datas dentro das quais o transporte pode ser efetuado.

4.2 Cálculo dos custos de transporte

Os custos de transporte rodo-ferroviário serão considerados os mesmos para os dois terminais interiores. Isso pode ser feito sem prejuízo à qualidade da modelagem matemática a ser detalhada no próximo capítulo, pois os custos de transporte ferroviário e de transbordo são os mesmos e os custos da ponta rodoviária são muito semelhantes.

Este Trabalho usa informações de custos, tarifas e contratos que são conjecturas baseadas nas informações da empresa Hamburg Sued, porém não são as mesmas. Isso é necessário para não expor essas informações que são consideradas sigilosas.

4.2.1 Tarifas rodoviárias

Os fretes rodoviários são contratados de várias transportadoras selecionadas criteriosamente. Cada transportadora tem uma tabela de frete segundo a cidade de origem, a cidade de destino e o peso da carga: leve (até 26 toneladas) e pesada (de 26 até 30,5 toneladas). Os custos referentes aos pedágios que possam existir também fazem parte da tabela.

Uma análise estatística desses fretes (Figura 21 e Figura 22) mostrou que há forte correlação linear em função da distância percorrida. Mesmo se o pedágio de cada trajeto for somado ao frete, ainda sim há forte correlação. As retas de regressão linear demonstram que os fretes apresentam um custo fixo por viagem e um custo variável por quilometro. Vale ressaltar que os fretes a partir dos quais essas análises foram obtidas se concentram em distâncias inferiores a 1500 km e somente dentro do estado de São Paulo.

A fim de não expor as tabelas de frete contratados, neste texto serão usados valores obtidos a partir das retas de regressão e de uma tabela de distâncias rodoviárias (Anexo III) entre várias cidades paulistas e as três cidades onde se localizam os terminais envolvidos (Guarujá, Jundiaí e Mogi das Cruzes).

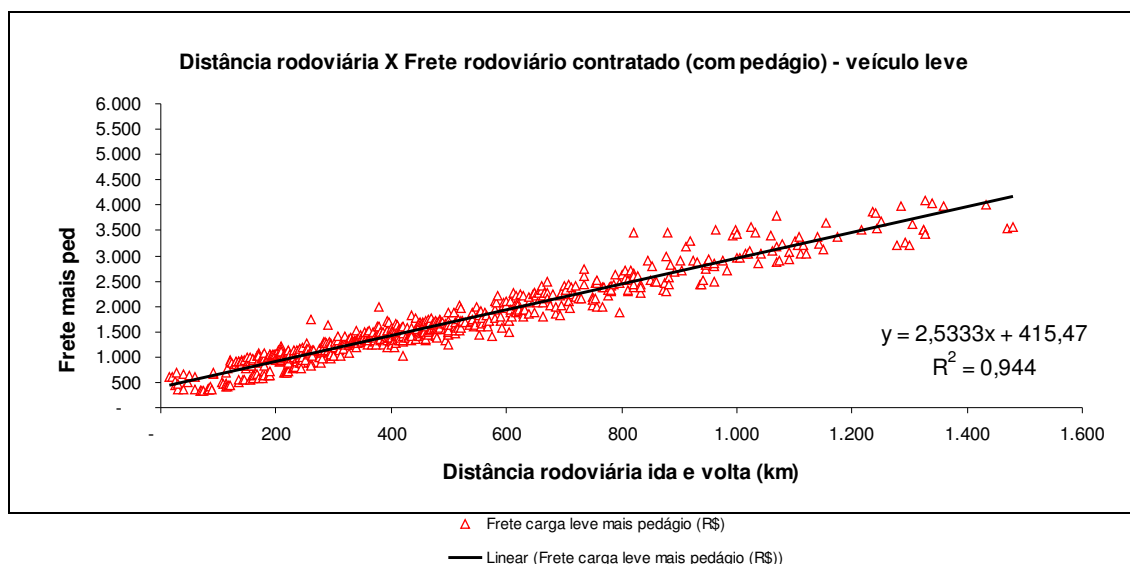


Figura 21: Gráfico de dispersão dos fretes contratados (mais pedágio) por distância percorrida para um veículo leve. Elaboração própria.

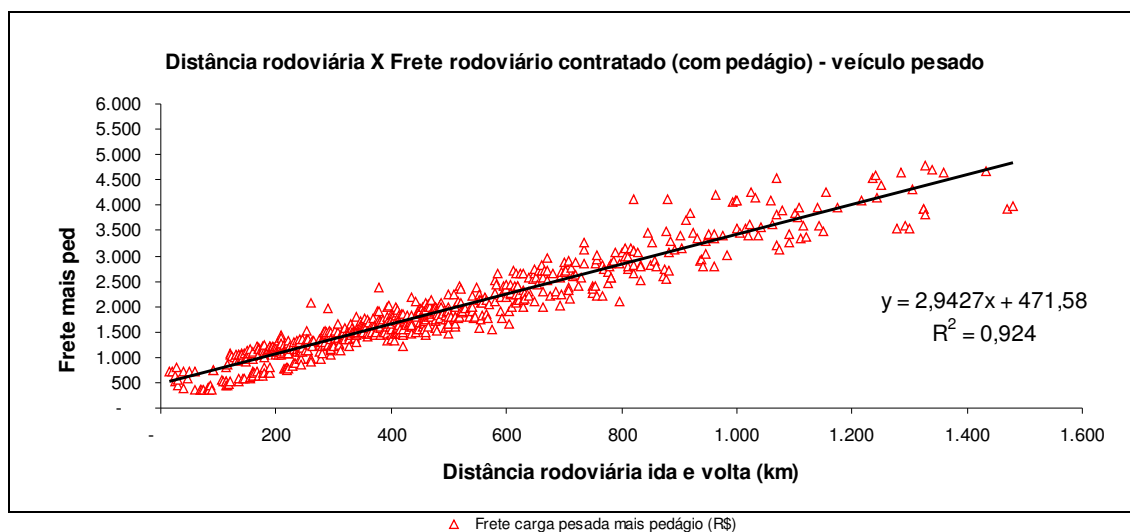


Figura 22: Gráfico de dispersão dos fretes contratados (mais pedágio) por distância percorrida para um veículo pesado. Elaboração própria.

O custo do frete em função da distância pode ser calculado a partir das seguintes equações. $F(D)$ representa o frete em R\$ em função da distância percorrida D (medida em quilômetros) entre o um terminal e o local de ova ou desova.

Tabela 2: Custo de transporte rodoviário (frete rodoviário).

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| Cargas leves: | $F_L(D) = 2,5333*2*d + 415,47$ |
| Cargas pesadas: | $F_P(D) = 2,9427*2*d + 471,58$ |

4.2.2 Ad-valorem

Por lei o transportador rodoviário de carga é obrigado a ter duas apólices de seguro: RCTR-C (Responsabilidade civil do transportador rodoviário – de carga) e RCF-DC (responsabilidade civil facultativa – desaparecimento de carga). A empresa de transporte tem a obrigação de possuir essas apólices e as cargas devem ser averbadas nelas e isso compõe o custo de transporte. Esse custo é chamado de ad-valorem. É cobrado através de uma taxa sobre o valor da nota fiscal da carga com a finalidade de remunerar os seguros.

O ad-valorem tem taxas diferentes para cada tipo de serviço. No serviço puro rodoviário se paga taxa de 0,1%. Já no serviço rodo-ferroviário se paga o ad-valorem referente ao transporte rodoviário (0,1%) mais o ad-valorem referente ao transporte ferroviário que é de 0,03%. O ad-valorem do serviço rodo-ferroviário é, portanto, de 0,13% do valor carga.

Tabela 3: Custos de ad-valorem (seguro da carga).

| |
|--|
| <i>Ad-valorem rodoviário = 0,1% do valor FOB da carga</i> |
| <i>Ad-valorem rodo-ferroviário = 0,13% do valor FOB da carga</i> |

4.2.3 Tarifas ferroviárias

A empresa mantém um contrato com a prestadora de transporte ferroviário chamado usualmente pelo termo em inglês *Take or Pay*. Esse contrato visa garantir ao prestador de transporte ferroviário baixa ociosidade de seus ativos e uma receita mínima que remunere os altos custos fixos envolvidos nesse modal. Por exemplo: um contrato desse tipo consiste no cliente da ferrovia pagar por um número fixo de TEU por composição ferroviária, mesmo se não usar.

O transporte marítimo tem a peculiaridade de concentrar muitas cargas. Por isso o transporte terrestre acaba tendo picos de demanda imediatamente antes e depois da atracação do navio (respectivamente para as cargas de coleta e para as de entrega). Isso faz com que fora desses dias possa haver até ociosidade de transporte não só pela ferrovia, mas também pelo serviço puro rodoviário. O contrato com o prestador de transporte ferroviário pode, então, considerar a possibilidade de que um dia com ociosidade seja compensado por outro dia com grande demanda. Esse contrato tem uma faixa mínima diária, abaixo da qual a ociosidade é penalizada, e uma faixa mínima mensal, que se for superada elimina todas as penalidades diárias.

Por simplicidade será considerado neste texto um contrato do tipo *Take or Pay* com limite mínimo de 30 TEU por sentido sem possibilidade de compensação de ociosidade, ou seja, cada composição ferroviária deve transportar no mínimo 30 TEU. Se houver ociosidade cada TEU ocioso será penalizado em R\$ 50,00.

Tabela 4: Custo ou penalização pela ociosidade da composição ferroviária.

| |
|--|
| <i>Penalização pela ociosidade na ferrovia = R\$ 50,00</i> |
|--|

As tarifas ferroviárias são diferenciadas para contêineres cheios e vazios e para contêineres de 20 pés e de 40 pés. As tarifas são as mesmas para ambos os terminais interiores.

Tabela 5: Tarifas ferroviárias

| | <i>20 pés</i> | <i>40 pés</i> |
|-----------------|----------------|----------------|
| Contêiner Cheio | <i>R\$ 280</i> | <i>R\$ 381</i> |
| Contêiner Vazio | <i>R\$ 156</i> | <i>R\$ 254</i> |

4.2.4 Tarifas de transbordo

Os terminais interiores, o terminal portuário ou pelo depósito de contêineres vazios cobram por cada transbordo de contêiner. Cada terminal tem uma tarifa própria que é a mesma para contêineres cheios ou vazios.

Neste texto será usado um valor único para todos os transbordos:

Tabela 6: Custo de cada operação de transbordo.

| |
|-------------------------------------|
| <i>Tarifa de transbordo = R\$40</i> |
|-------------------------------------|

4.2.5 Custo de armazenagem do contêiner

Normalmente os portos e terminais interiores permitem a armazenagem de contêineres cheios durante um período de tempo sem cobrar taxas. Como este texto considerará armazenagens de contêineres cheios somente dentro desse período então essas taxas não serão detalhadas.

A armazenagem de contêineres vazios normalmente não é cobrada pelos terminais interiores.

4.2.6 Custo total do transporte dos contêineres vazios

Um contêiner vazio é transportado somente no caso em que o estoque de contêineres vazios no ICT está muito baixo e há, portanto, necessidade de abastecer com mais contêineres vazios, ou quando o terminal interior tem excesso de contêineres vazios e nesse caso há a necessidade da remoção desses contêineres (devido à falta de espaço físico, por exemplo).

Duas premissas serão consideradas:

- É possível transportar contêineres vazios de caminhão ao ICT ou receber contêineres vazios de outras formas, porém será considerado neste texto que os contêineres vazios serão transportados ao ICT somente pelo serviço rodo-ferroviário.
- Os custos de transporte de contêineres vazios serão os mesmos no sentido de subida e descida da Serra.

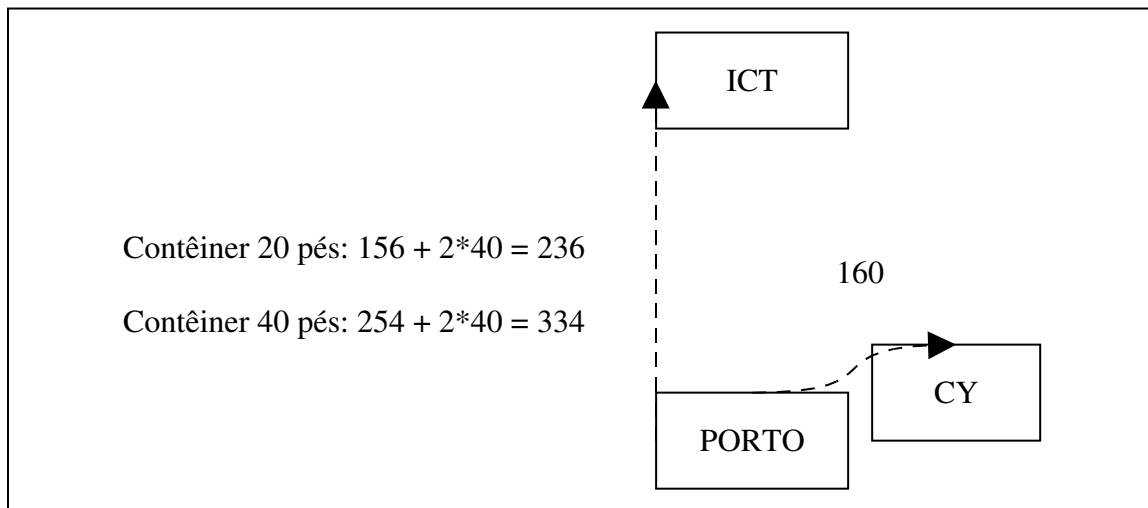


Figura 23: Esquema de cálculo dos custos de transporte de contêineres vazios (valores em R\$).
Elaboração própria.

Esse custo é composto pela tarifa ferroviária do contêiner vazio (que é diferente para contêineres de 20 pés ou 40 pés) e mais dois custos de transbordo (o primeiro transbordo do terminal interior para o vagão e outro transbordo do vagão para o porto).

Além do desbalanceamento de contêineres no ICT, existem também desbalanceamento no depósito de contêineres vazios. Esse último, por outro lado está relacionado ao saldo comercial (diferença entre importações e exportações). Esse custo de desbalanceamento faz parte dos custos logísticos de navegação e compõe o frete marítimo. O custo de desbalanceamento não será, portanto, considerado como custo de transporte multimodal.

De modo que a comparação entre os custos de transporte de contêineres vazios para o ICT e para o CY sejam possíveis, o custo de transporte para o CY será subtraído do custo de transporte para o ICT. Desta forma serviço rodo-ferroviário é onerado pela diferença de custos de transporte.

A tabela abaixo demonstra o cálculo desses custos com base na figura acima. Todos os valores em R\$.

Tabela 7: Custo do transporte de contêineres vazios pela ferrovia.

| <i>20 pés</i> | <i>40 pés</i> |
|----------------------|---------------------------|
| $156 + 2 * 40 - 160$ | $254 + 2 * 40 - 160 = 17$ |
| $= 76$ | 4 |

4.2.7 Custo total do transporte de um contêiner cheio

Como o objetivo deste Trabalho é o de criar um modelo de apoio à decisão de programação do transporte multimodal minimizando o custo total do sistema, assim é necessário obter os custos diretos de cada serviço de transporte. Os custos que incidem em ambos os serviços serão desconsiderados, pois não são relevantes para a tomada da decisão.

O custo direto do transporte de contêineres cheios nos dois tipos de serviço de transporte estão esquematizados nas figuras abaixo.

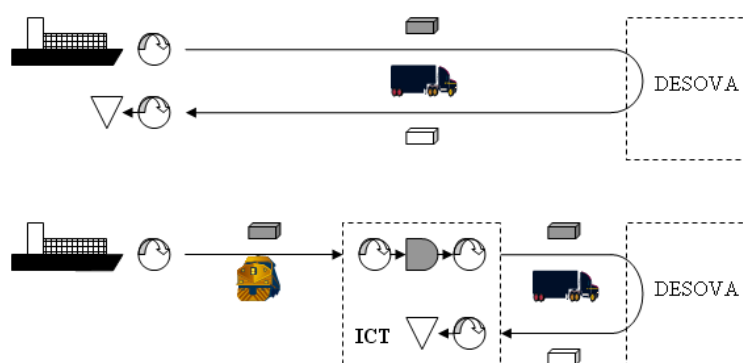


Figura 24: Comparação de custos na entrega: serviço puro rodoviário acima e serviço rodo-ferroviário abaixo. Elaboração própria.

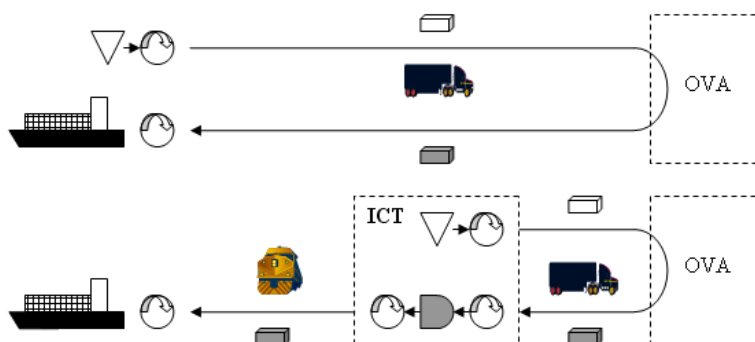


Figura 25: Comparação de custos na coleta: serviço puro rodoviário acima e serviço rodo-ferroviário abaixo. Elaboração própria.

O custo do transporte puro rodoviário (tanto para uma coleta quanto para uma entrega) é composto por:

- Frete rodoviário entre do terminal portuário, o local de ova ou desova e o depósito de contêineres vazios;
- Duas operações de transbordo: uma o no terminal portuário e outra no depósito de contêineres vazios;
- Ad-valorem rodoviário.

O custo do serviço rodo-ferroviário tanto para uma coleta quanto para uma entrega é composto por:

- Frete ferroviário entre o terminal portuário e o terminal interior de contêineres (ICT);
- Quatro operações de transbordo: que são do porto para o vagão, do vagão para o terminal interior, do terminal interior para a carreta e, após a ova ou desova, da carreta para o terminal interior;
- Frete rodoviário entre o terminal interior e o local de ova ou desova;
- Ad-valorem rodo-ferroviário.

A tabela abaixo consolida os custos de cada tipo de serviço:

Tabela 8: Custo total de transporte de um contêiner cheio.

| | | <i>Serviços Rodo-ferroviário</i> | <i>Serviço Puro Rodoviário</i> |
|--------|---------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 20 pés | <i>Leve</i> | $F_L(d)+280+4*40+0,1\% \text{ vFOB}$ | $F_L(d)+2*40+0,13\% \text{ vFOB}$ |
| | <i>Pesado</i> | $F_P(d)+280+4*40+0,1\% \text{ vFOB}$ | $F_P(d) +2*40+0,13\% \text{ vFOB}$ |
| | <i>o</i> | | |
| 40 pés | <i>Leve</i> | $F_L(d)+381+4*40+0,1\% \text{ vFOB}$ | $F_L(d) +2*40+0,13\% \text{ vFOB}$ |
| | <i>Pesado</i> | $F_P(d)+381+4*40+0,1\% \text{ vFOB}$ | $F_P(d) +2*40+0,13\% \text{ vFOB}$ |
| | <i>o</i> | | |

Os custos que incorrem em ambos os tipos de serviços são os de transbordo e de ad-valorem rodoviário. O serviço rodo-ferroviário necessita de quatro transbordos contra dois do serviço puro rodoviário. Ambos apresentam, além disso, o custo de ad-valorem rodoviário, que é de 0,1% do valor da carga. A diferença de dois transbordos e do custo de ad-valorem rodoviário não são relevantes para a tomada de decisão e, portanto, podem ser cancelados. A tabela abaixo apresenta a composição dos custos relevantes de cada tipo serviço.

Tabela 9: Custo simplificado de transporte de um contêiner cheio.

| | | <i>Serviços Rodo-ferroviário</i> | <i>Serviço Puro Rodoviário</i> |
|--------|---------------|---------------------------------------|--------------------------------|
| 20 pés | <i>Leve</i> | $F_L(d)+280+2*40+0,03\% \text{ vFOB}$ | $F_L(d)$ |
| | <i>Pesado</i> | $F_P(d)+280+2*40+0,03\% \text{ vFOB}$ | $F_P(d)$ |

| | | | |
|--------|--------|---------------------------------------|----------|
| 40 pés | Leve | $F_L(d)+38I+2*40+0,03\% \text{ vFOB}$ | $F_L(d)$ |
| | Pesado | $F_P(d)+38I+2*40+0,03\% \text{ vFOB}$ | $F_P(d)$ |

4.3 Cálculo do intervalo de tempo para o transporte

A consideração do intervalo de cada contêiner é fundamental para o funcionamento do modelo, pois o objetivo dele é justamente a programação do transporte.

Este tópico está baseado em 2.4 (Intervalos de tempos da coleta e da entrega). Cada contêiner tem um intervalo de tempo dentro do qual pode ser transportado. Esse intervalo depende da data em que a reserva de coleta é solicitada pelo cliente, da data de atracação do navio e da franquia de armazenamento do contêiner no porto.

Denominar-se-á de data mais cedo aquela que inicia esse intervalo de tempo e data mais tarde aquela que finaliza o mesmo. Esse intervalo se refere ao serviço puro rodoviário. O intervalo para o serviço rodo-ferroviário tem a data mais tarde da coleta diferente, pois esse serviço necessita de dois dias para a realização do transporte de coleta para o porto.

As seguintes premissas serão assumidas para o cálculo do intervalo de tempo para o transporte:

- A franquia de armazenamento do contêiner cheio no porto é de sete dias e após esse período o porto cobra uma taxa. Este Trabalho considerará o transporte somente dentro do período em que o porto não cobra taxa de armazenamento;
- A data mais cedo de uma entrega é o segundo dia após a atracação do navio. A data mais tarde da entrega é o limite do horizonte de programação da entrega.
- A data mais cedo de uma coleta é aquela a partir da qual a reserva é solicitada pelo cliente. Se essa data de solicitação estiver fora do horizonte de programação, a data mais cedo assume o valor mais cedo

do horizonte de programação das coletas. A data mais tarde de uma coleta é o penúltimo dia antes da atracação do navio;

O pseudo-algoritmo abaixo calcula as datas mais cedo e mais tarde para qualquer contêiner no serviço puro rodoviário. As datas para o serviço rodo-ferroviário serão consideradas à seguir no modelo matemático. O tamanho do horizonte de programação é representado por H e a unidade é dia.

Se [fluxo de transporte] = “coleta” então:
 [Data mais cedo] = maior([data de solicitação da
 reserva], [data de atracação do navio]-H);
 [Data mais tarde] = [data de atracação do navio] - 1;

Se [fluxo de transporte] = “entrega” então:
 [Data mais cedo] = [data de atracação do navio] + 1;
 [Data mais tarde] = [data de atracação do navio] + H;

A Figura 17 e a Figura 18 exemplificam as considerações feitas acima.

4.4 Modelo de programação matemática

O modelo matemático proposto é baseado no de Crainic e Laporte (1996) que está abordado no capítulo da revisão bibliográfica.

4.4.1 Os conjuntos ou índices

Cada carga é representada pelo índice c :

$$c = \{carga_1, carga_2, \dots, carga_{n-1}, carga_n\}$$

Define-se ainda o índice s que representa o serviço de transporte: puro rodoviário (a ser identificado por RODO) ou rodo-ferroviário para o terminal interior de Jundiaí ou Mogi das Cruzes (a serem identificados respectivamente por JUND e MOGI). Algumas restrições da modelagem dizem respeito somente ao transporte pelos serviços rodo-ferroviários. Neste caso pode-se definir um outro índice s' que contém somente os elementos MOGI e JUND.

$$s = \{RODO, MOGI, JUND\}$$

$$s' = \{MOGI, JUND\}$$

$$s' \subset s$$

O índice **f** define o fluxo de transporte de uma carga **c** que pode ser de coleta (cargas coletadas no interior que descem a serra em direção ao porto) e entrega (cargas que chegam ao porto e sobem a serra em direção aos terminais interiores).

ENTREGAS é o conjunto das cargas de entrega.

COLETAS é o conjunto das cargas de coletas. Ambos são subconjuntos de **c**.

$$\text{ENTREGAS} \cup \text{COLETAS} = c$$

$$\text{ENTREGAS} \cap \text{COLETAS} = \emptyset$$

O fluxo de transporte também se aplica à movimentação de contêineres vazios pela ferrovia. Porém, neste caso, as designações coleta e entrega não fazem sentido, pois os contêineres estão vazios. Serão usadas, então, para os contêineres vazios as os termos subida e descida, que são totalmente análogas à coleta e entrega.

$$f = \{\text{COLETA}, \text{ENTREGA}\} = \{\text{DESCIDA}, \text{SUBIDA}\}$$

O índice **t** representa o tamanho do contêiner que pode ser de 20 pés ou 40 pés.

$$t = \{20 \text{ pés}, 40 \text{ pés}\}$$

O índice **d** representa o horizonte de programação e seus elementos são os dias da programação. O dia 0 representa do dia atual, o 1 representa o dia seguinte e assim por diante até o H-ésimo dia do horizonte.

$$d = \{0, 1, 2, 3, \dots, H\}$$

4.4.2 Parâmetros

Cada carga tem os seguintes parâmetros:

- TAM_c é o tamanho do contêiner da carga **c** em TEU. É igual a 1 para o contêiner de 20' e 2 para o contêiner de 40';
- $FLUXO_c$ é o fluxo da carga **c** que pode ser de coleta ou entrega. Se a carga for de coleta então F_c é igual 1, se for de entrega então é igual 0;
- $PESO_c$ é o peso em toneladas de cada contêiner da carga **c**;

- Q_c é a quantidade de contêineres da carga c a serem coletados ou entregues;
- O custo de transporte da carga c pelo serviço s é representado por $CUSTO_{c,s}$;
- $VALOR_c$ é o valor da carga (ou mercadoria) de cada contêiner da carga c ;
- $VALOR_FERROVIA$ é o valor total das cargas máximo que uma composição ferroviária pode transportar.
- $TAMVZ_t$ representa o tamanho do contêiner t em TEU: 1 para o contêiner de 20 pés e 2 para o de 40 pés.
- $MAX_FERROVIA$ representa a capacidade do transporte ferroviário em TEU;
- $MIN_FERROVIA$ representa o volume mínimo que deve ser transportado por cada composição ferroviária em TEU;
- $PENALIDADE$ é o custo a ser pago para cada TEU ocioso caso uma composição ferroviária não cumpra o volume mínimo;
- $PESO_MAX_FERROV$ representa o peso máximo que a composição ferroviária pode transportar.
- $CAP_TERMINAL$ é a capacidade do terminal interior, ou seja, o número máximo de contêineres vazios que o terminal pode armazenar. Será considerado neste texto que ambos os terminais interiores tem a mesma capacidade;
- $SALDO_INI$ é o número de contêineres de cada tamanho e cada terminal no dia 0;
- $SALDO_MIN$ é o número de contêineres mínimo de cada tamanho em cada terminal no último dia do horizonte de programação;

- $CUSTOVZ_t$ é o custo do transporte do contêiner vazio do tamanho t para qualquer um dos dois terminais interiores;
- $PESOVZ_t$ é o peso do contêiner vazio de tamanho t . Um contêiner de 20 pés vazio pesa aproximadamente 2,3 tonelada e um de 40 pés, aproximadamente 4 toneladas;
- $PRAZORODO_{c,d}$ e $PRAZOFERRO_{c,d}$ são os parâmetro que permitem o transporte respectivamente pelos serviços puro rodoviário e rodoviário (ambos terminais). É igual a 0 se pode e igual a 1 se não pode.

Os parâmetros de prazo são calculados a partir dos dados de entrada (data mais cedo e data mais tarde) de acordo com o seguinte pseudo-algoritmo cada carga c :

Repetir enquanto $d \leq H$:

Se $d < [data\ mais\ cedo]$ então:

$PRAZORODO_{c,d} = 1$;

Caso contrário: $PRAZORODO_{c,d} = 0$;

Se $d > [data\ mais\ tarde]$ então:

$PRAZORODO_{c,d} = 1$;

Caso contrário: $PRAZORODO_{c,d} = 0$;

Se $d+1 > [data\ mais\ tarde]$ então:

$PRAZOFERRO_{c,d} = 1$;

Caso contrário: $PRAZOFERRO_{c,d} = 0$;

$d \leftarrow d+1$

Repetir;

4.4.3 Variáveis de decisão

A variável $X_{b,d,s,f}$ representa a o número de contêineres da carga c transportados pelo serviço s no dia d e pelo fluxo de transporte f . A variável X é inteira não negativa:

$$X_{c,d,s,f} \geq 0$$

$$X_{c,d,s,f} \leq Q_c$$

$$X_{c,d,s,f} \text{ é inteiro}$$

Num cenário em que o número coletas é superior ao numero de entregas (exportações são superiores às importações), há necessidade de abastecer continuamente o terminal interior com contêineres vazios. Se o número de entregas for superior ao número de coleta (importações superiores às exportações), o estoque de contêineres vazios aumenta continuamente e, portanto, acaba sendo necessário trazer os vazios do interior se o número de contêineres extrapolarem certo limite (que pode ser a capacidade do terminal).

A variável $Y_{t,d,s',f}$ representa o número de contêineres vazios do tamanho t transportados no dia d , para o terminal s' no sentido do fluxo f .

$$Y_{c,d,s',f} \geq 0$$

$$Y_{c,d,s',f} \leq \text{MAX_FERROVIA}$$

$$Y_{c,d,s',f} \text{ é inteiro}$$

A variável $\text{SALDO}_{s',t,d}$ representa a quantidade de contêineres contada no início do dia d , no terminal s e do tamanho t .

$$\text{SALDO}_{s',t,d} \geq 0$$

$$\text{SALDO}_{s',t,d} \leq \text{CAP_TERMINAL}$$

As variáveis $\text{SUBIDA}_{s',t,d}$ e $\text{DESCIDA}_{s',t,d}$ representam o número de contêineres do tamanho t transportados no dia d e para o terminal s' em cada fluxo (ou sentido) da ferrovia. SUBIDA e DESCIDA consolidam tanto os contêineres cheios de quanto os vazios transportados em cada fluxo de transporte.

$$\text{SUBIDA}_{s',t,d} \geq 0$$

$$\text{SUBIDA}_{s',t,d} \leq \text{MAX_FERROVIA}$$

$$\text{DESCIDA}_{s',t,d} \geq 0$$

$$\text{DESCIDA}_{s',t,d} \leq \text{MAX_FERROVIA}$$

Variáveis binárias são usadas para a decisão de qual terminal interior escalar (Jundiaí, ou Mogi das Cruzes) cada um dos dois trens. A variável $\text{BIN}_{d,s',f}$ é igual a 1 se o trem escalar o terminal s' , no dia d , no fluxo de transporte f ; senão é igual a 0.

$BIN_{d,s',f}$ é uma variável binária

A variável $P_{d,f}$ representam o número de TEU abaixo do volume mínimo que a composição ferroviária do dia d e fluxo f não foi capaz de cumprir. P é uma variável positiva e não pode ser superior ao volume mínimo transportado pela ferrovia.

$$P_{d,f} \geq 0$$

$$P_{d,f} \leq \text{MIN_FERROVIA}$$

4.4.4 Função objetivo

A função objetivo se dá pela soma dos custos de transporte, custos de ad-valor, custo de armazenamento de contêineres vazios e a penalidade.

$$\begin{aligned} \text{(F.O.) MIN: } & \sum_c \sum_d \sum_s \sum_f (X_{c,d,s,f}) * CUSTO_{c,s} + \\ & \sum_t \sum_d \sum_{s'} \sum_f (Y_{t,d,s',f}) * CUSTOVZ_t + \\ & \sum_d \sum_f (P_{d,f}) * PENALIDADE \end{aligned}$$

4.4.5 Restrições

$$(1) \quad \sum_d \sum_s \sum_f X_{c,d,s,f} = Q_c \quad , \text{para } \forall c$$

$$(2) \quad \sum_d \sum_s (X_{c,d,s,f=\text{COLETA}}) * FLUXO_c = 0 \quad , \text{para } \forall c$$

$$(3) \quad \sum_d \sum_s (X_{c,d,s,f=\text{ENTREGA}}) * (1 - FLUXO_c) = 0 \quad , \text{para } \forall c$$

$$(4) \quad BIN_{d,s'=JUND,f} + BIN_{d,s'=MOGI,f} = 1 \quad , p/ \forall d,f$$

$$(5) \quad M * BIN_{d,s',f} \geq \sum_c X_{c,d,s',f} + \sum_t Y_{t,d,s',f} \quad , p/ \forall d,f,s'$$

$$(6) \quad BIN_{d,s',f=\text{ENTREGA}} = BIN_{d+1,s',f=\text{COLETA}} \quad , p/ \forall d,s' / d \neq h$$

$$(7) \quad BIN_{d=0,s'=JUND,f=\text{COLETA}} = 1$$

$$(8) \quad BIN_{d=H,s'=JUND,f=\text{ENTREGA}} = 1$$

- (9) $SUBIDA_{s',t,d} = (\sum_{c \in t} X_{c,d,s',f=ENTREGA}) + Y_{t,d,s',f=SUBIDA}$,para $\forall s',t,d$
- (10) $DESCIDA_{s',t,d} = (\sum_{c \in t} X_{c,d,s',f=COLETA}) + Y_{t,d,s',f=DESCIDA}$,para $\forall s',t,d$
)
- (11) $SALDO_{s',t,d+1} = SALDO_{s',t,d} + SUBIDA_{s',t,d} - DESCIDA_{s',t,d}$,p\ $\forall s',t,d/ d \neq h$
)
- (12) $DESCIDA_{s',t,d} \leq SALDO_{s',t,d}$,para $\forall s',t,d$
)
- (13) $SALDO_{s',t,d} \leq CAP_TERMINAL$,para $\forall s',t,d$
)
- (14) $SALDO_{s',t,d=0} = SALDOINI$,para $\forall s',t$
)
- (15) $SALDO_{s',t,d=H} \geq SALDOMIN$,para $\forall s',t$
)
- (16) $\sum_c \sum_{s'} (X_{c,d,s',f}) * TAM_c + \sum_t \sum_{s'} (Y_{t,d,s',f}) * TAMVZ_t \leq MAX_FERROVIA$,
)
para $\forall d,f$
- (17) $\sum_c \sum_{s'} (X_{c,d,s',f}) * TAM_c + \sum_t \sum_{s'} (Y_{t,d,s',f}) * TAMVZ_t + P_{d,f} \geq MIN_FERROVIA$,
)
para $\forall d,f$
- (18) $\sum_c \sum_{s'} (X_{c,d,s',f}) * PESO_c + \sum_t \sum_{s'} (Y_{t,d,s',f}) * PESOVZ_t \leq 1500$,para $\forall d, f$
)
- (19) $\sum_c \sum_d \sum_f (X_{c,d,s=RODO,f}) * PRAZORODO_{c,d} = 0$
)
- (20) $\sum_c \sum_d \sum_f (X_{c,d,s=JUND,f}) * PRAZOFERRO_{c,d} = 0$
)
- (21) $\sum_c \sum_d \sum_f (X_{c,d,s=MOGI,f}) * PRAZOFERRO_{c,d} = 0$
)

$$(22) \quad \sum_c \sum_{s'} (X_{c,d,s',f}) * VALOR_c \leq VALOR_FERROVIA, \text{ para } \forall d, f$$

A quantidade de contêineres transportados de cada carga deve ser igual Q_c (1). As restrições (2) e (3) separam os contêineres de coleta e entrega.

A restrição (4) faz com que em cada dia e fluxo de transporte haja somente um trem de coleta e um trem de entrega.

A restrição (5) garante que nenhum contêiner seja alocado em um trem que não existe.

A restrição (6) garante que um trem que suba a Serra num dia para um terminal, desça a Serra no dia seguinte do mesmo terminal.

As restrições (7) e (8) obrigam um trem a realizar uma coleta no dia 0 a partir do terminal de Jundiá e a realizar uma entrega no dia H também no terminal de Jundiá.

As restrições (9) e (10) somam todos os contêineres (cheios e vazios) respectivamente nas variáveis de subida e descida da Serra.

A restrição (11) calcula o saldo de contêineres vazios no início de um dia em cada terminal interior.

(12) restringe o número de coletas que são feitas num certo dia ao saldo de contêineres vazios do terminal.

As restrições (13), (14) e (15) respectivamente limita o saldo de contêineres vazios no terminal, determina o saldo inicial, e o saldo mínimo de cada tipo de contêiner que cada terminal deve ter no último dia do horizonte de programação.

As restrições (16) e (17) garantem que cada composição ferroviária transporte respectivamente um número de TEU inferior ao limite máximo e um valor em TEU (ou penalidade) superior ao limite mínimo. (18) restringe o peso máximo de cada composição ferroviária.

As restrições (19), (20) e (21) garantem que cada contêiner seja transportado no dentro do intervalo de tempo correto.

A restrição (22) limita o valor total das cargas de cada composição ferroviária.

4.4.6 Implementação do modelo no programa GAMS

O programa usado para a modelagem matemática foi o GAMS. Algumas das principais características desse programa são:

- Oferecer uma linguagem de alto nível para uma representação compacta de modelos matemáticos complexos e grandes;
- Permitir mudanças no modelo de forma simplificada dado que usa uma sintaxe baseada em relações algébricas;
- Permitir que o modelo seja descrito de forma independente do algoritmo usado para resolvê-lo;
- Usar um modelo de dados relacional permitindo a construção de modelos grandes e complexos sem que o usuário se atenha a detalhes extrínsecos à modelagem como o uso dos recursos computacionais.

```

gamside: C:\Documents and Settings\Usuario\Meus documentos\PROJETO_GAMS\PROJETO_GAMS.gpr - [C:\Documents and Settings\Usuario\Meus documentos\PROJETO_GAMS\PROJETO_GAMS.gpr]
File Edit Search Windows Help

tf_1008.gms | tf_1008.lst | tf_1008.log

r_1(c).. sum((d,s,f), x(c,d,s,f)) =e= Q(c);
r_2(c).. sum((d,s), x(c,d,s,'COLETA')*(FLUXO(c))) =e= 0;
r_3(c).. sum((d,s), x(c,d,s,'ENTREGA')*(1-FLUXO(c))) =e= 0;

r_4(d,f).. BIN(d,'JUND',f) + BIN(d,'MOGI',f) =e= 1;
r_5(d,f,s1).. M * BIN(d,s1,f) =g= sum(c, x(c,d,s1,f)) + sum(t,y(t,d,s1,f));
r_6(d,s1){(dia(d) ne H)}.. BIN(d,s1,'ENTREGA') =e= BIN(d+1,s1,'COLETA');

r_7(s1,t,d).. subida(s1,t,d) =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)), x(c,d,s1,'ENTREGA')) + y(t,d,s1,'ENTREGA');
r_8(s1,t,d).. descida(s1,t,d) =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)), x(c,d,s1,'COLETA')) + y(t,d,s1,'COLETA');
r_9(s1,t,d){(dia(d) ne H)}.. saldo(s1,t,d+1) =e= saldo(s1,t,d) + subida(s1,t,d) - descida(s1,t,d);
r_10(s1,t,d){(dia(d) ne H)}.. descida(s1,t,d+1) =l= saldo(s1,t,d+1);
r_11(s1,t).. descida(s1,t,'O') =l= SALDO_INI;
r_12(s1,t,d).. saldo(s1,t,d) =l= LIM_SALDO;
r_13(s1,t).. saldo(s1,t,'O') =e= SALDO_INI;

r_14(d,f).. sum(c,s1, x(c,d,s1,f)*TAM(c)) + sum((t,s1), y(t,d,s1,f)*TAMVZ(t)) =l= CAPFERRO(d,f);
r_15(d,f){(dia(d) ne O)}.. sum(c,s1, x(c,d,s1,f)*TAM(c)) + sum((t,s1), y(t,d,s1,f)*TAMVZ(t)) =g= MIN_FERROVIA;
r_16(d,f).. sum(c,s1, x(c,d,s1,f)*PESO(c)) + sum((t,s1), y(t,d,s1,f)*PESOVZ(t)) =l= PESO_max_FERROV;

r_17.. sum(c,d,f, x(c,d,'RODO',f)*PRAZORODO(c,d)) =e= 0;
r_18.. sum(c,d,f, x(c,d,'JUND',f)*PRAZO FERRO(c,d)) =e= 0;
r_19.. sum(c,d,f, x(c,d,'MOGI',f)*PRAZO FERRO(c,d)) =e= 0;

r_20.. z =e= sum((c,d,s,f), x(c,d,s,f)*CUSTO(c,s)) + sum((t,d,s1,f), y(t,d,s1,f)*CUSTOVZ(t));

a_1(s,f,d).. total(s,f,d) =e= sum(c, x(c,d,s,f));
a_2(c,s).. total1(c,s) =e= sum((d,f), x(c,d,s,f));
a_3(d,s).. total2(d,s) =e= sum(c,f, x(c,d,s,f));
a_4(c,d).. total3(c,d) =e= sum(s,f, x(c,d,s,f));
b_1(t,s1,d).. v(t,s1,d,'DESCE','CH') =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)), x(c,d,s1,'COLETA'));
b_2(t,s1,d).. v(t,s1,d,'DESCE','CH') =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)), x(c,d,s1,'ENTREGA'));
b_3(t,s1,d).. v(t,s1,d,'DESCE','VZ') =e= y(t,d,s1,'COLETA');
b_4(t,s1,d).. v(t,s1,d,'DESCE','VZ') =e= y(t,d,s1,'ENTREGA');
c_1(t,s1,d).. v(t,s1,d,'SALDO_ICT','CH') =e= saldo(s1,t,d);
c_2(s1,d,t,MOV).. v2(s1,d,t,MOV) =e= sum(CHVZ, v(t,s1,d,MOV,CHVZ));

Model Trabalho_de_formatura /all/;
option limrow = 4;

```

Figura 26: Impressão da tela do GAMS com o modelo de programação que é objeto deste Trabalho. Elaboração própria.

Este capítulo detalhou cada aspecto do modelo de apoio à solução proposto: o cálculo dos custos, dos intervalos de tempo, o filtro que é a fase anterior ao modelo matemático, e o próprio modelo matemático. O modelo foi implementado no programa GAMS. Os resultados estão no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos com a solução do modelo proposto.

Primeiramente o modelo será validado num cenário real (denominado de cenário de validação). Logo após, será criado um cenário (denominado cenário base) que representa uma situação futura esperada. Outros cenários derivados do cenário base serão criados de modo a permitir algumas análises de sensibilidade do modelo de apoio à decisão.

5.1 Validação

Segundo Churchman, Ackoff e Arnoff (1964), a solução de um problema de pesquisa operacional deve ter um resultado melhor que as práticas atuais ou mostrar que nenhum melhoramento é possível. Por isso a aceitação de um modelo por parte dos tomadores de decisão depende mais da comparação com o desempenho passado do que da lógica do modelo. Além disso, é necessário ter cuidado com as informações históricas de modo a garantir que elas realmente significam o que parecem significar, ou seja, deve-se constatar que as informações têm plena concordância com a realidade passada. A amostra usada também deve ser investigada de modo a evitar que uma situação esporádica ou fora do normal enviesasse a comparação. A validação é justamente essa comparação, de um caso passado com o resultado do modelo, e visa identificar se o modelo proposto satisfaz o objetivo.

O modelo proposto será validado contra uma amostra selecionada. Essa amostra foi investigada de modo a se garantir que nenhum fato extraordinário prejudique a qualidade da validação. Foram selecionados todos os contêineres movimentados dentro de um intervalo de 7 dias, que é o horizonte de programação. Então foram excluídos todos que não tinham coleta ou entrega do tipo *porta*, ou seja, os contêineres cujo transporte terrestre é de responsabilidade do cliente. A Tabela 10 resume os dados selecionados.

Tabela 10: Resumo do cenário de validação antes do filtro

| | LEVE | | PESADO | | Total |
|----------------|----------|------------|----------|------------|------------|
| | 20 pés | 40 pés | 20 pés | 40 pés | |
| Coleta | 1 | 14 | 3 | 118 | 136 |
| Entrega | 1 | 155 | 1 | 26 | 183 |
| Total | 2 | 169 | 4 | 144 | 319 |

A esses 319 contêineres foi aplicada a primeira parte do modelo de apoio à decisão que é o filtro. Todos os contêineres que se enquadram nos critérios de exclusão foram retirados da amostra e ficaram 209 contêineres, que foram o cenário de validação. As características desses últimos contêineres estão detalhadas na tabela abaixo. As datas estão representadas em dias a partir do primeiro dia do mês.

Tabela 11: Cenário de validação

| Identificação | Coleta ou Entrega | Cidade de coleta ou entrega | Tamanho (pés) | Quantidade (unidades) | Peso (toneladas) | Valor da carga | Data de atracação do navio | Data de agendamento |
|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------|------------------|----------------|----------------------------|---------------------|
| carga01 | Coleta | JUNDIAI | 40 | 11 | 30 | 120 | 30 | 22 |
| carga02 | Coleta | JUNDIAI | 40 | 52 | 30 | 120 | 30 | 22 |
| carga03 | Coleta | JUNDIAI | 40 | 1 | 30 | 120 | 30 | 22 |
| carga04 | Coleta | JACAREI | 20 | 1 | 28 | 50 | 30 | 27 |
| carga05 | Coleta | VALINHOS | 40 | 11 | 30 | 50 | 30 | 23 |
| carga06 | Coleta | JACAREI | 20 | 1 | 28 | 50 | 30 | 28 |
| carga07 | Coleta | INDAIATUBA | 40 | 9 | 30 | 50 | 30 | 26 |
| carga08 | Coleta | INDAIATUBA | 40 | 1 | 30 | 50 | 30 | 27 |
| carga09 | Entrega | JUNDIAI | 40 | 24 | 21 | 120 | 25 | |
| carga10 | Entrega | JUNDIAI | 40 | 3 | 21 | 150 | 25 | |
| carga11 | Coleta | LOUVEIRA | 40 | 2 | 28 | 50 | 30 | 21 |
| carga12 | Coleta | JACAREI | 20 | 1 | 24 | 50 | 30 | 27 |
| carga13 | Entrega | ITUPEVA | 40 | 20 | 28 | 90 | 25 | |
| carga14 | Coleta | CAMPINAS | 40 | 2 | 28 | 50 | 30 | 26 |
| carga15 | Coleta | JAGUARIUNA | 40 | 3 | 28 | 40 | 30 | 27 |
| carga16 | Entrega | CAMPINAS | 40 | 7 | 21 | 240 | 25 | |
| carga17 | Entrega | CAMPINAS | 40 | 6 | 21 | 120 | 25 | |
| carga18 | Entrega | CAMPINAS | 40 | 3 | 17 | 130 | 25 | |
| carga19 | Entrega | PAULINIA | 40 | 7 | 20 | 90 | 25 | |
| carga20 | Entrega | CAMPINAS | 40 | 3 | 21 | 120 | 25 | |
| carga21 | Coleta | RIBEIRAO PRETO | 40 | 2 | 28 | 120 | 30 | 0 |
| carga22 | Entrega | LORENA | 40 | 17 | 24 | 80 | 25 | |
| carga23 | Entrega | CAJAMAR | 40 | 22 | 21 | 150 | 25 | |

A seguinte Tabela 12 resume os dados acima.

Tabela 12: Resumo do cenário de validação

| | LEVE | | PESADO | | Total |
|----------------|----------|-----------|----------|------------|------------|
| | 20 pés | 40 pés | 20 pés | 40 pés | |
| Coleta | 1 | | 2 | 94 | 97 |
| Entrega | | 92 | | 20 | 112 |
| Total | 1 | 92 | 2 | 114 | 209 |

Uma breve análise mostra que quase todos os contêineres da amostra são de 40 pés, o balanceamento é de 46% de coletas e 54% de entregas e a amostra se divide praticamente na metade em contêineres leves e pesados.

O código fonte desse cenário está no Anexo IV. Os parâmetros usados foram os seguintes:

- Valor total das cargas de cada composição ferroviária não pode ser superior que R\$6.000.000,00;
- O tamanho de cada composição ferroviária deve ser maior que 30 TEU e menor que 90 TEU. O peso máximo de cada composição também não pode ultrapassar 1500 toneladas;
- A penalidade pelo não cumprimento do número mínimo de TEU por composição ferroviária é de R\$50,00.
- Cada terminal interior tem um saldo inicial de 90 contêineres. O saldo no último dia do horizonte de programação não pode ser inferior que 30 TEU. A capacidade de cada terminal é de 400 contêineres.
- O peso de um contêiner vazio de 40 pés é de 4 toneladas e o peso de um contêiner de 20 pés é de 3 toneladas.

Esse cenário de validação foi submetido à segunda fase do modelo de apoio à decisão que é o modelo matemático. O resultado do modelo está na Tabela 13.

Tabela 13: Resultado do modelo para o cenário de validação

| | Serviço rodo-ferroviário pelo terminal: | | | | | | | | | Serviço PURO RODOVIÁRIO | |
|---------|---|---|---|----|----|----|---|-----------------|---|-------------------------|---|
| | JUNDIAÍ | | | | | | | MOGI DAS CRUZES | | | |
| Dia → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 5 | 6 | 4 | 5 |
| carga01 | | 3 | 8 | | | | | | | | |
| carga02 | | | 7 | 15 | 15 | 15 | | | | | |

| | Serviço rodo-ferroviário pelo terminal: | | | | | | | | Serviço PURO RODOVIÁRIO | |
|---------|---|----|----|----|----|----|----|-----------------|-------------------------|---|
| | JUNDIAÍ | | | | | | | MOGI DAS CRUZES | 4 | 5 |
| Dia → | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 5 | 6 | |
| carga03 | | 1 | | | | | | | | |
| carga04 | | | | | | | | | | 1 |
| carga05 | | 11 | | | | | | | | |
| carga06 | | | | | | | | | | 1 |
| carga07 | 9 | | | | | | | | | |
| carga08 | 1 | | | | | | | | | |
| carga09 | 9 | | | 15 | | | | | | |
| carga10 | 3 | | | | | | | | | |
| carga11 | 2 | | | | | | | | | |
| carga12 | | | | | | | | | | 1 |
| carga13 | 3 | | | | 4 | | 13 | | | |
| carga14 | 2 | | | | | | | | | |
| carga15 | 3 | | | | | | | | | |
| carga16 | | | | | 7 | | | | | |
| carga17 | | | 5 | | 1 | | | | | |
| carga18 | | | 3 | | | | | | | |
| carga19 | | | 7 | | | | | | | |
| carga20 | | | | | 3 | | | | | |
| carga21 | 2 | | | | | | | | | |
| carga22 | | | | | | | | 2 | 15 | |
| carga23 | | 15 | | | | | 2 | 2 | | 3 |
| Total | 34 | 30 | 30 | 30 | 30 | 15 | 15 | 4 | 15 | 1 |

O modelo dividiu a carga 23 (que tem 22 contêineres) nos três serviços: 3 contêineres devem ser transportados pelo serviço puro rodoviário, 2 pelo terminal interior de Mogi das Cruzes e 19 pelo terminal de Jundiaí. Um trem escala o terminal de Mogi das Cruzes uma vez (no dia 5 sobe a serra com cargas de entrega e no dia 6 desce com cargas de coleta).

Para validar o modelo foram considerados somente os custos de transporte e ad-valorem, ou seja, serão excluídos os custos de movimentação de vazios e a penalidade pelo não cumprimento do limite mínimo por composição ferroviária. Isso é necessário devido ao fato de que o contrato que a empresa realiza com a concessionária de transporte ferroviário não é igual ao que foi considerado no modelo e, além disso, o espaço no trem pode ser ocupado também por cargas de longo curso que não foram consideradas neste Trabalho.

Tabela 14: Comparação entre os serviços de transporte realizados e os resultados do modelo de apoio à decisão.

| Identificação | Realizado | Modelo | Quantidade | Realizado | Modelo |
|---------------|-----------|--------|------------|---------------|---------------|
| carga01 | JUND | JUND | 11 | R\$ 11.913,00 | R\$ 11.913,00 |

| | | | | | |
|--------------|------|--------------------------|------------|-----------------------|-----------------------|
| carga02 | JUND | JUND | 52 | R\$ 58.396,00 | R\$ 58.396,00 |
| carga03 | JUND | JUND | 1 | R\$ 1.137,00 | R\$ 1.137,00 |
| carga04 | RODO | RODO | 1 | R\$ 1.728,00 | R\$ 1.728,00 |
| carga05 | JUND | JUND | 11 | R\$ 14.432,00 | R\$ 14.432,00 |
| carga06 | RODO | RODO | 1 | R\$ 1.728,00 | R\$ 1.728,00 |
| carga07 | JUND | JUND | 9 | R\$ 13.257,00 | R\$ 13.257,00 |
| carga08 | JUND | JUND | 1 | R\$ 1.474,00 | R\$ 1.474,00 |
| carga09 | JUND | JUND | 24 | R\$ 25.368,00 | R\$ 25.368,00 |
| carga10 | RODO | JUND | 3 | R\$ 4.065,00 | R\$ 3.180,00 |
| carga11 | RODO | JUND | 2 | R\$ 3.216,00 | R\$ 2.572,00 |
| carga12 | RODO | RODO | 1 | R\$ 1.499,00 | R\$ 1.499,00 |
| carga13 | JUND | JUND | 20 | R\$ 27.460,00 | R\$ 27.460,00 |
| carga14 | RODO | JUND | 2 | R\$ 3.540,00 | R\$ 2.912,00 |
| carga15 | RODO | JUND | 3 | R\$ 6.036,00 | R\$ 5.016,00 |
| carga16 | JUND | JUND | 7 | R\$ 9.247,00 | R\$ 9.247,00 |
| carga17 | JUND | JUND | 6 | R\$ 7.986,00 | R\$ 7.986,00 |
| carga18 | RODO | JUND | 3 | R\$ 4.605,00 | R\$ 4.020,00 |
| carga19 | JUND | JUND | 7 | R\$ 10.430,00 | R\$ 10.430,00 |
| carga20 | JUND | JUND | 3 | R\$ 4.065,00 | R\$ 4.065,00 |
| carga21 | JUND | JUND | 2 | R\$ 5.950,00 | R\$ 5.950,00 |
| carga22 | RODO | MOGI | 17 | R\$ 36.448,00 | R\$ 33.524,00 |
| carga23 | RODO | 17 JUND, 2 MOGI, 3 RODO. | 22 | R\$ 28.622,00 | R\$ 28.309,00 |
| Total | | | 209 | R\$ 282.602,00 | R\$ 275.603,00 |

Observa-se que a diferença entre o realizado e o resultado do modelo é de R\$6.999,00 e representa uma redução no custo de transporte e ad-valorem de 2,5%.

Vale ressaltar que a amostra selecionada não representa a situação ideal para qual o modelo foi desenvolvido. Apesar de o resultado por si só validar o modelo, os seguintes aspectos devem ser considerados:

- A demanda pelo serviço rodo-ferroviário é inferior à oferta e isso faz com que não a programação das cargas sem um modelo como este não seja complexa. Num cenário em que a demanda for superior à oferta, a decisão de quais cargas devem ser excluídas da ferrovia será difícil de ser tomada com eficiência em termos de redução de custo.
- Este cenário tem cargas concentradas nos municípios vizinhos a Jundiaí e poucas no Vale do Paraíba, onde o terminal de Mogi das Cruzes é viável. Isso decorre do fato de que o terminal de Mogi iniciou suas operações há pouco tempo e ainda tem poucos clientes. O terminal de Jundiaí, por outro lado, tem muitos clientes.

O modelo foi executado em poucos segundos em um computador de 2,5 GHz com 512 MB de memória RAM.

5.2 Análises

O modelo de apoio à decisão será submetido a análises de modo a se verificar a sensibilidade do custo total ante variações em alguns parâmetros relevantes. Esses parâmetros são:

- A quantidade de contêineres
- O desbalanceamento entre coletas e entregas
- O horizonte de programação

5.2.1 Os cenários

Para tanto serão criados alguns cenários sendo que todos são baseados no primeiro (o cenário base). A diferença entre eles é somente a quantidade de contêineres. O Cenário base submetido ao filtro inicial e, portanto, pronto para ser inserido no modelo matemático corresponde ao cenário 2.

O cenário base foi criado da seguinte forma:

- Todos os municípios com demanda por coleta ou entrega superior a 1 contêiner por mês nos últimos 12 meses foram selecionados.
- Considerou-se que cada um desses municípios tem 8 clientes cujas cargas têm as seguintes características:
 - o Coleta, 20 pés, pesado;
 - o Coleta, 20 pés, leve;
 - o Coleta, 40 pés, pesado;
 - o Coleta, 40 pés, leve;
 - o Entrega, 20 pés, pesado;
 - o Entrega, 20 pés, leve;
 - o Entrega, 40 pés, pesado;

- o Entrega, 40 pés, leve;
- Cada cliente tem uma carga com 2 contêineres.
- Os contêineres leves têm peso de 20 toneladas e os pesados de 27 toneladas;
- A data de criação da reserva é zero para todas as cargas.
- Todos os contêineres têm cargas com o mesmo valor de R\$ 97.000,00.
- Dois navios atracam dentro do horizonte de programação: um no dia 3 e outro no dia 6. Um navio é aleatoriamente designado a cada carga.

O peso e o valor da carga, atribuídos a cada contêiner, foram obtidos a partir de um estudo estatístico de uma grande amostra de contêineres (cerca de 800 unidades).

As características do cenário base estão detalhadas na Tabela 15. Submetendo-se esse cenário ao filtro inicial do modelo de apoio à decisão obtemos a parcela do cenário base que será executado no modelo matemático (cenário 2, Tabela 16). A partir deste ponto somente o cenário 2 será considerado nas análises seguintes.

Tabela 15: Resumo do cenário base

| | LEVE | | PESADO | | Total |
|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 20 pés | 40 pés | 20 pés | 40 pés | |
| Coleta | 58 | 56 | 58 | 60 | 232 |
| Entrega | 58 | 56 | 58 | 60 | 232 |
| Total | 116 | 112 | 116 | 120 | 464 |

Tabela 16: Resumo do cenário 2

| | LEVE | | PESADO | | Total |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 20 pés | 40 pés | 20 pés | 40 pés | |
| Coleta | 30 | 26 | 36 | 30 | 120 |
| Entrega | 30 | 26 | 36 | 30 | 120 |
| Total | 60 | 52 | 72 | 60 | 244 |

A Tabela 17 exibe o cenário 2.

Tabela 17: Cenário base depois do filtro inicial (cenário 2) – todas as cargas têm 2 contêineres, a data de reserva é 0 e o valor da carga de cada contêiner é R\$97.000,00.

| identificação | Coleta ou entrega | Cidade de coleta ou entrega | Tamanho (pés) | Peso (toneladas) | Data de Atracação | Custo de transporte | | |
|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------------|------|------|
| | | | | | | RODO | JUND | MOGI |
| carga01 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 20 | 6 | 1519 | 1321 | 1558 |
| carga02 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 27 | 6 | 1751 | 1455 | 1730 |
| carga03 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 40 | 20 | 6 | 1519 | 1422 | 1659 |
| carga04 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 40 | 27 | 6 | 1751 | 1556 | 1831 |
| carga05 | ENTREGA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 20 | 6 | 1519 | 1321 | 1558 |
| carga06 | ENTREGA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 27 | 3 | 1751 | 1455 | 1730 |
| carga07 | ENTREGA | BRAGANCA PAULISTA | 40 | 20 | 3 | 1519 | 1422 | 1659 |
| carga08 | ENTREGA | BRAGANCA PAULISTA | 40 | 27 | 3 | 1751 | 1556 | 1831 |
| carga09 | COLETA | CACAPAVA | 20 | 20 | 3 | 1648 | 2105 | 1491 |
| carga10 | COLETA | CACAPAVA | 20 | 27 | 6 | 1901 | 2366 | 1652 |
| carga11 | COLETA | CACAPAVA | 40 | 20 | 3 | 1648 | 2206 | 1592 |
| carga12 | COLETA | CACAPAVA | 40 | 27 | 6 | 1901 | 2467 | 1753 |
| carga13 | ENTREGA | CACAPAVA | 20 | 20 | 6 | 1648 | 2105 | 1491 |
| carga14 | ENTREGA | CACAPAVA | 20 | 27 | 3 | 1901 | 2366 | 1652 |
| carga15 | ENTREGA | CACAPAVA | 40 | 20 | 3 | 1648 | 2206 | 1592 |
| carga16 | ENTREGA | CACAPAVA | 40 | 27 | 6 | 1901 | 2467 | 1753 |
| carga17 | COLETA | CAIEIRAS | 20 | 27 | 3 | 1351 | 1285 | 1815 |
| carga18 | ENTREGA | CAIEIRAS | 20 | 27 | 3 | 1351 | 1285 | 1815 |
| carga19 | COLETA | CAMPINAS | 20 | 20 | 3 | 1535 | 1235 | 1734 |
| carga20 | COLETA | CAMPINAS | 20 | 27 | 6 | 1770 | 1356 | 1935 |
| carga21 | COLETA | CAMPINAS | 40 | 20 | 6 | 1535 | 1336 | 1835 |
| carga22 | COLETA | CAMPINAS | 40 | 27 | 6 | 1770 | 1457 | 2036 |
| carga23 | ENTREGA | CAMPINAS | 20 | 20 | 6 | 1535 | 1235 | 1734 |
| carga24 | ENTREGA | CAMPINAS | 20 | 27 | 3 | 1770 | 1356 | 1935 |
| carga25 | ENTREGA | CAMPINAS | 40 | 20 | 3 | 1535 | 1336 | 1835 |
| carga26 | ENTREGA | CAMPINAS | 40 | 27 | 3 | 1770 | 1457 | 2036 |
| carga27 | COLETA | GUARULHOS | 20 | 27 | 6 | 1250 | 1518 | 1186 |
| carga28 | ENTREGA | GUARULHOS | 20 | 27 | 3 | 1250 | 1518 | 1186 |
| carga29 | COLETA | INDAIATUBA | 20 | 20 | 6 | 1647 | 1254 | 1746 |
| carga30 | COLETA | INDAIATUBA | 20 | 27 | 3 | 1900 | 1377 | 1949 |
| carga31 | COLETA | INDAIATUBA | 40 | 20 | 3 | 1647 | 1355 | 1847 |
| carga32 | COLETA | INDAIATUBA | 40 | 27 | 3 | 1900 | 1478 | 2050 |
| carga33 | ENTREGA | INDAIATUBA | 20 | 20 | 6 | 1647 | 1254 | 1746 |
| carga34 | ENTREGA | INDAIATUBA | 20 | 27 | 3 | 1900 | 1377 | 1949 |
| carga35 | ENTREGA | INDAIATUBA | 40 | 20 | 6 | 1647 | 1355 | 1847 |
| carga36 | ENTREGA | INDAIATUBA | 40 | 27 | 6 | 1900 | 1478 | 2050 |
| carga37 | COLETA | ITUPEVA | 20 | 20 | 6 | 1479 | 1150 | 1588 |
| carga38 | COLETA | ITUPEVA | 20 | 27 | 3 | 1705 | 1257 | 1765 |
| carga39 | COLETA | ITUPEVA | 40 | 20 | 6 | 1479 | 1251 | 1689 |
| carga40 | COLETA | ITUPEVA | 40 | 27 | 6 | 1705 | 1358 | 1866 |
| carga41 | ENTREGA | ITUPEVA | 20 | 20 | 3 | 1479 | 1150 | 1588 |
| carga42 | ENTREGA | ITUPEVA | 20 | 27 | 6 | 1705 | 1257 | 1765 |
| carga43 | ENTREGA | ITUPEVA | 40 | 20 | 6 | 1479 | 1251 | 1689 |
| carga44 | ENTREGA | ITUPEVA | 40 | 27 | 6 | 1705 | 1358 | 1866 |
| carga45 | COLETA | JACAREI | 20 | 20 | 3 | 1499 | 1795 | 1181 |
| carga46 | COLETA | JACAREI | 20 | 27 | 6 | 1728 | 2006 | 1292 |
| carga47 | COLETA | JACAREI | 40 | 20 | 3 | 1499 | 1896 | 1282 |
| carga48 | COLETA | JACAREI | 40 | 27 | 6 | 1728 | 2107 | 1393 |
| carga49 | ENTREGA | JACAREI | 20 | 20 | 6 | 1499 | 1795 | 1181 |

| identificação | Coleta ou entrega | Cidade de coleta ou entrega | Tamanho (pés) | Peso (toneladas) | Data de Atracação | Custo de transporte | | |
|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------------|------|------|
| | | | | | | RODO | JUND | MOGI |
| carga01 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 20 | 6 | 1519 | 1321 | 1558 |
| carga50 | ENTREGA | JACAREI | 20 | 27 | 6 | 1728 | 2006 | 1292 |
| carga51 | ENTREGA | JACAREI | 40 | 20 | 6 | 1499 | 1896 | 1282 |
| carga52 | ENTREGA | JACAREI | 40 | 27 | 3 | 1728 | 2107 | 1393 |
| carga53 | COLETA | JAGUARIUNA | 20 | 20 | 3 | 1743 | 1418 | 1947 |
| carga54 | COLETA | JAGUARIUNA | 20 | 27 | 6 | 2012 | 1568 | 2182 |
| carga55 | COLETA | JAGUARIUNA | 40 | 20 | 6 | 1743 | 1519 | 2048 |
| carga56 | COLETA | JAGUARIUNA | 40 | 27 | 3 | 2012 | 1669 | 2283 |
| carga57 | ENTREGA | JAGUARIUNA | 20 | 20 | 6 | 1743 | 1418 | 1947 |
| carga58 | ENTREGA | JAGUARIUNA | 20 | 27 | 3 | 2012 | 1568 | 2182 |
| carga59 | ENTREGA | JAGUARIUNA | 40 | 20 | 6 | 1743 | 1519 | 2048 |
| carga60 | ENTREGA | JAGUARIUNA | 40 | 27 | 3 | 2012 | 1669 | 2283 |
| carga61 | COLETA | JUNDIAI | 20 | 20 | 3 | 1355 | 938 | 1503 |
| carga62 | COLETA | JUNDIAI | 20 | 27 | 6 | 1561 | 1010 | 1667 |
| carga63 | COLETA | JUNDIAI | 40 | 27 | 3 | 1561 | 1111 | 1768 |
| carga64 | COLETA | JUNDIAI | 40 | 27 | 6 | 1561 | 1111 | 1768 |
| carga65 | ENTREGA | JUNDIAI | 20 | 20 | 6 | 1355 | 938 | 1503 |
| carga66 | ENTREGA | JUNDIAI | 20 | 27 | 3 | 1561 | 1010 | 1667 |
| carga67 | ENTREGA | JUNDIAI | 40 | 27 | 6 | 1561 | 1111 | 1768 |
| carga68 | ENTREGA | JUNDIAI | 40 | 27 | 6 | 1561 | 1111 | 1768 |
| carga69 | COLETA | LORENA | 20 | 20 | 6 | 2144 | 2512 | 1850 |
| carga70 | COLETA | LORENA | 20 | 27 | 6 | 2478 | 2839 | 2069 |
| carga71 | COLETA | LORENA | 40 | 20 | 6 | 2144 | 2613 | 1951 |
| carga72 | COLETA | LORENA | 40 | 27 | 6 | 2478 | 2940 | 2170 |
| carga73 | ENTREGA | LORENA | 20 | 20 | 3 | 2144 | 2512 | 1850 |
| carga74 | ENTREGA | LORENA | 20 | 27 | 3 | 2478 | 2839 | 2069 |
| carga75 | ENTREGA | LORENA | 40 | 20 | 3 | 2144 | 2613 | 1951 |
| carga76 | ENTREGA | LORENA | 40 | 27 | 3 | 2478 | 2940 | 2170 |
| carga77 | COLETA | LOUVEIRA | 20 | 20 | 3 | 1396 | 1090 | 1564 |
| carga78 | COLETA | LOUVEIRA | 20 | 27 | 6 | 1608 | 1186 | 1737 |
| carga79 | COLETA | LOUVEIRA | 40 | 20 | 3 | 1396 | 1191 | 1665 |
| carga80 | COLETA | LOUVEIRA | 40 | 27 | 3 | 1608 | 1287 | 1838 |
| carga81 | ENTREGA | LOUVEIRA | 20 | 20 | 6 | 1396 | 1090 | 1564 |
| carga82 | ENTREGA | LOUVEIRA | 20 | 27 | 3 | 1608 | 1186 | 1737 |
| carga83 | ENTREGA | LOUVEIRA | 40 | 20 | 3 | 1396 | 1191 | 1665 |
| carga84 | ENTREGA | LOUVEIRA | 40 | 27 | 6 | 1608 | 1287 | 1838 |
| carga85 | COLETA | PAULINIA | 20 | 20 | 3 | 1695 | 1394 | 1825 |
| carga86 | COLETA | PAULINIA | 20 | 27 | 3 | 1956 | 1539 | 2041 |
| carga87 | COLETA | PAULINIA | 40 | 20 | 6 | 1695 | 1495 | 1926 |
| carga88 | COLETA | PAULINIA | 40 | 27 | 3 | 1956 | 1640 | 2142 |
| carga89 | ENTREGA | PAULINIA | 20 | 20 | 3 | 1695 | 1394 | 1825 |
| carga90 | ENTREGA | PAULINIA | 20 | 27 | 6 | 1956 | 1539 | 2041 |
| carga91 | ENTREGA | PAULINIA | 40 | 20 | 3 | 1695 | 1495 | 1926 |
| carga92 | ENTREGA | PAULINIA | 40 | 27 | 6 | 1956 | 1640 | 2142 |
| carga93 | COLETA | PINDAMONHANGABA | 20 | 20 | 3 | 1804 | 2226 | 1564 |
| carga94 | COLETA | PINDAMONHANGABA | 20 | 27 | 6 | 2082 | 2507 | 1737 |
| carga95 | COLETA | PINDAMONHANGABA | 40 | 20 | 6 | 1804 | 2327 | 1665 |
| carga96 | COLETA | PINDAMONHANGABA | 40 | 27 | 3 | 2082 | 2608 | 1838 |
| carga97 | ENTREGA | PINDAMONHANGABA | 20 | 20 | 3 | 1804 | 2226 | 1564 |
| carga98 | ENTREGA | PINDAMONHANGABA | 20 | 27 | 3 | 2082 | 2507 | 1737 |
| carga99 | ENTREGA | PINDAMONHANGABA | 40 | 20 | 3 | 1804 | 2327 | 1665 |
| carga100 | ENTREGA | PINDAMONHANGABA | 40 | 27 | 6 | 2082 | 2608 | 1838 |

| identificação | Coleta ou entrega | Cidade de coleta ou entrega | Tamanho (pés) | Peso (toneladas) | Data de Atracação | Custo de transporte | | |
|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------------|------|------|
| | | | | | | RODO | JUND | MOGI |
| carga01 | COLETA | BRAGANCA PAULISTA | 20 | 20 | 6 | 1519 | 1321 | 1558 |
| carga101 | COLETA | PIRAPORA DO BOM JESUS | 20 | 27 | 6 | 1443 | 1398 | 1702 |
| carga102 | ENTREGA | PIRAPORA DO BOM JESUS | 20 | 27 | 6 | 1443 | 1398 | 1702 |
| carga103 | COLETA | RIBEIRAO PRETO | 20 | 20 | 3 | 2818 | 2567 | 3041 |
| carga104 | COLETA | RIBEIRAO PRETO | 20 | 27 | 3 | 3260 | 2903 | 3453 |
| carga105 | COLETA | RIBEIRAO PRETO | 40 | 20 | 6 | 2818 | 2668 | 3142 |
| carga106 | COLETA | RIBEIRAO PRETO | 40 | 27 | 6 | 3260 | 3004 | 3554 |
| carga107 | ENTREGA | RIBEIRAO PRETO | 20 | 20 | 3 | 2818 | 2567 | 3041 |
| carga108 | ENTREGA | RIBEIRAO PRETO | 20 | 27 | 6 | 3260 | 2903 | 3453 |
| carga109 | ENTREGA | RIBEIRAO PRETO | 40 | 20 | 6 | 2818 | 2668 | 3142 |
| carga110 | ENTREGA | RIBEIRAO PRETO | 40 | 27 | 3 | 3260 | 3004 | 3554 |
| carga111 | COLETA | SUZANO | 20 | 20 | 3 | 1050 | 1491 | 1029 |
| carga112 | COLETA | SUZANO | 20 | 27 | 3 | 1207 | 1652 | 1116 |
| carga113 | ENTREGA | SUZANO | 20 | 20 | 3 | 1050 | 1491 | 1029 |
| carga114 | ENTREGA | SUZANO | 20 | 27 | 6 | 1207 | 1652 | 1116 |
| carga115 | COLETA | VALINHOS | 20 | 20 | 3 | 1505 | 1120 | 1643 |
| carga116 | COLETA | VALINHOS | 20 | 27 | 6 | 1736 | 1222 | 1829 |
| carga117 | COLETA | VALINHOS | 40 | 20 | 3 | 1505 | 1221 | 1744 |
| carga118 | COLETA | VALINHOS | 40 | 27 | 6 | 1736 | 1323 | 1930 |
| carga119 | ENTREGA | VALINHOS | 20 | 20 | 6 | 1505 | 1120 | 1643 |
| carga120 | ENTREGA | VALINHOS | 20 | 27 | 3 | 1736 | 1222 | 1829 |
| carga121 | ENTREGA | VALINHOS | 40 | 20 | 6 | 1505 | 1221 | 1744 |
| carga122 | ENTREGA | VALINHOS | 40 | 27 | 6 | 1736 | 1323 | 1930 |

Os outros cenários foram criados com base no cenário 2. A única diferença entre eles é a quantidade de contêineres por carga. O cenário 1 tem 1 contêiner por carga, o cenário 2 tem 2 contêineres por carga, o cenário 3 tem 3 contêineres por carga e assim por diante até o cenário 10. A Tabela 18 apresenta o número total de contêineres por cenário.

É útil ter vários cenários dessa forma para analisar os resultados do modelo segundo a variação na quantidade de contêineres.

Tabela 18: Total de contêineres por cenário

| | Total de contêineres |
|------------|----------------------|
| Cenário 1 | 122 |
| Cenário 2 | 244 |
| Cenário 3 | 366 |
| Cenário 4 | 488 |
| Cenário 5 | 610 |
| Cenário 6 | 732 |
| Cenário 7 | 854 |
| Cenário 8 | 976 |
| Cenário 9 | 1098 |
| Cenário 10 | 1220 |

Todos esses cenários usaram os mesmos parâmetros que o cenário de validação, exceto o horizonte de programação que é variável em uma das análises.

5.2.2 Análise de sensibilidade com relação à quantidade de contêineres

A Tabela 19 apresenta os resultados do modelo para cada um dos 10 cenários num horizonte de programação de 7 dias. Pode-se concluir que o custo total aumenta proporcionalmente de acordo com o número de contêineres.

Tabela 19: Análise dos resultados segundo uma variação constantes na quantidade total de contêineres (horizonte de 7 dias).

| Cenário | Total de contêineres | Serviço de transporte | | | Custo total | Custos | |
|---------|----------------------|-----------------------|------|------|--------------|-----------------|------------------|
| | | RODO | JUND | MOGI | | Puro rodoviário | Rodo-ferroviário |
| 1 | 122 | | 84 | 38 | 197.712,00 | | 182.612,00 |
| 2 | 244 | | 168 | 76 | 373.324,00 | | 365.224,00 |
| 3 | 366 | 24 | 252 | 90 | 557.418,00 | 37.311,00 | 514.557,00 |
| 4 | 488 | 34 | 334 | 120 | 741.014,00 | 52.634,00 | 683.280,00 |
| 5 | 610 | 93 | 400 | 117 | 939.867,00 | 162.903,00 | 772.366,00 |
| 6 | 732 | 136 | 462 | 134 | 1.133.598,00 | 238.566,00 | 890.518,00 |
| 7 | 854 | 212 | 506 | 136 | 1.340.782,00 | 373.757,00 | 962.525,00 |
| 8 | 976 | 324 | 498 | 154 | 1.548.178,00 | 576.781,00 | 966.897,00 |
| 9 | 1098 | 428 | 437 | 233 | 1.783.672,00 | 774.278,00 | 1.004.894,00 |
| 10 | 1220 | 525 | 559 | 136 | 2.001.761,00 | 955.445,00 | 1.041.816,00 |

Analisando-se o custo unitário (que é o custo total dividido pelo número de contêineres) obtemos o gráfico da Figura 27 que explica os resultados do modelo. Com um número baixo de contêineres (Cenário 1) o custo unitário é grande pois ocorrem

muitas penalidades por não cumprimento do limite mínimo por composição ferroviária. No cenário 3 o custo unitário é o mínimo e a partir dessa quantidade o custo unitário aumenta. Observa-se, então, que o custo unitário dos serviços rodo-ferroviário (para ambos os ICT) não aumenta e o custo unitário do serviço puro rodoviário aumenta bastante. A explicação é de que na medida em que o número total de contêineres aumenta, o modelo aloca mais eficientemente os contêineres nos trens, reduzindo então o custo total de cada cenário. Além disso, a capacidade limitada o serviço ferroviário faz com que todos os outros contêineres sejam alocados no serviço puro rodoviário, o que aumenta bastante seu custo unitário.

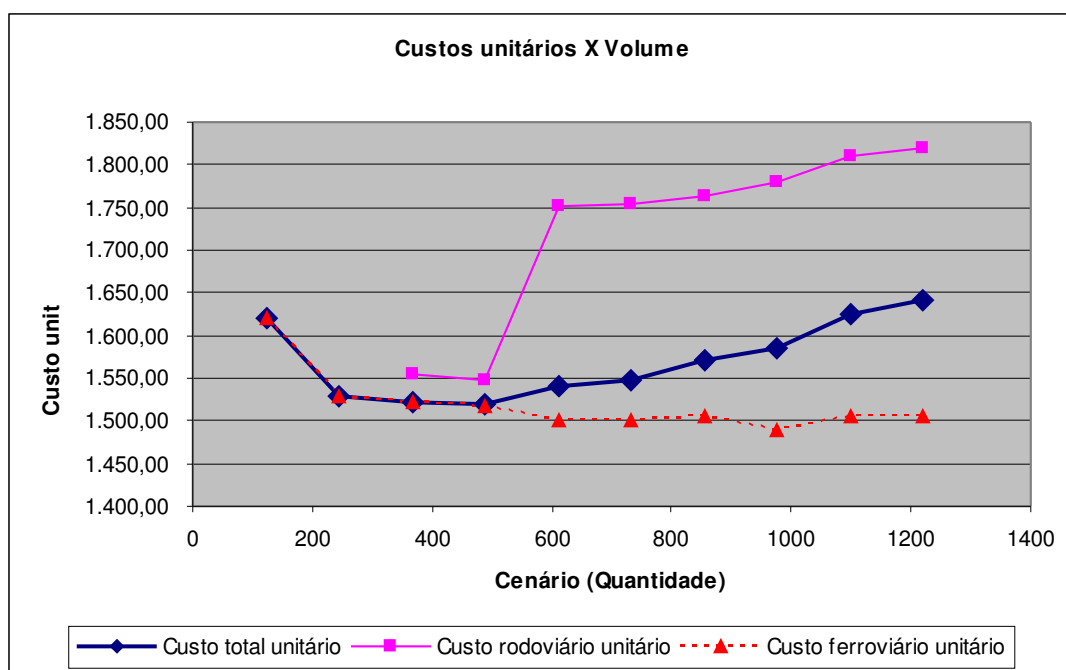


Figura 27: Gráfico de custos unitário versus o número de contêineres. Elaboração própria.

5.2.3 Análise detalhada do cenário 10

Este modelo foi desenvolvido para uma situação em que a demanda pelo serviço ferroviário fosse maior que a oferta. O cenário 10, que tem o maior número de contêineres (1220 unidades), serve então como base para uma análise do modelo nessa situação.

Esperava-se que o modelo apresentasse os seguintes resultados:

- O ICT de Jundiaí continua com uma participação maior em relação ao ICT de Mogi das Cruzes;
- As cargas pesadas são prioritariamente alocadas nos serviços rodo-ferroviários;
- Cargas com origem ou destino em locais mais vantajosos pelos serviços rodo-ferroviários seriam transportadas por esses serviços.

O modelo apresentou resultados de acordo com o que se esperava. O ICT de Jundiaí continua sendo o mais escaldo pelos trens devido ao fato de ter grande demanda naquela região. A Tabela 20 apresenta a participação de cada terminal para o resultado do cenário 10.

Tabela 20: Participação de cada um dos ICT segundo o resultado no modelo para o cenário 10

| | ICT Jundiaí | ICT Mogi das Cruzes |
|------------------------------|-------------|---------------------|
| Número de contêineres | 559 | 136 |
| Participação (%) | 85% | 21% |

As cargas pesadas são alocadas prioritariamente no serviço rodo-ferroviário, pois as tarifas ferroviárias além de serem menores que as do serviço puro rodoviário não são diferenciadas para cargas leves e pesadas. A Figura 28 mostra que a maior parte dos contêineres alocados nos serviços rodo-ferroviário (ambos os ICT) são de contêineres pesados.

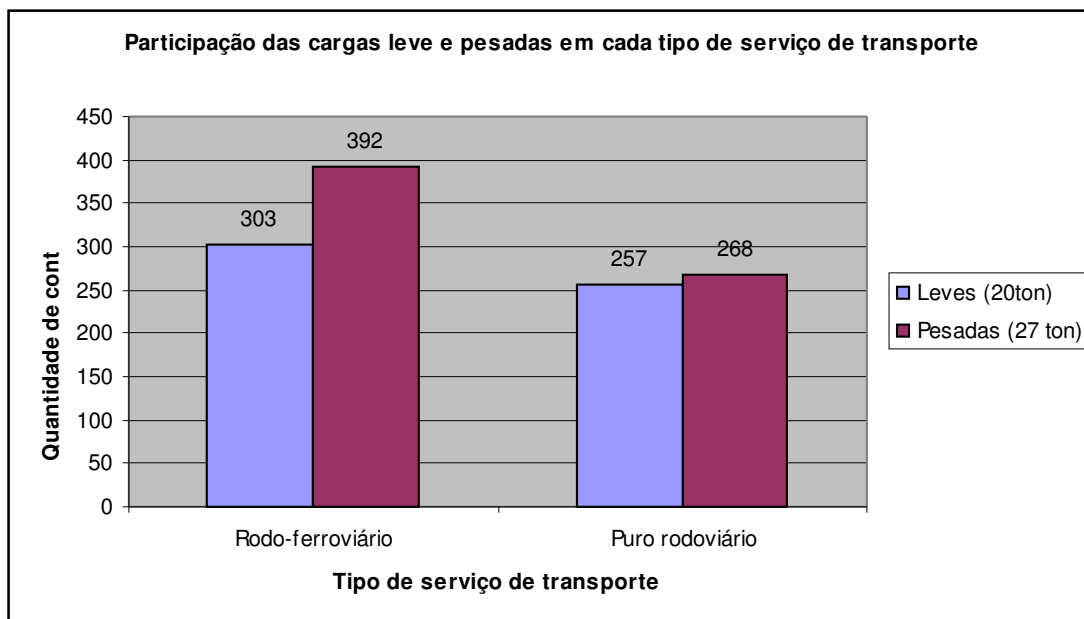


Figura 28: A maior parte dos contêineres transportados pelo serviço rodo-ferroviário eram pesados. *Elaboração própria.*

As cargas com maior diferença de custo entre o terminal com serviço mais barato e o serviço puro rodoviário foram alocadas prioritariamente no serviço rodo-ferroviário. A Figura 29 apresenta que quanto maior é diferença percentual (eixo X), maior é a quantidade de contêineres alocados nos serviços rodo-ferroviários.

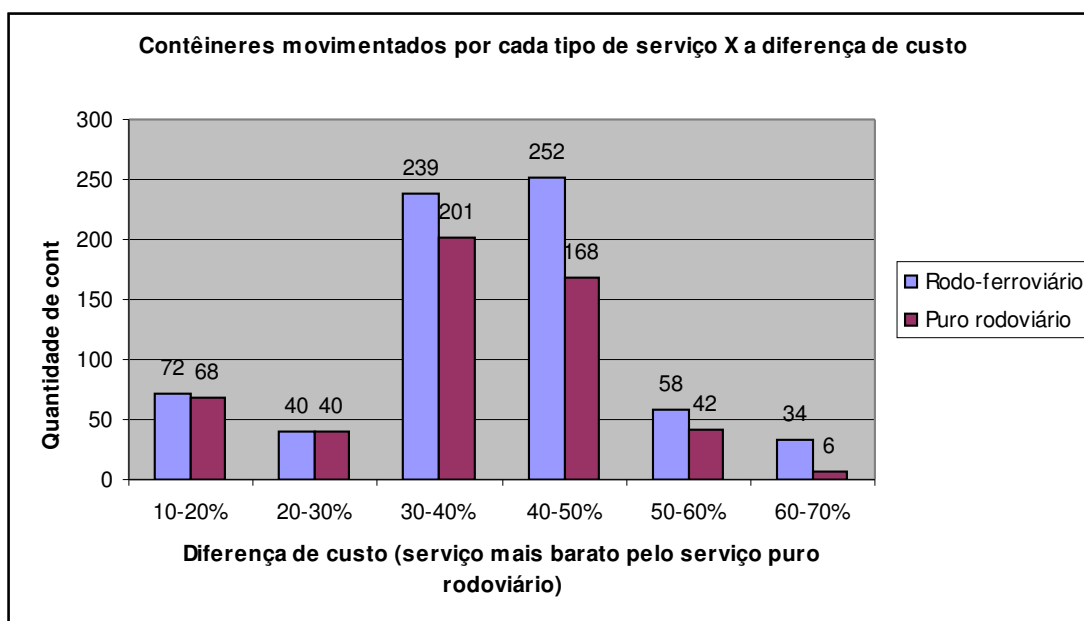


Figura 29: Quanto maior a vantagem pelo uso dos serviços rodo-ferroviários, mais contêineres o modelo aloca para esses serviços. *Elaboração própria.*

5.2.4 Análise de sensibilidade com relação ao desbalanceamento entre coleta e entregas

Espera-se que o desbalanceamento entre coletas e entregas aumente o custo total por que o desbalanceamento faz com que haja necessidade de transporte de contêineres vazios e a ocorrência de penalidades pelo não cumprimento do volume mínimo por composição ferroviária.

A influencia do desbalanceamento sobre custo total foi avaliada em três cenários: 2, 4 e 6. As quantidades de coletas e entregas foram variadas de modo que fosse possível observar o custo total de cada situação de desbalanceamento (100% de entregas, 75%, 50%, 25% e 0%). A Tabela 21 apresenta os resultados do modelo para os três cenários e para cada uma das situações de desbalanceamento.

Tabela 21: Análise do desbalanceamento entre coletas e entregas

| Cenário (quant.) | Porcentagem de entregas com relação ao total | Porcentagem de coletas com relação ao total | Quantidade de contêineres transportados por cada serviço | | | Custo total | Custos de transporte | |
|---------------------|--|---|--|------|------|--------------|----------------------|------------|
| | | | RODO | JUND | MOGI | | Rodoviário | Ferrovário |
| 2 (244) | 100% | 0% | 0 | 168 | 76 | 377.224,00 | 0 | 365.224,00 |
| 2 (244) | 75% | 25% | 0 | 168 | 76 | 374.724,00 | 0 | 365.224,00 |
| 2 (244) | 50% | 50% | 0 | 168 | 76 | 373.324,00 | 0 | 365.224,00 |
| 2 (244) | 25% | 75% | 24 | 168 | 52 | 381.906,00 | 37.311,00 | 331.945,00 |
| 2 (244) | 0% | 100% | 34 | 166 | 44 | 388.146,00 | 52.634,00 | 318.056,00 |
| 4 (488) | 100% | 0% | 82 | 244 | 162 | 761.125,00 | 153.267,00 | 595.858,00 |
| 4 (488) | 75% | 25% | 8 | 328 | 152 | 735.858,00 | 11.664,00 | 719.394,00 |
| 4 (488) | 50% | 50% | 34 | 334 | 120 | 741.014,00 | 52.634,00 | 683.280,00 |
| 4 (488) | 25% | 75% | 144 | 285 | 59 | 773.388,00 | 250.785,00 | 514.883,00 |
| 4 (488) | 0% | 100% | 255 | 193 | 40 | 818.831,00 | 458.568,00 | 342.285,00 |
| 6 (732) | 100% | 0% | 266 | 366 | 100 | 1.215.015,00 | 483.816,00 | 718.991,00 |
| 6 (732) | 75% | 25% | 160 | 350 | 222 | 1.145.614,00 | 290.047,00 | 851.067,00 |
| 6 (732) | 50% | 50% | 136 | 462 | 134 | 1.133.598,00 | 238.566,00 | 890.518,00 |
| 6 (732) | 25% | 75% | 296 | 319 | 117 | 1.198.467,00 | 532.472,00 | 661.495,00 |
| 6 (732) | 0% | 100% | 296 | 319 | 117 | 1.198.467,00 | 532.472,00 | 661.495,00 |

Os custos unitários estão apresentados no gráfico abaixo (Figura 30). As situações com maior desbalanceamento (extremos) apresentam maiores custos unitários e as intermediárias apresentam custos unitários menores.

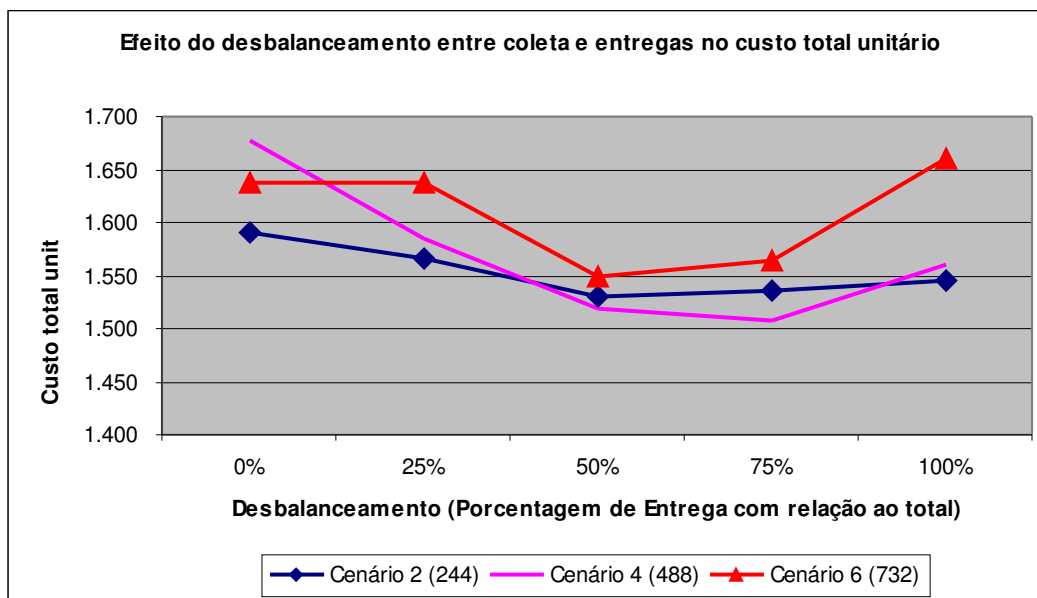


Figura 30: Análise de sensibilidade do custo unitário para cada situação de desbalanceamento entre coletas e entregas. Elaboração própria.

5.2.5 Análise de sensibilidade com relação ao horizonte de programação

Analisou-se também a sensibilidade do custo total para variações no horizonte de programação. A Tabela 22 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 22: Análise dos custos unitários segundo variação no tamanho do horizonte de programação.

| Horizonte de programação ↓ | Cenários (quantidade) | | | | | |
|----------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| | Cenário 5 (610) | Cenário 6 (732) | Cenário 7 (854) | Cenário 8 (976) | Cenário 9 (1098) | Cenário 10 (1220) |
| 4 dias | 1.553,60 | 1.603,16 | - | - | - | - |
| 5 dias | 1.539,02 | 1.569,48 | 1.606,48 | 1.652,19 | - | - |
| 6 dias | 1.538,31 | 1.547,33 | 1.586,12 | 1.614,73 | 1.662,87 | 1.679,99 |
| 7 dias | 1.540,77 | 1.548,63 | 1.570,00 | 1.586,25 | 1.624,47 | 1.640,79 |

Os cenários 1, 2, 3 e 4 apresentaram aumento nos custos totais na medida em que o horizonte foi aumentado. Já os outros cenários (5, 6, 7, 8, 9, e 10) apresentaram redução de custo. Isso pode ser explicado pelo fato de que cenários com poucos contêineres incorrem em muita penalidade pelo não cumprimento dos volumes mínimos por composições ferroviárias. Já os cenários com grande quantidade de contêineres

apresentam redução no custo total em virtude da maior oferta de transporte rodoviário (que é fixa por dia).

A Figura 31 mostra que a utilização de horizontes de programação mais longo em cenários com grande quantidade de contêineres apresenta redução no custo unitário. O uso de horizontes de programação mais longo não é possível baseado na forma como a empresa trabalha hoje, sem um modelo de apoio à decisão como o proposto neste Trabalho.

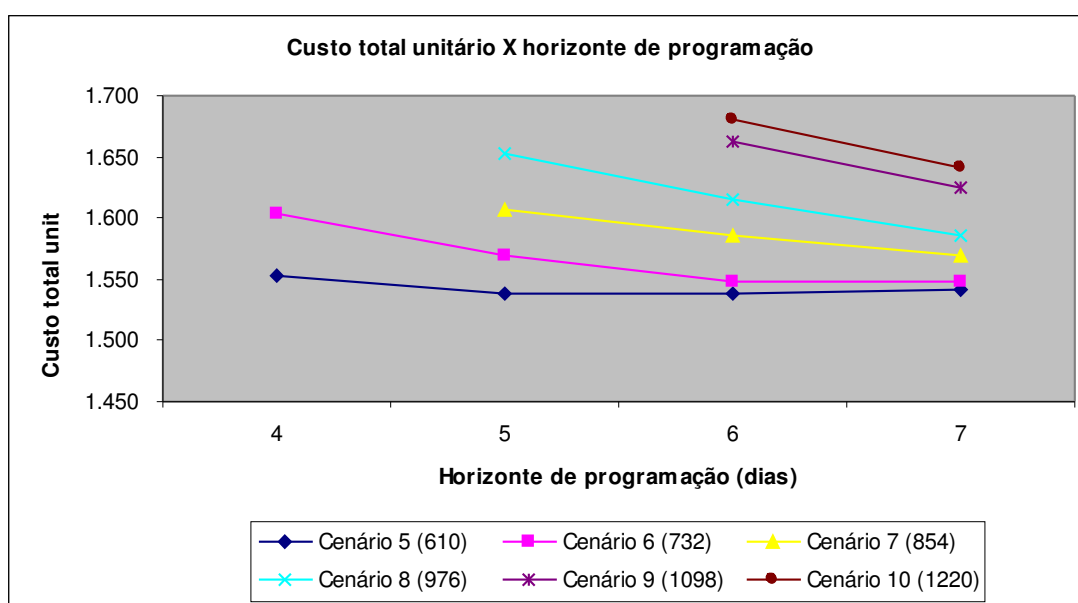


Figura 31: Efeito do tamanho do horizonte de programação sobre o custo total unitário. Elaboração própria.

Neste capítulo foram apresentadas a validação do modelo (que foi comparado a uma situação real) e algumas análises de sensibilidade que mostram o comportamento dele diante de variáveis como o horizonte de programação, o volume de carga (número de contêineres) e o desbalanceamento entre coleta e entregas.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo de apoio à decisão para a programação do transporte multimodal de contêineres no Estado de São Paulo. O foco esteve sempre no transporte ferroviário e nas cargas relacionadas ao serviço de cabotagem oferecido pela empresa.

O objetivo foi atingido, uma vez que um modelo foi desenvolvido e apresentou os resultados esperados. Foi validado num cenário real e apresentou redução no custo total. Também foi executado em diversos outros cenários em que foi possível atestar a qualidade das soluções. Análises de sensibilidade foram feitas por meio da variação de parâmetros importantes como o horizonte de programação, a quantidade de contêineres e o desbalanceamento entre coletas e entregas.

O modelo de apoio à decisão oferece uma alternativa viável ao processo de programação e agendamento que é feito atualmente, pois usa um método exato e rápido de redução dos custos totais.

O modelo se mostrou bastante rápido na solução de problemas grandes, com grande número de contêineres envolvidos. Outra vantagem é o fato de ser fácil inserir ou remover restrições ou modificar a estrutura do mesmo. Por outro lado, quem opera este modelo de apoio à decisão necessita de um treinamento no mesmo por não ter interface amigável e exigir interpretação dos dados. Fatores imprevisíveis que são inerentes ao nível operacional também devem ter um tratamento especial fora do modelo de apoio à decisão.

Do ponto de vista da empresa, a Hamburg Sued, este Trabalho é também uma semente para outros estudos e projetos uma vez que o armador tem diversas operações que a otimização é uma técnica aconselhada. Podem-se citar as seguintes operações: o reposicionamento de contêineres vazios, o planejamento das linhas no transporte marítimo, a localização de terminais, o planejamento do transporte multimodal no médio e longo prazos e outros modelos de apoio à decisão para o transporte multimodal que considerem mais serviços de transporte.

Este Trabalho proporcionou uma oportunidade única para entender mais profundamente as operações da empresa, o transporte marítimo, o transporte multimodal e as interfaces entre cada elo dessa ampla rede de transporte. Além disso, possibilitou um estudo mais aprofundado da literatura relacionada ao assunto e o conhecimento da modelagem matemática no programa GAMS.

7 BIBLIOGRAFIA

ALIANÇA. **Site da empresa**. < <http://www.alianca.com.br>> Acesso em 1 de novembro de 2005.

BARCO, B. L. **A logística do contêiner vazio**. São Paulo: Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998.

Contêineres fazem sucesso em vários modais. Revista Log&Man. Agosto, 2005.

CHURCHMAN, C. W, ACKOFF, R. L., ARNOFF, E. L. **Introduction to Operations Research**. New York: John Wiley and Sons, 1964.

CRAINIC, T.G., LAPORTE G. **Planning models for freight transportation**. European Journal of Operational Research, 1997.

HOUAISS, A. **Dicionário da língua portuguesa**. <<http://houaiss.uol.com.br>>. Acesso em 22 de agosto de 2005.

SALES, A. **O porto-a-porto vira porta-a-porta**. Revista Tecnológica. Novembro de 2004.

SHAPIRO, R. D. **Optimization Models for Planning and Allocation: Text and Cases in Mathematical Programming**. New York: John Wiley and Sons, 1984.

WINSTON, W. L. **Introduction to Mathematical Programming**. Belmont, California: Buxbury Press, 1995.

8 GLOSSÁRIO

Armador é pessoa física ou jurídica que explora comercialmente uma embarcação mercante, sendo ou não seu proprietário (Houaiss, 2005)

Cabotagem é definida como a navegação costeira dentro de um mesmo país.

Desova é o termo usado para descarregamento de um contêiner

Embarcador é como se denomina o cliente que tem uma carga para ser embarcada num navio.

Estufagem é o mesmo que ova.

Longo curso é definição da navegação internacional.

Ova é o termo usado para carregamento de um contêiner.

Peso bruto é o peso do contêiner vazio mais o peso da carga que ele contém.

Ponta rodoviária designa o serviço rodoviário entre o ICT e o local de ova ou desova.

Porta (porta-a-porta) é como se denomina o serviço de transporte marítimo e terrestre do porto ao local de desova ou do local de desova até o porto. Se o transporte terrestre não for contratado então o serviço é chamado de **porto** (porto-a-porto) e significa que o transporte terrestre é de responsabilidade do cliente (embarcador).

Pré-empilhamento é uma tradução livre de **pre-stacking**.

9 ANEXO I - PRINCIPAIS PORTOS DO BRASIL

Os portos escalados pelos serviços de cabotagem da empresa são Manaus (AM), Pecém (CE), Fortaleza (CE), Suape (PE), Salvador (BA), Vitória (ES), Sepetiba (RJ), Santos (SP), Paranaguá (PR), São Francisco do Sul (SC), Itajaí (SC) e Rio Grande (RS). A Figura 32 mostra os principais portos do Brasil.



Figura 32: Principais portos no Brasil. Fonte: Ministério dos transportes.

10 ANEXO II – PRINCIPAIS TIPOS DE CONTÊINERES

| | | | |
|--|--|---|--|
|  <p>IN - Insulated Container Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.694 Largura: 2.273 Altura: 2.121 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.272 Altura: 2.090 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 24.000 Tara: 2.488 Payload: 21.512 Volume (cbm): 28,70</p> |  <p>RF - Integrated Reefer Container Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.558 Largura: 2.300 Altura: 2.345 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.300 Altura: 2.353 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 2.990 Payload: 27.400 Volume (cbm): 30,00</p> |  <p>DC/DV - Dry Cargo Container Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.906 Largura: 2.352 Altura: 2.396 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.338 Altura: 2.283 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 2.300 Payload: 28.180 Volume (cbm): 33,29</p> |  <p>PL - Platform Tamanho: 20'X8'X1 1/4' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 6.055 Largura: 2.435 Altura: 335 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 24.000 Tara: 2.220 Payload: 21.800 Volume (cbm): •</p> |
|  <p>OT - Open Top Container Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.898 Largura: 2.333 Altura: 2.348 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.292 Altura: 2.280 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 2.290 Payload: 28.190 Volume (cbm): 32,31</p> |  <p>VT - Top Vented Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.898 Largura: 2.344 Altura: 2.396 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.338 Altura: 2.273 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 2.300 Payload: 28.180 Volume (cbm): 33,12</p> |  <p>RH - Int. Reefer Highcube Cont. Tamanho: 40'X8'X9' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 11.582 Largura: 2.298 Altura: 2.552 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.288 Altura: 2.490 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 34.800 Tara: 4.780 Payload: 30.100 Volume (cbm): 70,00</p> |  <p>FR - Flat Rack Container Tamanho: 20'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 5.929 Largura: 2.287 Altura: 2.261 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 34.000 Tara: 2.780 Payload: 31.220 Volume (cbm): •</p> |
|  <p>HC - Dry Cargo Highcube Cont. Tamanho: 40'X8'X9' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 12.033 Largura: 2.352 Altura: 2.698 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.340 Altura: 2.586 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 4.060 Payload: 26.420 Volume (cbm): 76,37</p> |  <p>DC/DV - Dry Cargo Container Tamanho: 40'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 12.030 Largura: 2.347 Altura: 2.393 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.338 Altura: 2.283 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 3.780 Payload: 26.700 Volume (cbm): 67,62</p> |  <p>OT - Open Top Container Tamanho: 40'X8'X8' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 12.040 Largura: 2.320 Altura: 2.290 Abertura da Porta (mm): Largura: 2.320 Altura: 1.980 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 30.480 Tara: 4.050 Payload: 26.430 Volume (cbm): 63,97</p> |  <p>PL - Platform Tamanho: 40'X8'X2 7/16' Dimensões Internas (mm): Comprimento: 12.180 Largura: 2.430 Altura: 647 Capacidade de Carga (kg): Bruto: 40.000 Tara: 4.220 Payload: 35.780 Volume (cbm): •</p> |

Figura 33: Principais contêineres da frota da empresa e suas dimensões. Fonte: Hamburg Sued.

11 ANEXO III – TABELA DE DISTÂNCIAS RODOVIÁRIAS

Esta é a tabela de distâncias rodoviárias que permite o cálculo dos custos de transporte rodoviário a partir de cada terminal. Os valores foram obtidos do software *Quatro Rodas Rodoviário*.

Tabela 23: Distância rodoviária em km entre várias cidades e os terminais.

| CIDADE | UF | TERMINAIS | | |
|----------------------|----|-----------|---------|-----------------|
| | | JUNDIAÍ | GUARUJÁ | MOGI DAS CRUZES |
| AGUAS DA PRATA | SP | 187 | 309 | 257 |
| AGUDOS | SP | 249 | 401 | 348 |
| ALUMINIO | SP | 106 | 169 | 119 |
| ALVARES MACHADO | SP | 564 | 650 | 609 |
| AMERICANA | SP | 80 | 208 | 163 |
| AMPARO | SP | 69 | 198 | 155 |
| ANALANDIA | SP | 178 | 305 | 266 |
| ARACARIGUAMA | SP | 80 | 132 | 90 |
| ARACATUBA | SP | 502 | 620 | 563 |
| ARARAQUARA | SP | 227 | 349 | 316 |
| ARARAS | SP | 122 | 234 | 201 |
| ARUJA | SP | 98 | 129 | 5 |
| ATIBAIA | SP | 58 | 143 | 79 |
| AVARE | SP | 253 | 334 | 298 |
| BARRA BONITA | SP | 377 | 384 | 329 |
| BARRETOS | SP | 375 | 517 | 465 |
| BARUERI | SP | 53 | 106 | 68 |
| BATATAIS | SP | 301 | 419 | 389 |
| BAURU | SP | 314 | 407 | 370 |
| BEBEDOURO | SP | 336 | 471 | 424 |
| BERNARDINO DE CAMPOS | SP | 311 | 385 | 356 |
| BOITUVA | SP | 95 | 197 | 159 |
| BOTUCATU | SP | 207 | 309 | 280 |
| BRAGANCA PAULISTA | SP | 68 | 168 | 107 |
| BURI | SP | 254 | 347 | 288 |
| CABREUVA | SP | 42 | 150 | 128 |
| CACAPAVA | SP | 197 | 189 | 96 |
| CAIEIRAS | SP | 44 | 111 | 119 |
| CAJAMAR | SP | 42 | 117 | 74 |
| CAJATI | SP | 288 | 231 | 299 |
| CAMPINAS | SP | 54 | 171 | 136 |
| CAMPO GRANDE | SP | 103 | 87 | 54 |
| CAMPO LIMPO PAULISTA | SP | 20 | 135 | 101 |
| CAMPOS DO JORDAO | SP | 249 | 250 | 140 |
| CAPIVARI | SP | 95 | 225 | 172 |
| CARAPICUIBA | SP | 53 | 101 | 62 |
| CATANDUVA | SP | 342 | 468 | 430 |
| CERQUEIRA CESAR | SP | 276 | 379 | 321 |
| CERQUILHO | SP | 118 | 217 | 176 |
| CONCHAS | SP | 144 | 244 | 214 |

| CIDADE | UF | TERMINAIS | | |
|--------------------------|----|-----------|---------|-----------------|
| | | JUNDIAÍ | GUARUJÁ | MOGI DAS CRUZES |
| CORDEIROPOLIS | SP | 130 | 240 | 208 |
| COSMOPOLIS | SP | 85 | 218 | 167 |
| COTIA | SP | 89 | 107 | 81 |
| CRUZEIRO | SP | 292 | 305 | 183 |
| CUBATAO | SP | 127 | 26 | 94 |
| DESCALVADO | SP | 188 | 323 | 276 |
| DIADEMA | SP | 74 | 71 | 61 |
| DRACENA | SP | 616 | 705 | 677 |
| DUARTINA | SP | 332 | 468 | 401 |
| ELIAS FAUSTO | SP | 70 | 178 | 158 |
| EMBU | SP | 74 | 104 | 76 |
| ENGENHEIRO COELHO | SP | 94 | 234 | 202 |
| ESPIRITO SANTO DO PINHAL | SP | 147 | 268 | 239 |
| ESTIVA GERBI | SP | 127 | 209 | 215 |
| ESTRELA D'OESTE | SP | 532 | 671 | 620 |
| FERNANDOPOLIS | SP | 516 | 659 | 604 |
| FERRAZ DE VASCONCELOS | SP | 88 | 93 | 23 |
| FRANCA | SP | 355 | 487 | 435 |
| FRANCO DA ROCHA | SP | 42 | 122 | 71 |
| GUAPIACU | SP | 397 | 556 | 485 |
| GUARANTIGUETA | SP | 247 | 259 | 138 |
| GUARARAPES | SP | 519 | 635 | 580 |
| GUARAREMA | SP | 144 | 147 | 49 |
| GUARATINGUETA | SP | 247 | 249 | 138 |
| GUARUJA | SP | 141 | 13 | 124 |
| GUARULHOS | SP | 77 | 97 | 30 |
| HOLAMBRA | SP | 95 | 212 | 177 |
| HORTOLANDIA | SP | 72 | 197 | 147 |
| IBATE | SP | 205 | 330 | 293 |
| IBITINGA | SP | 302 | 422 | 393 |
| INDAIATUBA | SP | 57 | 189 | 138 |
| IPERO | SP | 117 | 196 | 159 |
| IPEUNA | SP | 140 | 280 | 239 |
| ITAPECERICA DA SERRA | SP | 77 | 108 | 79 |
| ITAPETININGA | SP | 169 | 249 | 214 |
| ITAPEVA | SP | 290 | 353 | 324 |
| ITAPEVI | SP | 64 | 115 | 75 |
| ITAPIRA | SP | 125 | 256 | 213 |
| ITAPOLIS | SP | 304 | 447 | 392 |
| ITAQUAQUECETUBA | SP | 99 | 112 | 11 |
| ITARARE | SP | 348 | 434 | 382 |
| ITATIBA | SP | 36 | 160 | 120 |
| ITU | SP | 59 | 183 | 142 |
| ITUPEVA | SP | 40 | 161 | 112 |
| JABOTICABAL | SP | 295 | 431 | 381 |
| JACAREI | SP | 146 | 165 | 45 |
| JACI | SP | 424 | 570 | 512 |
| JAGUARIUNA | SP | 84 | 205 | 171 |
| JALES | SP | 545 | 653 | 633 |
| JANDIRA | SP | 60 | 127 | 71 |

| CIDADE | UF | TERMINAIS | | |
|-----------------------|----|-----------|---------|-----------------|
| | | JUNDIAÍ | GUARUJÁ | MOGI DAS CRUZES |
| JAU | SP | 230 | 404 | 338 |
| JOSE BONIFACIO | SP | 439 | 580 | 527 |
| JUNDIAI | SP | 5 | 141 | 98 |
| LARANJAL PAULISTA | SP | 122 | 238 | 193 |
| LAVRINHAS | SP | 276 | 295 | 183 |
| LEME | SP | 148 | 266 | 224 |
| LENCOIS PAULISTA | SP | 253 | 360 | 322 |
| LIMEIRA | SP | 108 | 227 | 195 |
| LINS | SP | 398 | 500 | 473 |
| LINDOIA | SP | 101 | 238 | 172 |
| LORENA | SP | 264 | 271 | 155 |
| LOUVEIRA | SP | 30 | 148 | 108 |
| LUIS ANTONIO | SP | 218 | 340 | 308 |
| MAIRINQUE | SP | 107 | 149 | 112 |
| MAIRIPORA | SP | 57 | 112 | 56 |
| MANDURI | SP | 290 | 375 | 356 |
| MARILIA | SP | 414 | 511 | 475 |
| MATAO | SP | 255 | 391 | 347 |
| MAUA | SP | 84 | 73 | 60 |
| MIRASSOL | SP | 411 | 550 | 499 |
| MOCOCA | SP | 218 | 342 | 311 |
| MOGI DAS CRUZES | SP | 98 | 124 | 13 |
| MOGI-GUACU | SP | 116 | 246 | 204 |
| MOGI-MIRIM | SP | 109 | 236 | 196 |
| MONTE ALEGRE DO SUL | SP | 81 | 219 | 147 |
| MONTE ALTO | SP | 310 | 386 | 398 |
| MONTE AZUL PAULISTA | SP | 353 | 490 | 441 |
| MONTE MOR | SP | 80 | 186 | 175 |
| MORUNGABA | SP | 37 | 173 | 131 |
| NOVA ODESSA | SP | 81 | 198 | 154 |
| NOVO HORIZONTE | SP | 363 | 499 | 451 |
| NUPORANGA | SP | 316 | 456 | 404 |
| OLIMPIA | SP | 388 | 548 | 476 |
| ORLANDIA | SP | 311 | 431 | 398 |
| OSASCO | SP | 68 | 93 | 60 |
| OURINHOS | SP | 379 | 443 | 412 |
| PARAGUACU PAULISTA | SP | 464 | 535 | 509 |
| PAULINIA | SP | 80 | 197 | 151 |
| PEDREIRA | SP | 90 | 208 | 178 |
| PEREIRAS | SP | 143 | 237 | 204 |
| PERUS | SP | 43 | 111 | 68 |
| PINDAMONHANGABA | SP | 217 | 215 | 108 |
| PIRACICABA | SP | 114 | 239 | 193 |
| PIRAPORA DO BOM JESUS | SP | 60 | 124 | 103 |
| PIRASSUNUNGA | SP | 164 | 284 | 245 |
| POA | SP | 109 | 93 | 18 |
| POMPEIA | SP | 443 | 343 | 504 |
| PORTO FERREIRA | SP | 180 | 301 | 265 |
| PRAIA GRANDE | SP | 132 | 14 | 115 |
| PRESIDENTE EPITACIO | SP | 644 | 726 | 689 |

| CIDADE | UF | TERMINAIS | | |
|----------------------------|----|-----------|---------|-----------------|
| | | JUNDIAÍ | GUARUJÁ | MOGI DAS CRUZES |
| PRESIDENTE PRUDENTE | SP | 554 | 624 | 599 |
| PROMISSAO | SP | 430 | 539 | 491 |
| REGISTRO | SP | 236 | 188 | 328 |
| RIBEIRAO PIRES | SP | 94 | 70 | 47 |
| RIBEIRAO PRETO | SP | 273 | 382 | 351 |
| RIO CLARO | SP | 130 | 257 | 222 |
| RIO DAS PEDRAS | SP | 116 | 268 | 204 |
| RIO GRANDE DA SERRA | SP | 99 | 64 | 50 |
| SALTO | SP | 56 | 186 | 149 |
| SALTO DE PIRAPORA | SP | 110 | 190 | 179 |
| SANTA BARBARA D'OESTE | SP | 89 | 220 | 191 |
| SANTA BRANCA | SP | 139 | 169 | 59 |
| SANTA CRUZ DO RIO PARDO | SP | 337 | 419 | 382 |
| SANTA GERTRUDES | SP | 121 | 245 | 216 |
| SANTA ISABEL | SP | 122 | 136 | 18 |
| SANTA RITA DO PASSA QUATRO | SP | 205 | 327 | 285 |
| SANTA ROSA DE VITERBO | SP | 239 | 354 | 317 |
| SANTANA DE PARNAIBA | SP | 77 | 116 | 82 |
| SANTO ANDRE | SP | 87 | 72 | 63 |
| SANTO ANTONIO DE POSSE | SP | 91 | 221 | 179 |
| SANTO ANTONIO DO JARDIM | SP | 164 | 289 | 252 |
| SANTOS | SP | 135 | 20 | 104 |
| SAO BERNARDO DO CAMPO | SP | 86 | 68 | 62 |
| SAO CAETANO DO SUL | SP | 74 | 73 | 50 |
| SAO CARLOS | SP | 190 | 313 | 276 |
| SAO JOAO DA BOA VISTA | SP | 156 | 301 | 259 |
| SAO JOSE DO RIO PARDO | SP | 217 | 341 | 305 |
| SAO JOSE DO RIO PRETO | SP | 396 | 520 | 484 |
| SAO JOSE DOS CAMPOS | SP | 161 | 177 | 60 |
| SAO PAULO | SP | 66 | 90 | 48 |
| SAO ROQUE | SP | 90 | 138 | 103 |
| SAO SEBASTIAO | SP | 260 | 145 | 165 |
| SAO VICENTE | SP | 127 | 12 | 110 |
| SARAPUI | SP | 148 | 209 | 190 |
| SERTAOZINHO | SP | 280 | 418 | 368 |
| SOCORRO | SP | 111 | 203 | 153 |
| SOROCABA | SP | 90 | 167 | 135 |
| SUMARE | SP | 80 | 198 | 150 |
| SUZANO | SP | 96 | 91 | 20 |
| TABOAO DA SERRA | SP | 67 | 88 | 62 |
| TAMBAU | SP | 208 | 334 | 292 |
| TAQUARITINGA | SP | 283 | 411 | 379 |
| TARUMA | SP | 451 | 529 | 496 |
| TATUI | SP | 130 | 222 | 177 |
| TAUBATE | SP | 203 | 211 | 94 |
| TIETE | SP | 115 | 218 | 181 |
| TREMEMBE | SP | 206 | 216 | 97 |
| VALINHOS | SP | 35 | 166 | 121 |
| VALPARAISO | SP | 541 | 641 | 602 |
| VARGEM GRANDE PAULISTA | SP | 84 | 122 | 90 |

| | | TERMINAIS | | |
|-----------------|----|-----------|---------|-----------------|
| CIDADE | UF | JUNDIAÍ | GUARUJÁ | MOGI DAS CRUZES |
| VARZEA PAULISTA | SP | 18 | 134 | 104 |
| VINHEDO | SP | 35 | 162 | 113 |
| VOTORANTIN | SP | 94 | 176 | 140 |
| VOTUPORANGA | SP | 481 | 578 | 569 |
| NOVA CAMPINA | SP | 306 | 377 | 340 |
| PILAR DO SUL | SP | 143 | 222 | 185 |
| URUPES | SP | 376 | 507 | 464 |

12 ANEXO IV – MODELAGEM DO CENARIO DE VALIDAÇÃO NO GAMS

\$Title Trabalho_de_formatura

* OS CONJUNTOS

```
set c CARGA / carga01*carga23/;
set d DIA /0*7/;
set s SERVICO /RODO, JUND, MOGI/;
set sl(s) TERMINAL INTERIOR /JUND, MOGI/;
set t TAMANHO DO CNTR /20pes, 40pes/;
set f FLUXO /COLETA, ENTREGA/;
```

* OS SEGUINTE CONJUNTOS AUXILIAM NA OBTENCAO DOS RELATORIOS

```
set MOV /SOBE, DESCE, SALDO_ICT/;
set CHVZ /CH, VZ/;
set datas datas mais cedo ou tarde para o transporte /CEDO, TARDE/;
```

parameter FLUXO(c) SE A CARGA c DOR DE COLETA 0. SE FOR DE ENTREGA 1
/

```
carga01      0
carga02      0
carga03      0
carga04      0
carga05      0
carga06      0
carga07      0
carga08      0
carga09      1
carga10      1
carga11      0
carga12      0
carga13      1
carga14      0
carga15      0
carga16      1
carga17      1
carga18      1
carga19      1
carga20      1
carga21      0
carga22      1
carga23      1
/;
```

Table CUSTO(c,s) CUSTO TOTAL DE TRANSPORTE DA CARGA c POR CADA UM DOS SERVICOS s
RODO JUND MOGI

| | | | |
|---------|------|------|------|
| carga01 | 1561 | 1083 | 1739 |
| carga02 | 1561 | 1123 | 1780 |
| carga03 | 1561 | 1137 | 1794 |
| carga04 | 1728 | 2013 | 1300 |
| carga05 | 1736 | 1312 | 1920 |
| carga06 | 1728 | 2027 | 1314 |
| carga07 | 1900 | 1473 | 2045 |
| carga08 | 1900 | 1474 | 2047 |
| carga09 | 1355 | 1057 | 1623 |
| carga10 | 1355 | 1060 | 1626 |
| carga11 | 1608 | 1286 | 1837 |
| carga12 | 1499 | 1813 | 1199 |
| carga13 | 1705 | 1373 | 1882 |
| carga14 | 1770 | 1456 | 2035 |
| carga15 | 2012 | 1672 | 2286 |
| carga16 | 1535 | 1321 | 1820 |
| carga17 | 1535 | 1331 | 1830 |
| carga18 | 1535 | 1340 | 1838 |
| carga19 | 1695 | 1490 | 1921 |
| carga20 | 1535 | 1355 | 1854 |
| carga21 | 3260 | 2975 | 3526 |
| carga22 | 2144 | 2634 | 1972 |
| carga23 | 1301 | 1264 | 1459 |

;

parameter VALOR(c) VALOR UNITARIO DA NOTA FISCAL DE CADA CARGA c

```
/
carga01      120000
carga02      120000
carga03      120000
carga04      50000
carga05      50000
carga06      50000
carga07      50000
carga08      50000
carga09      120000
carga10      150000
carga11      50000
carga12      50000
carga13      90000
carga14      50000
carga15      40000
carga16      240000
carga17      120000
carga18      130000
carga19      90000
carga20      120000
carga21      120000
carga22      80000
carga23      150000
/;
```

parameter Q(c) QUANTIDADE DE CNTRS DE CADA CARGA c

```
/
carga01      11
carga02      52
carga03      1
carga04      1
carga05      11
carga06      1
carga07      9
carga08      1
carga09      24
carga10      3
carga11      2
carga12      1
carga13      20
carga14      2
carga15      3
carga16      7
carga17      6
carga18      3
carga19      7
carga20      3
carga21      2
carga22      17
carga23      22
/;
```

parameter TAM(c) TAMANHO EM TEU DOS CNTRS DE CADA CARGA c

```
/
carga01      2
carga02      2
carga03      2
carga04      1
carga05      2
carga06      1
carga07      2
carga08      2
carga09      2
carga10      2
carga11      2
carga12      1
carga13      2
carga14      2
carga15      2
carga16      2
carga17      2
carga18      2
carga19      2
carga20      2
carga21      2
carga22      2
carga23      2
```

```

/;
parameter PESO(c) PESO DE CADA CNTR DA CARGA c
/
carga01      30
carga02      30
carga03      30
carga04      28
carga05      30
carga06      28
carga07      30
carga08      30
carga09      21
carga10      21
carga11      28
carga12      24
carga13      28
carga14      28
carga15      28
carga16      21
carga17      21
carga18      17
carga19      20
carga20      21
carga21      28
carga22      24
carga23      21
/;

```

Table prazo(c,datas) INTERVALO EM QUE O TRANSPORTE PODE SER REALIZADO PELO SERVICO PURO RODOVIARIO

| | CEDO | TARDE |
|---------|------|-------|
| carga01 | 0 | 6 |
| carga02 | 0 | 6 |
| carga03 | 0 | 6 |
| carga04 | 4 | 6 |
| carga05 | 0 | 6 |
| carga06 | 5 | 6 |
| carga07 | 3 | 6 |
| carga08 | 4 | 6 |
| carga09 | 3 | 9 |
| carga10 | 3 | 9 |
| carga11 | 0 | 6 |
| carga12 | 4 | 6 |
| carga13 | 3 | 9 |
| carga14 | 3 | 6 |
| carga15 | 4 | 6 |
| carga16 | 3 | 9 |
| carga17 | 3 | 9 |
| carga18 | 3 | 9 |
| carga19 | 3 | 9 |
| carga20 | 3 | 9 |
| carga21 | 0 | 6 |
| carga22 | 3 | 9 |
| carga23 | 3 | 9 |

```
;
```

```

parameter dia(d) PARAMETRO AUXILIAR - VINCULA O INDICE AO NUMERO CORRESPONDENTE
/
0      0
1      1
2      2
3      3
4      4
5      5
6      6
7      7
/;

```

parameter PRAZORODO(c,d) CRIAR PARAMETRO BINARIO QUE PERMITE O TRANSPORTE PURO RODOVIARIO DE c NO DIA d... 0-SIM 1-NAO;

```

PRAZORODO(c,d) = 0;
PRAZORODO(c,d)$( dia(d) < prazo(c,"CEDO")) = 1;
PRAZORODO(c,d)$( dia(d) > prazo(c,"TARDE")) = 1;

```

parameter PRAZOFERRO(c,d) CRIAR PARAMETRO BINARIO QUE PERMITE O TRANSPORTE FERROVIARIO DE c NO DIA d... 0-SIM 1-NAO;

```

PRAZOFERRO(c,d) = 0;

```

```

PRAZOFERRO(c,d)$ ( dia(d)+1) > prazo(c,"TARDE")) = 1;

parameter TAMVZ(t) TAMANHO EM TEU DOS CNTRS VAZIOS
/
20pes 1
40pes 2
/
;

parameter CUSTOVZ(t) CUSTO AJUSTADO DO TRANSPORTE DOS CNTRS VAZIOS PARA OS TERMINAIS
INTERIORES
/
20pes 76
40pes 114
/;

parameter PESOVZ(t) PESO (OU TARA) DE CADA CNTR VAZIO
/
20pes 3
40pes 4
/;

scalar VALOR_FERROVIA VALOR MAXIMO DAS CARGAS NA FERROVIA DEVIDO APOLICE /
6000000/;
scalar PESO_MAX_FERROV PESO MAXIMO PERMITIDO DA COMPOSICAO FERROV EM TONELADAS /1500/;
scalar MIN_FERROVIA NUMERO DE CNTRS MINIMO POR COMPOSICAO FERROVIARIA /30/;
scalar MAX_FERROVIA NUMERO DE CNTRS MAXIMO POR COMPOSICAO FERROVIARIA /90/;
scalar PENALIDADE POR TEU POR NAO CUMPRIR MINIMO NA FERROVIA /50/;
scalar CAP_TERMINAL NUMERO MAXIMO DE CNTRS QUE UM TERMINAL COMPORTA /400/;
scalar SALDO_INI NUMERO DE CNTRS EM CADA TERMINAL NO DIA 0 /90/;
scalar SALDO_MIN NUMERO DE CNTRS MINIMO CADA TERMINAL /30/;
scalar M NUMERO MUITO GRANDE PARA RESTRICOES BINARIAS /
1000000/;
scalar H HORIZONTE DE PROGRAMACAO EM DIAS /7/;

variable x(c,d,s,f) QUANT DE CNTRS DA CARGA c TRANSP NO DIA d PELO SERVICO
s E FLUXO f;
variable y(t,d,sl,f) QUANT DE CNTRS VAZIOS DO TAMANHO t TRANSP NO DIA d PELO
SERVICO s E FLUXO f;
variable p(d,f) NUMERO DE TEU PENALIZADOS NO DIA d E FLUXO f;
variable BIN(d,sl,f) 1 SE TREM ESCALA O TERMINAL sl NO DIA d E FLUXO F SENAO
0;
variable saldo(sl,t,d) SALDO DE CNTRS VAZIOS DO TAMANHO t NO TERMINAL sl NO
INICIO DO DIA d;
variable subida(sl,t,d) NUMERO DE CNTRS DO TAMANHO t QUE SOBEM A SERRA NO DIA d
PARA O TERMINAL sl;
variable descida(sl,t,d) NUMERO DE CNTRS DO TAMANHO t QUE DESCEM A SERRA NO DIA
d PARA O TERMINAL sl;
variable z CUSTO TOTAL;

integer variable x;
integer variable y;
positive variable saldo;
positive variable subida;
positive variable descida;
positive variable p;
positive variable r;
binary variable BIN;

x.up(c,d,s,f) = Q(c);
y.up(t,d,sl,f) = CAP_TERMINAL;
p.up(d,f) = MIN_FERROVIA;
saldo.up(sl,t,d) = CAP_TERMINAL;
subida.up(sl,t,d) = MAX_FERROVIA;
descida.up(sl,t,d) = MAX_FERROVIA;

equations
r__1(c) FAZ COM QUE TODAS AS CARGAS SEJAM TRANSPORTADAS POR ALGUM SERVICO
r__2(c) SEPARA AS CARGAS DE COLETA DAS DE ENTREGA
r__3(c) SEPARA AS CARGAS DE COLETA DAS DE ENTREGA
r__4(d,f) FAZ COM QUE SOMENTE HAJA UM TREM DE COLETA E UM DE ENTREGA POR DIA
PARA AMBOS OS TERMINAIS
r__5(d,f,sl) FAZ COM QUE O NUMERO DE CNTRS TRANSPORTADOS PARA UM TERMINAL SEJA
NULO SE O TREM NAO ESCALAR ESSE TERMINAL
r__6(d,sl) FAZ COM QUE UM TREM QUE VAI PARA UM TERMINAL VOLTE DESSE TERMINAL
NO DIA SEGUINTE

```

```

r_7          NO PRIMEIRO DIA A COLETA DEVE SER DE JUNDIAI
r_8(d)       NO ULTIMO DIA A ENTREGA DEVE SER DE JUNDIAI

r_9(sl,t,d)  SOMA TODOS OS CNTRS QUE SOBEM A SERRA NUM CERTO DIA
r_10(sl,t,d) SOMA TODOS OS CNTRS QUE DESCEM A SERRA NUM CERTO DIA
r_11(sl,t,d) BALANCO DE MASSA (DE CNTRS) NOS TERMINAIS INTERIORES
r_12(sl,t,d) O NUMERO DE CNTRS QUE DESCEM A SERRA DEVE SER MENOR DO QUE O SALDO
NO COMECO DO DIA
r_13(sl,t,d) O SALDO MAXIMO NOS TERMINAIS DEVE SER INFERIOR AA CAPACIDADE DO
TERMINAL
r_14(sl,t)   DETERMINA O SALDO INICIAL (NO DIA 0) NOS TERMINAIS INTERIORES
r_15(sl,t,d) O SALDO NO ULTIMO DIA DEVE SER IGUAL AO SALDO NO PRIMEIRO DIA

r_16(d,f)    RESTRINGE A CAPACIDADE DE CADA COMPOSICAO FERROVIARIA
r_17(d,f)    GARANTE MOVIMENTACAO MINIMA POR COMPOSICAO FERROVIARIA OU INCIDE
EM PENALIDADE
r_18(d,f)    RESTRINGE O PESO TOTAL DE CADA COMPOSICAO FERROVIARIA

r_19         FAZ COM QUE O PRAZO NO SERVICO PURO RODOVIARIO SEJA RESPEITADO
r_20         FAZ COM QUE O PRAZO NO SERVICO FERROVIARIO PARA JUNDIAI SEJA
RESPEITADO
r_21         FAZ COM QUE O PRAZO NO SERVICO FERROVIARIO PARA MOGI DAS CRUZES
SEJA RESPEITADO

r_22(d,f)    O VALOR TOTAL DAS CARGAS NAO PODE ULTRAPASSAR VALOR_FERROVIA
FO          FUNCAO OBJETIVO QUE MINIMIZA O CUSTO TOTAL

;

r_1(c)..     sum((d,s,f), x(c,d,s,f))                =e= Q(c);

r_2(c)..     sum((d,s), x(c,d,s,'COLETA')*(FLUXO(c) )) =e= 0;
r_3(c)..     sum((d,s), x(c,d,s,'ENTREGA')*(1-FLUXO(c) )) =e= 0;

r_4(d,f)..   BIN(d,'JUND',f)+ BIN(d,'MOGI',f) =e= 1;
r_5(d,f,sl).. M * BIN(d,sl,f)                =g= sum(c, x(c,d,sl,f))
+ sum(t,y(t,d,sl,f));
r_6(d,sl)$( (dia(d) ne H) ).. BIN(d,sl,"ENTREGA") =e=
BIN(d+1,sl,"COLETA");

r_7..        BIN('0',"JUND",'COLETA') =e= 1;
r_8(d)$( (dia(d) eq H) ).. BIN(d,'JUND','ENTREGA') =e= 1;

r_9(sl,t,d).. subida(sl,t,d) =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)),
x(c,d,sl,"ENTREGA")+ y(t,d,sl,"ENTREGA"));
r_10(sl,t,d).. descida(sl,t,d) =e= sum(c$(TAM(c) eq TAMVZ(t)),
x(c,d,sl,"COLETA")+ y(t,d,sl,"COLETA"));
r_11(sl,t,d)$(dia(d) ne H).. saldo(sl,t,d+1) =e= saldo(sl,t,d) + subida(sl,t,d) -
descida(sl,t,d);
r_12(sl,t,d).. descida(sl,t,d) =l= saldo(sl,t,d);
r_13(sl,t,d).. saldo(sl,t,d) =l= CAP_TERMINAL;
r_14(sl,t).. saldo(sl,t,'0') =e= SALDO_INI;
r_15(sl,t,d)$(dia(d) eq H).. saldo(sl,t,d) =g= SALDO_MIN;

r_16(d,f)..   sum((c,sl), x(c,d,sl,f)*TAM(c)) + sum((t,sl),
y(t,d,sl,f)*TAMVZ(t)) =l= MAX_FERROVIA;
r_17(d,f)..   sum((c,sl), x(c,d,sl,f)*TAM(c)) + sum((t,sl),
y(t,d,sl,f)*TAMVZ(t)) + p(d,f) =g= MIN_FERROVIA;
r_18(d,f)..   sum((c,sl), x(c,d,sl,f)*PESO(c))+ sum((t,sl),
y(t,d,sl,f)*PESOVZ(t)) =l= PESO_MAX_FERROV;

r_19..        sum((c,d,f), x(c,d,"RODO",f)*PRAZORODO(c,d) ) =e= 0;
r_20..        sum((c,d,f), x(c,d,"JUND",f)*PRAZOFERRO(c,d) ) =e= 0;
r_21..        sum((c,d,f), x(c,d,"MOGI",f)*PRAZOFERRO(c,d) ) =e= 0;

r_22(d,f)..   sum((c,sl), x(c,d,sl,f)*VALOR(c)) =l= VALOR_FERROVIA;

FO..          z =e= sum((c,d,s,f), x(c,d,s,f)*CUSTO(c,s)) +
sum((t,d,sl,f), y(t,d,sl,f)*CUSTOVZ(t)) +
sum((d,f), p(d,f)*PENALIDADE) ;

option limrow = 1;
option decimals = 0;

Model Trabalho_de_formatura /all/;
solve Trabalho_de_formatura using mip minimizing z;

```

```
option v:0:2:2;  
option total:0:0:3;  
option decisao:0:0:4  
display v.L, total2.L, bin.L, total.l, z_cenario, y.L, p.l, x2 ;
```