Giselle de Moraes Ramos

**ANÁLISE PROSPECTIVA DA
CAPACIDADE DE
PROCESSAMENTO DE CARGAS
PELA FERROVIA NO PORTO DE
SANTOS**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil com ênfase em Transportes.

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Alexandre Widmer

São Carlos
2003

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho
a minha mãe e ao meu pai, por todo amor e confiança,
aos meus irmãos João, Fabíola, Flávia e Alexandre, pela amizade incondicional,
a Bé, por estar sempre presente,
e aos meus sobrinhos queridos Hugo e Gabriel, por alegrarem nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. João Alexandre Widmer pela orientação, amizade e incentivo no desenvolvimento deste trabalho.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo, recurso financeiro indispensável para realização desta pesquisa.

Às Concessionárias Brasil Ferrovias e MRS pelo suporte na coleta de dados e explicações sobre a operação ferroviária.

À todos os professores e funcionários do departamento de Transportes da EESC/USP, pelo apoio oferecido durante todo este tempo.

Aos colegas do departamento de Mecânica da EESC/USP, e ao Prof. Arthur Porto que permitiu o uso do laboratório para o desenvolvimento do meu modelo de simulação.

À todos os colegas e amigos do departamento de Transportes, em especial aqueles que tive um maior contato e tornaram minha estadia em São Carlos muito mais agradável e divertida: Marcela, Andréa, Rogério, Giovane, Giseli, Cira e Karênina.

Às minhas amigas Maia, Neves, Priu, Passos, Line, Paty, Merus e Lu Maria por toda amizade apoio e incentivo.

Aos Tios Elenirce e Geraldo por todo carinho e atenção nos períodos em que estive em São Paulo.

Ao professor Anísio Brasileiro, da Universidade Federal de Pernambuco, por incentivar e despertar meu interesse pela área de transportes.

“Tudo tem a sua ocasião própria, e há tempo para todo propósito debaixo do céu. Há tempo de nascer, e tempo de morrer; tempo de plantar, e tempo de arrancar o que se plantou; tempo de matar, e tempo de curar; tempo de derribar, e tempo de edificar; tempo de chorar, e tempo de rir; tempo de prantear, e tempo de dançar; tempo de espalhar pedras, e tempo de ajuntar pedras; tempo de abraçar, e tempo de abster-se de abraçar; tempo de buscar, e tempo de perder; tempo de guardar, e tempo de deitar fora; tempo de rasgar, e tempo de coser; tempo de estar calado, e tempo de falar; tempo de amar, e tempo de odiar; tempo de guerra, e tempo de paz...” (Ecle. 3, 1-8)

“Perdido é todo tempo que em amor não se gasta” (Tasso)

"Se não houver frutos, valeu a beleza das flores; se não houver flores, valeu a sombra das folhas; se não houver folhas, valeu a intenção da semente" (Henfil)

RESUMO

Ramos, G. M. (2003). *Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos*. São Carlos, 2003. 100p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esta dissertação apresenta uma análise prospectiva da operação ferroviária na Baixada Santista, levando-se em consideração a infra-estrutura atualmente disponível, as características operacionais vigentes e possíveis cenários futuros para um melhor aproveitamento da alternativa ferroviária. O método proposto constou da caracterização da operação ferroviária, identificação das variáveis intervenientes e coleta e análise de dados. A partir daí foi utilizado o *software* de simulação em linguagem ARENA para a construção de um modelo representativo da operação ferroviária, o qual foi validado para as condições operacionais atuais. Com esse modelo, foram gerados cinco cenários alternativos, que levaram em consideração tanto mudanças na operação ferroviária, quanto aumento na demanda de trens por dia. A análise dos resultados mostra que as alterações na configuração operacional, propostas em alguns dos cenários, são viáveis e que o sistema responde de forma satisfatória. Em relação ao incremento na demanda este é viável até certo ponto, a partir do qual a capacidade de alguns recursos compromete a operação de todo o sistema.

Palavras-chave: Operação ferroviária; Simulação; ARENA; Porto de Santos.

ABSTRACT

Ramos, G. M. (2003). *Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos*. São Carlos, 2003. 100 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This research presents a prospective analysis of the railroad operation in the Baixada Santista, considering the currently available infrastructure, the effective operational characteristics and possible future scenarios for a better exploitation of the railroad alternative. The proposed method consisted of the characterization of the railroad operation, identification of the intervening variables and data collection and analysis. The simulation software ARENA was used to construct a representative model of the railroad operation and was validated for current operating conditions. Five alternative scenes were generated considering changes in the railroad operation and increases in the demand of trains per day. The analysis of the results shows that the alterations in the operational configuration in some of the scenes are feasible and the system answers in a satisfactory way. Increments in demand are also feasible up to a certain level where the capacity of some resources compromises the operation of the system.

Keywords: Railroad operation; Simulation; ARENA; Port of Santos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Movimento total anual de cargas do Porto de Santos de 1993 a 2002	03
Figura 1.2: Volume movimentado no Porto de Santos em 2001 por modo de transporte	04
Figura 1.3: Participação da movimentação ferroviária por via de acesso.....	04
Figura 1.4: O Porto de Santos.....	07
Figura 3.1: Acesso ferroviário ao Porto de Santos	21
Figura 3.2: Esquema da malha ferroviária e localização dos pátios na Baixada Santista.....	22
Figura 3.3: Vista do pátio Paratinga no sentido importação.....	24
Figura 3.4: Vista do pátio Paratinga no sentido exportação	24
Figura 3.5: Fluxograma da operação ferroviária da Brasil Ferrovias	25
Figura 3.6: Fluxograma da operação ferroviária na margem direita em bitola estreita	26
Figura 3.7: Fluxograma da operação ferroviária na margem direita via Perequê.....	28
Figura 3.8: Pátio Valongo.....	29
Figura 3.9: Pesagem de vagões no Valongo.....	30
Figura 3.10: Pátio Conceiçãozinha.....	30
Figura 3.11: Fluxograma da operação ferroviária na margem esquerda	31
Figura 3.12: Pátio Paranapiacaba	32
Figura 3.13: Fluxograma da operação ferroviária da MRS	33
Figura 3.14: Locomotivas descendo a Cremalheira.....	34
Figura 3.15: Início da subida na Cremalheira.....	34
Figura 3.16: Ciclo das locomotivas na Cremalheira.....	35
Figura 3.17: Fluxograma da operação ferroviária em direção à Cosipa	36
Figura 3.18: Fluxograma da operação da MRS em direção à margem direita	37

Figura 3.19: Fluxograma da MRS em direção à margem esquerda.....	38
Figura 4.1: Disponibilidade de locomotivas por trecho	40
Figura 4.2: Divisão da malha ferroviária por trechos	42
Figura 4.3: Ajuste de distribuição da quantidade de vagões para Cosipa.....	46
Figura 4.4: Ajuste da distribuição da quantidade de vagões para margem direita em bitola larga.....	46
Figura 4.5: Ajuste da distribuição da quantidade de vagões para margem esquerda	46
Figura 4.6: Ajuste da distribuição do intervalo de tempo entre chegadas sucessivas.....	47
Figura 4.7: Ocupação máxima diária do Perequê em Abril de 2002 considerando as cargas no sentido exportação.....	49
Figura 5.1: Segregação da demanda da Brasil Ferrovias para propósito da simulação	52
Figura 5.2: Segregação da demanda da MRS para propósito da simulação	53
Figura 5.3: Lógica do modelo de geração de trens para a demanda tipo 1.....	55
Figura 5.4: Lógica do modelo de geração de trens para as demandas tipo 2 a 6.....	56
Figura 5.5: Lógica do modelo de ocupação do pátio para todos os tipos de demanda.....	56
Figura 5.6: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada – passo 1	56
Figura 5.7: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada para as demandas tipo 1 e 2 – passo 2	57
Figura 5.8: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada para a demanda tipo 3 – passo 2	57
Figura 5.9: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada – passo 3	58
Figura 5.10: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada– passo 4.....	59
Figura 5.11: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 1	59
Figura 5.12: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 2	60
Figura 5.13: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 3	60
Figura 5.14: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 1	61
Figura 5.15: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 2	62
Figura 5.16: Lógica do modelo para as atividades nos terminais.....	62
Figura 5.17: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 3	62

Figura 5.18: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 1	63
Figura 5.19: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 2	63
Figura 5.20: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 3	64
Figura 5.21: Lógica do modelo para retorno dos vagões – passo 4	64
Figura 5.22: Lógica do modelo para retorno dos vagões – passo 5	65
Figura 6.1: Movimento de vagões em Abril de 2002	68
Figura 6.2: Ocupação máxima do Perequê em Abril de 2002	68
Figura 6.3: Comparação entre valores de ocupação máxima.....	69
Figura 6.4: Ocupação máxima dos demais pátios para Abril de 2002.....	70
Figura 7.1: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 1	73
Figura 7.2: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 1	74
Figura 7.3: Comparação entre a média dos máximos e o máximo atingido na ocupação dos pátios do cenário 1	74
Figura 7.4: Variação na utilização dos trechos – cenário 1	75
Figura 7.5: Variação na utilização de alguns trechos – cenário 1	76
Figura 7.6: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 2	78
Figura 7.7: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 2	78
Figura 7.8: Comparação entre a média dos máximos e o máximo alcançado na ocupação dos pátios – cenário 2	79
Figura 7.9: Variação na utilização dos trechos – cenário 2	79
Figura 7.10: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 3	81
Figura 7.11: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 3	81
Figura 7.12: Comparação entre a média dos máximos e o máximo alcançado na ocupação dos pátios – cenário 3	82
Figura 7.13: Variação na utilização dos trechos – cenário 3	82
Figura 7.14: Variação na ocupação média dos pátios para aumentos de até 20% na demanda cenário 4	84
Figura 7.15: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumentos de até 20 % na demanda - cenário 4	84

Figura 7.16: Variação na utilização dos trechos para aumentos de até 20% na demanda - cenário 4.....	85
Figura 7.17: Variação na ocupação média dos pátios para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4.....	86
Figura 7.18: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4.....	86
Figura 7.19: Variação na utilização dos trechos para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4	87
Figura 7.20: Variação na ocupação média dos pátios pra um aumento na demanda de 10% - cenário 5.....	88
Figura 7.21: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento na demanda de 10% - cenário 5.....	89
Figura 7.22: Variação na utilização dos trechos para um aumento na demanda de 10% - cenário 5.....	89
Figura 7.23: Variação na ocupação média dos pátios pra aumento de 20% na demanda - cenário 5.....	90
Figura 7.24: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento de 20% na demanda - cenário 5.....	91
Figura 7.25: Variação na utilização dos trechos para 20% de aumento na demanda - cenário 5.....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Valor negociado nos cinco principais portos brasileiros em 2001.....	03
Tabela 4.1: Capacidade estática dos pátios da Baixada Santista	39
Tabela 4.2: Capacidade de transporte e cargas transportadas por locomotiva.....	41
Tabela 4.3: Comprimento dos trechos da malha ferroviária da Baixada Santista	42
Tabela 4.4: Quantidade de vagões transportados pela Brasil Ferrovias por destino.....	44
Tabela 4.5: Volume em toneladas úteis por vagão	45
Tabela 4.6: Resultados dos ajustes das distribuições da quantidade de vagões para o mês de Abril de 2002.....	47
Tabela 4.7: Resultado do ajuste da distribuição do intervalo de tempo entre chegadas para o mês de Abril de 2002.....	48
Tabela 4.8: Informações sobre os trens expressos de contêineres	50
Tabela 7.1: Intervalo de tempo entre chegadas para o cenário 4	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTF – Associação Nacional do Transporte Ferroviário.

ARENA – Linguagem de simulação.

BASF – Indústria química.

BF1 – Regime de *track right* da Brasil Ferrovias em bitola estreita para a margem direita do Porto de Santos (Estuário).

BF2 – TM1 – Regime de tráfego mútuo entre a Brasil Ferrovias e a MRS em bitola larga para a margem esquerda do Porto de Santos.

BF2 – TM2 – Regime de tráfego mútuo entre a Brasil Ferrovias e a MRS em bitola larga para a margem direita do Porto de Santos.

BF3 – Regime de *track right* da Brasil Ferrovias em bitola estreita para a margem esquerda do Porto de Santos.

BF4 – Regime de *track right* da FCA para a margem esquerda do Porto de Santos.

Brasil Ferrovias – *Holding* resultante de uma *joint venture* entre Ferronorte, Ferroban, Novoeste e Portofer.

CNAGA – Companhia Nacional de Armazéns Gerais Alfandegados.

CODESP – Companhia Docas do Estado de São Paulo.

Conce – Pátio Conceição.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

EESC – Escola de Engenharia de São Carlos.

EIA/RIMA – Estudo de Impacto Ambiental e Relatório Ambiental.

Estu – Pátio Estuário.

EXPO – Distribuição exponencial.

FCA – Ferrovia Centro Atlântica.

FOB – *Free on board*.

GPSS – *General Purpose Simulation System* – linguagem de simulação.

INPUT ANALYZER – Programa de análise de dados de simulação do *software* ARENA.

ITRI – ITRI Rodoferrovia e Serviços Ltda.

Kolmogorov-Smirnov – Teste de aderência não paramétrico.

MD – Margem Direita do Porto de Santos.

ME – Margem Esquerda do Porto de Santos.

MRS – MRS Logística S.A.

Paran D e R_Serra D – Parte dos pátios Paranapiacaba e Raiz da Serra em que ficam as cargas no sentido exportação.

Paran S e R_Serra S – Parte dos pátios Paranapiacaba e Raiz da Serra em que ficam as cargas no sentido importação.

Parat – Pátio Paratinga.

PDR – Tipo de vagão plataforma.

PDS – Tipo de vagão plataforma.

Pere – Pátio Perequê.

Piaça – Pátio Piaçagüera.

Portofer – Entidade responsável pela movimentação de mercadorias por ferrovia no Porto de Santos.

Qui-Quadrado – Teste de aderência.

RFFSA – Rede Ferroviária Federal.

SLAM – Linguagem de programação por objeto visual.

Tipo 1 – Demandas para Cosipa, para margem esquerda e para margem direita em bitola larga do Porto de Santos.

Tipo 2 – Demanda em bitola estreita para margem direita do Porto de Santos.

Tipo 3 – Demanda de minério para Cosipa.

Tipo 4 – Demanda de contêineres para margem esquerda do Porto de Santos.

Tipo 5 – Demandas de contêineres e vagões vazios para margem direita do Porto de Santos.

Tipo 6 – Demanda de vagões vazios para transporte de laminados da Cosipa.

TKU – Tonelada Quilômetro Transportada.

Trecho 1 – Trecho entre os pátios Paratinga e Perequê

Trecho 2 – Trecho entre o Perequê e a bifurcação para margem direita e esquerda do Porto de Santos.

Trecho 3 – Trecho entre a bifurcação e o pátio Piaçaguera.

Trecho 4 – Trecho entre os pátios Piaçaguera e Ilha Barnabé.

Trecho 5 – Trecho entre o início e o fim do pátio Ilha Barnabé.

Trecho 6 – Trecho entre o fim do pátio Ilha Barnabé e o início do Canal de Bertioiga.

Trecho 7 – Vão sobre o Canal de Bertioiga.

Trecho 8 – Trecho entre o fim do vão sobre Bertioiga e o pátio Conceição.

Trecho 9 – Trecho entre a bifurcação e Cubatão.

Trecho 10 – Trecho entre Cubatão e o pátio Valongo.

Trecho 11 – Trecho entre os pátios Paratinga e Estuário.

Trecho 12 – Trecho entre os pátios Paranapiacaba e Raiz da Serra (Cremalheira)

Trecho 13 – Trecho entre os pátios Raiz da Serra e Piaçaguera.

TRIA – Distribuição triangular.

TU – Tonelada Útil.

UNIF – Distribuição uniforme.

USP – Universidade de São Paulo.

Val – Pátio Valongo.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
1 INTRODUÇÃO	01
1.1 Objetivos.....	05
1.2 Justificativa	05
1.3 Estrutura do Trabalho	06
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	08
2.1 Planejamento do Transporte Ferroviário	08
2.2 Problemas de Movimentação dos Trens.....	10
2.3 Operação Típica nos Pátios Ferroviários de Classificação.....	13
2.4 Operação Portuária.....	14
3 OPERAÇÃO FERROVIÁRIA NA BAIXADA SANTISTA	21
3.1 Descrição da Operação Ferroviária.....	23
3.1.1 Operação Ferroviária da Brasil Ferrovias	23
3.1.2 Operação Ferroviária da MRS	32
4 ESTUDO DE CASO	39
4.1 Caracterização dos Recursos Disponíveis	39
4.1.1 Pátios.....	39
4.1.2 Locomotivas.....	40
4.1.3 Linha Férrea.....	41
4.2 Caracterização da Demanda	43
4.2.1 Demanda da Brasil Ferrovias.....	43
4.2.1.1 Análise dos dados da Brasil Ferrovias.....	46
4.2.2 Demanda da MRS.....	49

5	MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO	51
5.1	Lógica do Modelo	54
5.1.1	Sentido Exportação	54
5.1.1.1	Geração de trens e ocupação dos pátios de entrada.....	54
5.1.1.2	Ocupação dos pátios intermediários	59
5.1.1.3	Ocupação dos pátios terminais	60
5.1.2	Sentido Importação	63
6	VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ATUAIS.....	66
6.1	Análise dos Resultados	67
6.1.1	Quantidade de Vagões	67
6.1.2	Ocupação Máxima do Pátio Perequê	68
7	GERAÇÃO DE RESULTADOS PARA CENÁRIOS ALTERNATIVOS	71
7.1	Cenário 1	72
7.2	Cenário 2	76
7.3	Cenário 3	80
7.4	Cenário 4	83
7.5	Cenário 5	88
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	93
8.1	Recomendações.....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	96
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	99

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 50 anos, o transporte ferroviário no Brasil vem enfrentando problemas estruturais e conjunturais decorrentes do processo histórico de construção das ferrovias. Segundo informações da Associação Nacional do Transporte Ferroviário (ANTF), a atual estrutura férrea do país data de meados do século XIX e início do século XX, quando o Brasil era basicamente exportador de produtos agrícolas, e as condições em que se encontram são bastante precárias.

Em geral, o traçado da malha é 30% mais longo que o das rodovias; a velocidade média dos trens é de apenas 23 km/hora, em contrapartida com os 80 km/hora dos trens americanos. Um outro problema que agrava a situação é a falta de terminais modernos para armazenar e distribuir produtos com rapidez, segurança e agilidade, trazendo como consequência uma baixa produtividade das ferrovias locais, e tornando o custo dos nossos produtos ainda mais elevados, o que vem sendo uma barreira para o setor exportador brasileiro.

No entanto não é só a malha que é antiga e inadequada, como também em muitos trechos atravessam áreas habitadas ou invadidas, limitando ainda mais a velocidade dos trens e induzindo acidentes. Este conjunto de fatores reduz significativamente a produtividade das ferrovias nacionais, que chegam a atingir apenas 30% da produtividade das americanas [<http://www.antf.org.br>].

Apesar de todos os problemas enfrentados pelas ferrovias, a viabilidade econômica do transporte ferroviário em relação ao rodoviário para grandes distâncias é ressaltada e comprovada em diversos estudos.

De acordo com DAGANZO *et al* [1983], as ferrovias apresentam uma vantagem distinta em relação aos outros modos de transporte em termos de eficiência de

combustível e custos de mão de obra uma vez que poucos empregados são necessários para operar um trem em contrapartida a uma frota de caminhões. No entanto, o que se observa é que devido ao sistema de rodovias interestaduais, o transporte rodoviário por caminhão tem obtido uma substancial vantagem sobre o transporte ferroviário em termos de tempo de viagem e confiabilidade.

Hoje, na matriz de transporte do Brasil, os caminhões respondem por 60% do total de TKU transportadas e apenas 20% estão com as ferrovias. No mercado de carga geral, representado pelo transporte de produtos e insumos industrializados, a participação das ferrovias é de apenas 7%, contra 91% da modalidade rodoviária.

Este trabalho trata de forma específica a malha ferroviária da Baixada Santista, uma vez que o Porto de Santos é o maior porto de importação e exportação do Brasil e por isso merecendo uma investigação específica da capacidade de absorção do modal ferroviário, visto que um grande volume dos produtos movimentados neste terminal têm característica compatíveis com o transporte ferroviário.

A história do Porto de Santos tem início em 1550 com a instalação da alfândega, porém por mais de três séculos e meio seu crescimento manteve padrões estáveis, com o mínimo de mecanização e muita exigência de trabalho físico. Além disso, as condições de higiene e salubridade do porto e da cidade de Santos resultaram altamente comprometidas, propiciando o aparecimento de doenças de caráter epidêmico.

Somente a partir de 1845 registra-se o primeiro grande embarque de café para a Europa (excluindo-se Portugal) proveniente do desenvolvimento da cultura cafeeira nas terras paulistas. No entanto, apenas em 2 de fevereiro de 1892 é que o Porto de Santos foi oficialmente inaugurado, quando a então Companhia Docas de Santos entregou à navegação mundial os primeiros 260 metros de cais na área do Valongo, sendo a data marcada pela chegada do vapor "Nasmith", de bandeira inglesa [http://www.geocities.com/ferrovias_brasil/cds-historia.htm].

De acordo com informações do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT), as estradas de ferro em São Paulo foram decorrência natural das exportações agrícolas, sendo sua construção iniciada após a primeira metade do século XIX formando uma verdadeira rede de captação do café em direção ao Porto de Santos.

Em 1867 deu-se início a operação da ferrovia São Paulo Railway, que estabelecia a ligação ferroviária da Baixada Santista ao Planalto Paulista, melhorando substancialmente o sistema de transportes, e causando um grande incremento na movimentação do Porto de Santos, cujo crescimento havia mantido-se lento até então [www.dnit.gov.br].

A partir de sua inauguração oficial, em 1892, o porto foi passando por diversas fases de modernização até chegar aos dias atuais, situando-se entre os cinco mais importantes portos brasileiros. Atualmente, o Porto de Santos, ilustrado na Figura 1.4, movimenta mais de 45 milhões de toneladas de carga por ano, e de acordo com dados da Secretaria de Comércio Exterior – Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio, o volume movimentado em 2001 correspondeu a um quarto do valor dos produtos negociados pelo país no mercado internacional (US\$ 110,8 bilhões) conforme mostrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1: Valor negociado nos cinco principais portos brasileiros em 2001

Porto	Bilhões US\$ (*)
Santos	27,8
Paranaguá	8,4
Vitória	8,1
Rio de Janeiro	6,0
Rio Grande	4,4

(*) - Valor FOB (free on board)

Fonte: Secretaria de Comércio Exterior - Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio

<<http://www.portodesantos.com.br>>. Acessado em: 21 de fev. 2003.

De acordo com estatísticas da Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP) do ano de 1993 em diante, verifica-se o crescimento do volume movimentado a uma taxa média de 7% ao ano (Figura 1.1).

Figura 1.1: Movimento total anual de cargas do Porto de Santos de 1993 a 2002

Utilizando dados relativos à movimentação do ano de 2001, constata-se que do total de 48.161.593 toneladas, apenas 6.790.342 foi via ferrovia como mostrado na Figura 1.2. Ainda de acordo com os dados de 2001, verifica-se que aproximadamente 90% do volume movimentado por ferrovia teve acesso ao Porto de Santos através do ramal Mairinque Santos, sob concessão da Brasil Ferrovias, e os 10% restantes via Cremalheira, sob Concessão da MRS, sendo ambos acessos explicados em maior detalhe no capítulo 3.

Figura 1.2: Volume movimentado no Porto de Santos em 2001 por modo de transporte

Adicionalmente ao volume acima referenciado, existe uma demanda média de 350.000 t/mês de minério para a Cosipa, que corresponde a aproximadamente 4.200.000 t/ano, que têm acesso ao sistema da Baixada Santista via sistema Cremalheira e que, por não entrarem no Porto de Santos, não estão contabilizadas naquele valor.

Desta forma, a distribuição das cargas para Baixada Santista pode ser separada em dois grupos de acordo com sua via de acesso: Ramal Mairinque-Santos e Cremalheira.

As participações médias no transporte ferroviário por cada um desses acessos são apresentadas na Figura 1.3.

Figura 1.3: Participação da movimentação ferroviária por via de acesso

Atualmente, a demanda de minério responde por mais da metade do tempo de ocupação da Cremalheira, a qual, por ter uma taxa de utilização bastante elevada, é considerada um grande gargalo ao aumento da demanda. No entanto, está prevista a construção de um sistema de correias transportadoras para o transporte do minério, o que traria como consequência uma ampliação da oferta de capacidade de transporte de cargas para o Porto de Santos pela ferrovia. Com a construção desse sistema, um volume correspondente de cargas poderia ser transportado para o Porto e teríamos um aumento da participação de cargas por ferrovia para o Porto de Santos de 14% para 21%. Isto sem considerar o potencial de expansão da capacidade de processamento do sistema operado pela Brasil Ferrovias com linha dupla.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo uma análise prospectiva da operação ferroviária na Baixada Santista, levando-se em consideração a infra-estrutura atualmente disponível, as características operacionais vigentes e possíveis cenários futuros para um melhor aproveitamento da alternativa ferroviária.

1.2 Justificativa

Para o processamento de produtos pelo modo ferroviário, é necessário que o porto possua uma interface ajustada às necessidades desse modal em termos de equipamentos de movimentação, pátios de manobra e estocagem de vagões cheios e vazios, e uma rede compatível com a capacidade de tráfego das ferrovias de acesso ao porto.

De acordo com o panorama apresentado sobre a situação da ferrovia no Brasil, e especificamente no Porto de Santos, verifica-se que esse modal vem sendo muito pouco explorado e que existe uma grande preferência pelo modo rodoviário.

Surgiu, então, a motivação de se estudar a operação ferroviária na Baixada Santista com o propósito de investigar a capacidade desse modal, ou seja, verificar se o sistema já está saturado, ou se existem folgas para um possível aumento de demanda, uma vez constatado que atualmente o modal ferroviário contribui apenas com uma pequena parcela do total movimentado.

Com a realização de uma análise prospectiva da capacidade de processamento de vagões, será possível investigar o comportamento do sistema frente a um aumento de demanda, e a cenários operacionais alternativos, e avaliar até que ponto tais alterações seriam viáveis considerando-se a capacidade atualmente instalada do Porto de Santos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em 8 capítulos. O capítulo 1 contém a introdução, em que são apresentados um breve panorama sobre a situação da ferrovia no Brasil e história do Porto de Santos, assim como o objetivo e a justificativa desta pesquisa.

O capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica sobre o planejamento ferroviário e os problemas encontrados na movimentação dos trens, bem como sobre as abordagens que vêm sendo utilizadas para estudar a operação portuária.

Nos capítulos 3 e 4 é apresentada uma descrição da operação ferroviária na Baixada Santista e dos recursos envolvidos no processo.

O capítulo 5 apresenta a lógica do modelo de simulação que foi utilizado para alcançar o objetivo proposto.

No capítulo 6 valida-se o modelo proposto para as condições operacionais atuais, e no capítulo 7 são gerados cenários alternativos e analisados os resultados de cada um deles.

As conclusões encontradas com o desenvolvimento da pesquisa e as recomendações para o incremento de pesquisas futuras compõem o conteúdo do capítulo 8.

Figura 1.4: O Porto de Santos

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica realizada permitiu constatar a existência de diversos estudos relacionados ao dimensionamento e análise operacional dos sistemas portuários no Brasil e no exterior. No entanto, a grande maioria está voltada para o dimensionamento dos terminais e do número de berços de atracação compatível com uma demanda esperada de embarcações, e enfocam a operação portuária sob a ótica da chegada dos navios. Em relação à ferrovia, encontramos diversos trabalhos que tratam especificamente da operação nos pátios ferroviários de classificação e dos problemas de despacho ou circulação de trens.

Entretanto, observa-se que há pouco material disponível sobre a operação portuária enfocando o acesso terrestre e, principalmente, a interface ferroviária. Ou seja, os temas têm sido tratados de forma independente, ora estudando a operação ferroviária, ora a portuária, não havendo conexão entre os temas.

Dessa forma a revisão bibliográfica está focada nas operações ferroviária e portuária. São apresentados trabalhos que tratam da operação e dimensionamento de terminais portuários, através de modelos de simulação ou modelos analíticos, e também trabalhos relacionados com os problemas de movimentação dos trens.

2.1 Planejamento do Transporte Ferroviário

Os problemas relacionados ao planejamento do transporte sobre trilhos podem ser agrupados em algumas classes. Usualmente representa-se esse sistema como uma rede cujos nós representam pátios ou estações, e cujos arcos representam as linhas de trilho sobre as quais os trens transportam passageiros ou carga. Pode-se então distinguir entre

os problemas que envolvem apenas um nó, problemas que envolvem apenas um arco da rede e problemas globais envolvendo entidades múltiplas da rede.

Esses problemas também podem ser classificados em categorias de acordo com o horizonte de planejamento considerado. No nível estratégico, o interesse estaria na aquisição ou construção de recursos duráveis que irão permanecer em atividade após um longo período de tempo. O nível tático relacionaria assuntos de médio e curto prazo, geralmente envolvendo a especificação de políticas de operação, e finalmente, teríamos o nível operacional, responsável pelas tarefas desempenhadas diariamente e que levam em consideração os detalhes do sistema.

A demanda por transporte de carga é usualmente expressa em termos da tonelagem dos produtos transportados de uma origem para um destino, e uma vez estabelecida esta demanda, um conjunto de políticas operacionais que governem o roteamento de trens e cargas deve ser definido.

Para cada par origem-destino de demanda de tráfego, a carga correspondente pode ser transportada direta ou indiretamente. Quando a demanda é importante o bastante, os atrasos na entrega são obviamente minimizados usando trens diretos ao invés de fazê-lo através de uma seqüência de ligações. No entanto, quando a demanda não garante o despacho de trens diretos, os atrasos são inevitáveis. Dessa forma, ou o tráfego é consolidado e roteado através de nós intermediários, ou os vagões têm que esperar no nó de origem até que suficiente tonelagem tenha sido acumulada.

Para se beneficiar com a economia de escala, freqüentemente formam-se trens agrupando vagões que transportam diferentes produtos e onde conjuntos de vagões têm origens e destinos diferentes. Estes trens são formados em nós particulares da rede, chamados pátios de classificação. Nesses pátios, os carros são separados, ordenados de acordo com seu destino final e combinados para formar um novo trem de partida (*outbound train*).

Uma vez que o processo de classificação envolve uma quantidade de recursos considerável, os vagões não são reclassificados em todo pátio por onde passam durante a viagem da origem para o destino. O que ocorre é o agrupamento em blocos de vagões que têm diferentes destinos finais, mas que compartilham uma parcela inicial da viagem. Os vagões pertencentes a um mesmo bloco podem passar por uma série de

pátios de classificação intermediários, sendo separados e reclassificados apenas após o bloco ter alcançado o seu destino.

2.2 Problemas de Movimentação dos Trens

O sistema de transporte ferroviário é formado por estações conectadas por linhas com trilhos, trens compostos por unidades de transporte menores (vagões), e veículos de tração e locomotivas. Através do movimento na rede ferroviária, os trens conectam estações individuais, transportando passageiros e cargas.

Segundo SAAD [1999], a movimentação dos trens tem sido tópico de considerável análise nas últimas décadas, sendo os principais objetivos a avaliação do desempenho dos trens e da capacidade da linha, a avaliação de diferentes instalações no trecho e avaliação dos procedimentos e regras de despacho.

Por mais de um século o despacho dos trens tem sido feito manualmente, usando diagramas espaço-tempo, e de acordo com o processo tradicional, a rede é decomposta em um conjunto de corredores ferroviários, cada um deles consistindo de um conjunto de linhas conectando uma sequência de estações.

Dessa forma., os serviços de despacho são encarregados de checar e eliminar qualquer tipo de conflito causado por trens muito próximos no espaço e no tempo, e também controlar o movimento dos trens e regular o tráfego, seguindo regras obrigatórias para alocar trens para um determinado espaço, ou seja, apenas um trem pode ocupar uma determinada secção em um determinado intervalo de tempo da programação.

De acordo com CAREY e LOCKWOOD [1995], o despacho de trens é o problema de alocar trens para linhas disponíveis em uma rede ferroviárias (linhas, plataformas, etc.) de modo a minimizar o atraso e os custos decorrentes dos mesmos, satisfazer a demanda, e garantir que todos os trens em todas as linhas e em todas as estações satisfaçam as condições de espaçamento (*headway*) necessárias, com tempo suficiente para atravessar os trechos, esperar em estações, etc.

A simulação computacional vem sendo usada para estudar o movimento e operação dos trens. Os programas geralmente simulam e testam a operação de

determinados horários e programações, em detrimento do planejamento ou criação de uma nova programação de horários para os trens. Modelos de programação matemática também têm sido desenvolvidos para gerar soluções ótimas, ou soluções boas e viáveis para o problema de despacho dos trens, dando enfoque ao problema “encontro-passagem”, no qual trens viajando em direções opostas têm que se encontrar ou ultrapassar em desvios localizados ao longo de uma linha singela.

Os problemas de determinação das capacidades última e prática de uma linha singela têm sido um importante tópico de pesquisa nos últimos 30 anos.

Segundo JANIC [1984; 1988], modelos de tráfego em linha singela baseiam-se na teoria das filas e consideram que a linha ferroviária, ou um trecho dela, representa um servidor a ser ocupado por um trem, sendo o tempo de processamento função do comprimento e da velocidade média do trem no trecho. Em condições ideais de utilização, a capacidade da linha poderia ser expressa pelo número máximo de trens que poderiam ocupá-la em determinado intervalo de tempo. Nesse caso, os atrasos não são considerados e a capacidade é chamada de capacidade última (*ultimate capacity*).

No caso de tráfego nos dois sentidos de uma linha singela, devido aos encontros e ultrapassagens, os trens devem esperar em desvios ao longo da linha respeitando as regras de prioridade: trens com menor prioridade esperam a passagem dos de maior prioridade. Essas esperas contribuem para o aumento no tempo médio de ocupação da linha entre pátios de origem e destino. Quando trens de diferentes categorias passam em uma mesma linha é possível calcular, para cada categoria, o tempo médio de ocupação desta, incluindo os atrasos. Uma vez que esses atrasos são levados em consideração, é possível estimar a capacidade prática, ou seja, o número de trens que é permitido passar na linha entre os pátios de origem e destino, considerando-se os atrasos.

PETERSEN [1974] desenvolveu um modelo para quantificar os atrasos resultantes de cruzamentos e encontros de trens em estações intermediárias ao longo de uma linha singela. O modelo é aplicável nos casos em que a intensidade de tráfego nas linhas é relativamente baixa e quando são dadas diferentes prioridades a trens de categorias particulares.

ASSAD [1980] apresenta um panorama descritivo de um conjunto de modelos que tratam de problemas relacionados às capacidades última e prática de uma linha

singela. Ele dividiu os modelos em 2 grupos: no primeiro estão os modelos que analisam apenas os atrasos devido aos cruzamentos e encontros que não estavam previstos, e no segundo estão os modelos relacionados aos atrasos que ocorrem como consequência da necessidade mútua dos trens em demandar serviço para um segmento gargalo de uma linha singela.

Na operação dos trens em linhas singelas existem pontos específicos para a ultrapassagem ou cruzamento dos trens, conseqüentemente a confiabilidade dos tempos de trânsito é função de uma série de fatores. O grau de folga na programação, o número de posições de conflito dos trens, a prioridade de cada trem, o congestionamento nos terminais, a quantidade e natureza das paradas programadas e a velocidade dos trens são variáveis bastante influentes.

Para HIGGINS *et al* [1995], a confiabilidade de toda a programação é uma medida do provável desempenho em termos da aderência à programação, sendo este conceito importante tanto para o serviço ferroviário de passageiros urbanos e não urbanos, quanto para o transporte ferroviário de cargas, uma vez que é uma medida de desempenho crítica para todo o mercado ferroviário.

Uma programação feita para minimizar o custo operacional total não é necessariamente a programação ótima do ponto de vista de benefício total para a rede, sendo este o caso particular quando a programação é facilmente alterada devido a pequenos atrasos em trens individuais. Ocorre que se uma programação é instável, os trens correm o risco de sofrerem grandes atrasos se um evento inesperado ocorrer.

Um exemplo de instabilidade em linhas singelas é o caso em que o número de desvios para ultrapassagem ou cruzamento dos trens é suficiente apenas para satisfazer a demanda planejada. Quando um trem sofre algum problema (devido a avarias, problemas climáticos ou manutenção dos trilhos), atrasos consideráveis podem ocorrer no sistema por duas razões:

- A programação é muito apertada e os atrasos devidos a um trem irão causar atrasos nos outros trens;
- Devido à existência de poucos desvios (eles podem estar bem afastados uns dos outros).

Os atrasos maiores são decorrentes de grande distância entre desvios, e também da existência da concentração de muitos desvios em um determinado trecho da via. Em ambos os casos, os riscos de atrasos são grandes devido a uma parte da via apresentar grandes distâncias entre desvios.

O risco é mínimo quando os desvios são igualmente espaçados, uma vez que os conflitos estarão uniformemente distribuídos.

Os principais atrasos são devido a três fatores:

- Atrasos relacionados aos trechos (trilhos): redução de velocidade ou paralisação da operação em algum trecho. Falhas nos sinais e obstáculos nos trilhos são exemplos;
- Atrasos devido aos trens: falhas nas locomotivas;
- Atrasos programados: paradas programadas nas estações de origem. É o exemplo de carga e descarga, conexão dos trens, e abastecimento das locomotivas entre outros.

2.3 Operação Típica nos Pátios Ferroviários de Classificação

As políticas de pátio dizem respeito às atividades a serem desempenhadas nos pátios de uma rede ferroviária e, mais precisamente indicam como os trens que entram em cada pátio devem ser inspecionados e separados, e como os vagões devem ser classificados e reunidos nos blocos que irão formar novos trens de partida [CORDEAU e VIGO, 1998].

Um vagão chega aos trilhos dos pátios de classificação como parte de um *inbound train* e os operadores dos pátios então inspecionam o trem para checar sua consistência e as condições operacionais de cada vagão. Em seguida esses trens ou blocos entram em fila nos trilhos receptores até que sejam classificados ou ordenados.

Dois tipos de pátio de classificação são de uso comum: pátios planos (*flat yards*) e com desnível (*hump yards*). Nos pátios planos a operação de classificação é desempenhada por máquinas, enquanto que nos com desnível esse trabalho é realizado

pela ação da gravidade: os carros desatracados do trem são empurrados do alto de um elevado e então rolam para o trilho de classificação apropriado.

As operações realizadas nos pátios podem ser agrupadas em cinco atividades:

1. Recebimento do trem e inspeção de entrada;
2. Classificação ou ordenamento;
3. Espera para conexão;
4. Ordenação ou classificação do trem;
5. Inspeção de saída e partida do trem.

De acordo com PETERSEN [1977a] e TURNQUIST e DASKIN [1982], significantes atrasos em fila são encontrados tanto nas operações de classificação e ordenação, quanto nos tempos para conexão com o trem de partida. As operações de recebimento, inspeção e partida, em geral, não são consideradas gargalos operacionais visto que mais equipes de pátio podem ser facilmente adicionadas.

Devido à natureza das operações ferroviárias, os vagões passam grande parte do seu tempo em pátios de classificação e, de acordo com a bibliografia consultada, esse valor varia em média de 60% a 80% do tempo total de viagem. Conseqüentemente, a otimização das atividades e a redução do tempo médio de permanência nos pátios, trariam significativas melhoras à qualidade do serviço que as ferrovias estão aptas a fornecer [PETERSEN, 1977b; TURNQUIST e DASKIN, 1982; HE *et al*, 2000]

Embora as operações de classificação sejam largamente difundidas, e exista uma vasta literatura sobre o assunto, PETERSEN [1977a,b], TURNQUIST e DASKIN [1982], DAGANZO *et al* [1983], DAGANZO [1987 a,b] CORDEAU e VIGO [1998], nos pátios localizados na Baixada Santista esse tipo de atividade não é realizado, uma vez que os trens já vêm formados de pátios anteriores. Dessa forma, esses procedimentos não fazem parte desta pesquisa.

2.4 Operação Portuária

TONDO [1984], em sua dissertação de mestrado, tratou da análise operacional do terminal de contêineres do Porto de Santos através do modelo de simulação estocástica na linguagem GPSS (General Purpose Simulation System).

Como subsistemas para esse modelo foram adotados: atracação de navios, descarregamento de contêineres dos navios, atendimento dos veículos que deixam ou retiram carga do terminal e o pátio de contêineres com sua limitação de espaço. A partir daí foram determinadas as taxas de chegada e atendimento para cada uma das etapas envolvidas no processo, com posterior simulação da evolução da demanda de movimentações.

Como resultado dessa simulação, foram determinados os tipos e números adequados de equipamentos para estiva e movimentação de contêineres, os números de berços de atracação necessários e a adequabilidade da integração do terminal com o sistema de transporte complementar. Dessa forma, seria possível avaliar a operação e também determinar os pontos de gargalo que necessitam de dimensionamento, uma vez pré-estabelecidos os níveis de serviço a serem alcançados.

O autor, entretanto, não trata o modal ferroviário especificamente, mas o transporte terrestre de forma agregada, sem entrar em avaliações das capacidades dos sistemas de acesso ao porto.

BOTTER [1985] tratou da análise operacional dos portos de Santos e Imbituba, e da avaliação de suas capacidades associadas a níveis de serviço pré-estabelecidos, segundo uma abordagem sistêmica, com o auxílio de dois modelos: um baseado na teoria de filas e outro em simulação utilizando também a linguagem GPSS.

Foram considerados seis tipos de terminais portuários para a elaboração dos modelos: Terminal de Carga Geral, Terminal de Contêineres, Terminal de Fertilizantes, Terminal de Minérios, Terminal de Granel Sólido e Terminal de Granel Líquido.

Uma vez que se objetivava com esse trabalho a integração entre o sistema portuário e os navios, de forma a melhorar o atendimento aos mesmos, procurou-se

determinar os níveis de serviço adequados tanto aos navios quanto a todos os componentes que utilizam a infra-estrutura portuária.

Com isso foi possível fazer uma análise comparativa entre os resultados obtidos com a simulação e as características reais dos portos em estudo, avaliar seus desempenhos e identificar os componentes críticos, fossem eles o número de berços, a baía de espera, um dado setor de armazenagem, o pátio ferroviário, etc.

O autor tratou o porto como um todo, detalhando os processos sob a óptica da chegada dos navios. Em relação às capacidades terrestres foram enfocados apenas os números de posições de estacionamentos de caminhões, ou de comboios nos pátios ferroviários, e o tempo médio de espera a que o veículo é submetido para ser atendido.

MELLO *et al* [1986] apresentam uma análise técnico-operacional do terminal de contêineres do Porto de Santos, medindo sua capacidade de movimentação de contêineres (contêineres/hora). É apresentada uma metodologia para a determinação da composição ótima do terno de trabalho que deveria ser usado nas operações de carga e descarga de navios porta-contêineres, sendo definido terno de trabalho “como um subgrupo de homens e equipamentos que irão operar um determinado número de porões de um navio previamente estabelecido”.

É também usada a linguagem de simulação GPSS na modelagem operacional dos subsistemas de importação e exportação de contêineres, sendo definidos para cada um deles o fluxograma de operação, os ciclos operacionais e também as escalas de tempo dos diversos equipamentos, tais como portêineres, carretas e empilhadeiras, envolvidos na movimentação dos contêineres.

Mais uma vez é focado o processo sob a ótica da chegada dos navios, sendo deixado totalmente em aberto a capacidade terrestre.

LIMA JÚNIOR [1988] apresenta uma metodologia para o dimensionamento de terminais rodo-ferro-fluviais objetivando a modularidade operacional. O estudo foi realizado seguindo a caracterização sistêmica dos 4 subsistemas envolvidos: o rodoviário, o ferroviário, o hidroviário e o de movimentação e armazenagem. Foram visados os aspectos dimensionais e de capacidade, sendo focado o dimensionamento operacional do terminal em detrimento da infra-estrutura do mesmo.

Caracterizaram-se então, os principais componentes de cada subsistema: acesso/egresso e elementos de controle, áreas de regulação de fluxo de veículos, áreas de circulação e manobras e elementos de carga e descarga.

A metodologia apresentada para o dimensionamento dos terminais multimodais de cargas seguiu as seguintes etapas:

- Especificação do problema: perfil e missão do terminal, com a caracterização dos elementos intervenientes, incluindo demanda de transbordo, oferta de transporte e perfil das cargas entre outros;
- Caracterização e dimensionamento dos componentes de cada subsistema;
- Geração de alternativas: concepção do terminal, envolvendo arranjo físico, capacidade e custos;
- Avaliação e escolha da solução.

Por fim, é apresentada uma aplicação prática da metodologia desenvolvida para o terminal de grãos agrícolas da hidrovia Tietê-Paraná na região de Pederneiras.

O autor estuda o pré-dimensionamento dos terminais para cada um dos subsistemas citados, no entanto não faz parte dessa pesquisa a real operação nos mesmos.

GUALDA [1995] faz uma síntese de diversos estudos relacionados à modelagem e análise de terminais de transportes, reportando parte das pesquisas por ele desenvolvidas ou orientadas.

O autor inicia a tese mostrando uma série de definições e conceitos básicos que serão utilizados ao longo do trabalho. Dá-se ênfase à caracterização sistêmica dos terminais, ou seja, identificar o sistema, os subsistemas e seus componentes de acordo com suas funções em relação aos objetivos do problema considerado, e também à capacidade associada ao nível de serviço, conceito bastante explorado em seus trabalhos.

Dentre os tópicos abordados estão: localização e planejamento de terminais de transportes, concepção e dimensionamento preliminar de terminais multimodais de

cargas e modelagem para análise e balanceamento de capacidade de terminais de transportes.

SANTOS [1998] utilizou o *software* ARENA para avaliar a influência que as incertezas nos processos de chegadas causam no desempenho e no dimensionamento de um terminal hidroferroviário de grãos no rio Tietê. Como objeto de estudo foi escolhido o terminal da Comercial Quintella em Pederneiras-SP e procedeu-se a uma caracterização da operação do mesmo.

Por se tratar de um terminal intermodal, foram caracterizados os processos de chegadas e saídas dos modais existentes no local de estudo, e coletados dados sobre a chegada dos comboios (barcaças) e chegadas e saídas dos vagões ferroviários.

Dessa forma, o trabalho foi desenvolvido procurando-se obter uma estrutura que mostrasse a importância do sincronismo entre as operações de chegada dos modais à interface e os ganhos associados a uma melhoria na gerência operacional desses processos.

FERNANDES [2001] propõe uma metodologia para o dimensionamento econômico-operacional de terminais portuários especializados em contêineres e veículos. Essa metodologia permite a criação de diferentes arranjos de contêineres dentro do terminal e melhorar estes arranjos com o objetivo de aumentar a eficiência, reduzindo os custos por unidade de carga movimentada e conseqüentemente melhorando a taxa interna de retorno do investimento.

Foi utilizada a simulação codificada na linguagem ARENA no estudo de caso do terminal de contêineres e veículos do Porto de Paranaguá, buscando-se o dimensionamento de todos os recursos do terminal para cada ano de operação e avaliando-se sua viabilidade econômica. Também neste caso o modal ferroviário não foi avaliado

A cada execução do modelo era verificado se a quantidade de recursos (equipamentos) do terminal tinha sido capaz de atender a demanda programada, e também se o tempo médio em fila por navio estava dentro dos padrões estipulados. Caso o previsto não ocorresse, a quantidade de recursos deveria ser aumentada até o valor previsto para a fila média ser atingido.

Com os dados obtidos com a simulação, foram calculados os custos de mão-de-obra, aquisição e manutenção de equipamentos, custos operacionais e também as receitas obtidas da operação do terminal, sendo possível fazer uma análise de viabilidade econômica.

Com isso, foi possível verificar a viabilidade econômica de cada terminal para a configuração adotada, bem como dimensionar a real necessidade de recursos do terminal e assim obter-se uma racionalização dos mesmos.

CARNELOS [2001] tratou da necessidade de automação com vistas à otimização da operação portuária de embarque e descarga em terminais de contêineres através da análise do dimensionamento e especificação da configuração ideal de equipamentos e recursos, tais como portêineres, guindastes de terra, guindastes de bordo e empilhadeiras *reach stacker*, necessários à realização dessa tarefa. Utilizou-se então, o *software* de simulação ARENA na modelagem do terminal de contêineres do grupo Rodrimar no Porto de Santos.

Primeiramente, caracterizou-se a operação no terminal em estudo e os respectivos processos de chegada, atendimento e deslocamento entre estações (equipamentos e/ou recursos). Posteriormente, foram coletados os dados e definidas as curvas de distribuição de probabilidades desses processos, as quais serviram como dados de entrada no ARENA.

Realizou-se, então, a simulação da operação para vários cenários. Em cada um destes foi variada a quantidade de determinado equipamento utilizado para o embarque e descarga dos contêineres e com isso obteve-se, para cada cenário, o rendimento do terminal e o grau de ociosidade de cada recurso.

O autor tratou o porto como um todo, preocupando-se com o dimensionamento dos equipamentos de movimentação para o terminal de contêineres, mas deixando em aberto as capacidades disponíveis do lado terrestre.

LEGATO e MAZZA [2001] enfocaram um modelo de rede de filas das atividades logísticas dos processos de chegada, atracação e partida dos navios no terminal de contêineres de Gioia Tauro (Itália). O estudo foi focado no planejamento de um modelo quantitativo especializado na análise de gargalos, gerenciamento de operações e

otimização da capacidade dos recursos do subsistema de atracação, no entanto não foi estudada a parte terrestre.

Um modelo de rede de filas com múltiplas classes de clientes foi proposto para estimar o efeito do congestionamento no tempo de permanência dos navios (clientes) pertencentes a uma determinada companhia transportadora (classe de cliente). A simulação foi necessária para representar o estabelecimento de prioridades na política de atracação, na alocação de guindastes e também devido às distribuições estatísticas do tempo entre chegadas de navios não seguirem o formato exponencial.

A linguagem de programação por objeto visual SLAM foi usada como implementação na descrição e interação dos processos do sistema, e posteriormente o modelo foi validado para verificar se ele operava de acordo com o sistema real.

KOZAN [2000] investiga o problema da minimização dos tempos de movimentação e transporte de contêineres desde o instante da chegada do navio ao porto até o instante em que todos os contêineres desse navio deixam o porto. No caso de se tratar de contêineres de exportação o problema seria o contrário, ou seja, a minimização dos tempos de movimentação e transporte dos contêineres do instante de sua chegada ao porto até o carregamento do navio e sua partida do porto.

É proposto um modelo matemático que é aplicado ao terminal multimodal de Brisbane (Austrália) para verificar a viabilidade em se investir na infra-estrutura do terminal (*shore cranes*, *highstackers* e caminhões), visando uma redução dos tempos de *throughput*, definido nesse trabalho como sendo a soma entre os tempos de movimentação e transporte dos contêineres.

São propostas várias combinações para a quantidade de *shore cranes*, *highstackers* e caminhões, e por fim busca-se identificar a que traria o melhor resultado em termos de custo-benefício.

Uma vez que esse trabalho objetiva uma análise da operação ferroviária na Baixada Santista, e sabendo-se que a área em estudo é formada praticamente por trechos em linha singela, constata-se que essas análises estão bastante relacionada com os temas de movimentação dos trens em linha singela, bem como das capacidades das mesmas.

Também se constata a inexistência de trabalhos sobre simulação de operação ferroviária em área portuária, e como dito anteriormente à ótica empregada tem sido a da chegada dos navios, com posterior análise de terminais. O que mais uma vez justifica o tema escolhido, bem como o modo de estudá-lo.

3 OPERAÇÃO FERROVIÁRIA NA BAIXADA SANTISTA

A chegada dos trens na Baixada Santista ocorre por dois acessos: através do ramal Mairinque-Santos, em linha dupla, na Serra do Mar sob concessão da Ferrobán, atualmente Consórcio Brasil Ferrovias, e via sistema de Cremalheira, em linha singela, sob concessão da MRS, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Acesso ferroviário ao Porto de Santos

A Figura 3.2 a seguir, mostra a configuração real da linha férrea, e a localização dos pátios da região representada na figura anterior, em que os trechos que possuem

apenas uma linha são trechos de linha singla, enquanto os que possuem duas são linha dupla.

Figura 3.2: Esquema da malha ferroviária e localização dos pátios na Baixada Santista

3.1 Descrição da Operação Ferroviária

3.1.1 Operação Ferroviária da Brasil Ferrovias

A Brasil Ferrovias é o consórcio responsável pelo transporte ferroviário de cargas para a Baixada Santista da Ferrobán, Ferronorte e Ferrovia Novoeste; além destas, também existe a Ferrovia Centro Atlântica (FCA) utilizando a mesma malha que a Brasil Ferrovias para o acesso ao Porto.

Os trens entram no sistema através do Pátio Paratinga, onde então são separados conforme seus destinos. O acesso a esse pátio é realizado via ramal Mairinque-Santos, por linha dupla de bitola mista com uma delas sendo usada para os trens sentido exportação, e a outra no sentido importação.

Conforme citado anteriormente, as operações de classificação e ordenação dos trens que seguirão para os respectivos terminais não são desempenhadas nos pátios da Baixada Santista, e os mesmos caracterizam-se predominantemente como áreas de acúmulo e formação de trens. Uma vez que as referidas operações são trabalhosas e demoradas, elas são realizadas em pátios mais afastados de modo a reduzir os tempos de atendimento nos pátios da Baixada Santista e afetando o mínimo possível a alimentação do sistema ferroviário.

No Paratinga (Figuras 3.3 e 3.4) são realizadas operações de inspeção dos vagões, abastecimento das locomotivas e formação dos trens. Em geral, o abastecimento das locomotivas é realizado no sentido importação, e as operações de inspeção dos vagões e formação dos trens são realizadas em ambos os sentidos.

As cargas transportadas pela Brasil Ferrovias para a Baixada Santista são: soja, farelo de soja, açúcar, farelo de polpa cítrica, lingotes de alumínio, calcáreo fino, calcáreo britado, minério, fosfato, contêineres e vagões vazios para carregar enxofre. Os vagões destinados a um mesmo terminal vêm agrupados em um mesmo trem, também sendo usual o transporte de cargas destinadas a mais de um terminal da mesma margem.

Figura 3.3: Vista do pátio Paratinga no sentido importação

Figura 3.4: Vista do pátio Paratinga no sentido exportação

Nas Figuras 3.5 a 3.7, e 3.11, são apresentados fluxogramas da operação ferroviária desempenhada pela Brasil Ferrovias. Os fluxogramas apresentados representam apenas a exportação, sendo o processo de importação análogo e ocorrendo no sentido inverso. A lógica utilizada no modelo de simulação para representar os processos de exportação e importação é apresentada no capítulo 5.

Figura 3.5: Fluxograma da operação ferroviária da Brasil Ferrovias

O tempo médio para inspeção dos vagões, incluindo-se a arrumação da posição do freio para subida ou descida da Serra do Mar é aproximadamente 30 minutos para um lote de 60 a 70 vagões. No entanto, esse tempo pode ser reduzido aumentando-se o pessoal para realizar essa operação. O tempo para abastecimento das locomotivas é de

aproximadamente 90 minutos, para uma quadra de locomotivas, e o tempo médio para formação de novos trens é de 20 minutos.

Figura 3.6: Fluxograma da operação ferroviária na margem direita em bitola estreita

Horários em que é proibida a passagem de trem pela cidade:

7:30 – 8:30 h
11:30 – 13:00 h
17:00 – 19:00 h

Em geral o que ocorre é que os trens que partem do Paratinga em horários que encontrariam restrições na passagem por Santos, esperam no Pátio São Vicente (ver figura 3.2) até a liberação do trecho, e então seguem para o Estuário, pois dessa forma é possível ganhar tempo durante a viagem.

Também existe uma restrição em relação à quantidade máxima de vagões transportados no horário das 7:00 – 19:00, menor ou igual a 30 vagões.

Devido principalmente à interferência com o tráfego urbano em Santos, que gera restrições nos horários de circulação dos trens, bem como limitações na quantidade máxima de vagões transportados, futuramente esse ramal deverá ser desativado. Dessa forma, todas as cargas que têm como destino o Estuário passarão a ser entregues em Valongo, pela linha do Ramal Futuro (ver figura 3.2), passando obrigatoriamente pelo Perequê e aumentando o fluxo de cargas para o mesmo.

Embora existam restrições aos horários de circulação dos trens para a demanda que se destina ao pátio Estuário, por simplificação, considerou-se no modelo de simulação que os trens da demanda Tipo 2, apresentada em detalhes no capítulo 5, poderiam trafegar livremente. Essa simplificação deve ao baixo volume desta demanda, conforme apresentado na tabela 4.4.

Nos fluxogramas seguintes, as operações de avaliação de capacidade do pátio e alocação de locomotiva e do trecho, serão representadas apenas por alocação de recursos por motivo de simplificação.

Figura 3.7: Fluxograma da operação ferroviária na margem direita via Perequê

Todo o fluxo de cargas via Perequê necessita de um tempo médio de espera no pátio de 1 hora para o registro da operação por parte da MRS, uma vez que a partir daí a ferrovia encontra-se sob concessão dessa empresa. Decorrida essa operação, os trens podem partir, caso nenhuma outra operação tenha que ser desempenhada e a linha férrea esteja livre.

A grande maioria das cargas que chegam no Valongo (Figuras 3.8 e 3.9) são grãos para exportação que devem ser pesados antes de serem entregues aos terminais. Aproximadamente 80% dos vagões são pesados, e o tempo médio dessa operação é de 1 hora para um grupo de 15 vagões. Só após a pesagem do lote e conferido este valor junto aos terminais, é que os vagões podem ser entregues.

Figura 3.8: Pátio Valongo

Figura 3.9: Pesagem de vagões no Valongo

O fluxo em direção à margem esquerda, representado na Figura 3.11, pode ser tanto no regime de tráfego mútuo quanto de *track right*. No regime de tráfego mútuo, locomotivas da Brasil Ferrovias puxam o trem até o Perequê, e a partir daí locomotivas da MRS tracionam os vagões até Conceiçãozinha (Figura 3.10). No regime de *track right*, locomotivas da própria Brasil Ferrovias tracionam seus vagões até o pátio de Conceiçãozinha.

Figura 3.10: Pátio Conceiçãozinha

Figura 3.11: Fluxograma da operação ferroviária na margem esquerda

3.1.2 Operação Ferroviária da MRS

A MRS é responsável pelo transporte de cargas próprias que chegam à Baixada Santista no Pátio Paranapiacaba (Figura 3.12), e também pelo tráfego mútuo, ou seja, o transporte de parte das cargas da Brasil Ferrovias do Pátio Perequê em diante.

Figura 3.12: Pátio Paranapiacaba

O Pátio Paranapiacaba é praticamente uma área de espera, onde os vagões aguardam a disponibilidade de locomotivas para a descida da Cremalheira. A operação de classificação dos vagões é feita em um pátio localizado a aproximadamente 4 km à montante do mesmo, Pátio Campo Grande, e fora da área de estudo deste trabalho.

A MRS transporta minério, contêineres e vagões vazios no sentido exportação, e sal, trigo e laminados no sentido importação. O maior volume de cargas transportadas é o minério para a Cosipa, correspondendo a mais de 60% do total de vagões e tendo o transporte desse produto prioridade sobre os demais.

As Figuras 3.13, e 3.17 a 3.19 apresentam os fluxogramas da operação ferroviária da MRS. Da mesma forma que para operação ferroviária da Brasil Ferrovias, são

apresentados os fluxogramas apenas para exportação sendo a importação análoga à exportação e ocorrendo em sentido inverso. A lógica utilizada para representar a importação é apresentada no capítulo 5.

Figura 3.13: Fluxograma da operação ferroviária da MRS

A descida e/ou subida de vagões pela Cremalheira é feita por três duplas de locomotivas Hitachi, com capacidade de 500tb por dupla (Figuras 3.14 e 3.15). Além da restrição de capacidade das locomotivas, existe uma restrição de 200 m no comprimento máximo da composição.

Figura 3.14: Locomotivas descendo a Cremalheira

Figura 3.15: Início da subida na Cremalheira

A blocagem e o tempo de ciclo das operações de subida e descida da Cremalheira é mostrado na Figura 3.16.

Figura 3.16: Ciclo das locomotivas na Cremalheira

Como pode ser observado, as 3 duplas de locomotivas sobem e descem em grupo, sendo o ciclo completo de viagem de 77 minutos.

O trecho da Cremalheira é considerado o grande gargalo operacional da MRS, uma vez que a rampa máxima chega a 10%, o que para ferrovia é um valor bastante elevado a ser vencido e requer um sistema projetado de forma bem específica.

De acordo com informações da própria MRS, o maior volume de cargas a ser transportado é o minério para a Cosipa, e desta forma o gargalo operacional estaria na descida dos vagões carregados pela Cremalheira. Na descida da Cremalheira encontramos uma restrição na capacidade das locomotivas limitando o transporte em apenas 4 vagões por dupla, enquanto que na subida, devido aos vagões estarem vazios, este número sobe para 15, sendo encontrada uma restrição em relação ao comprimento máximo da composição.

Figura 3.17: Fluxograma da operação ferroviária em direção à Cosipa

Um trem de minério é formado por 86 vagões, e o lote a ser entregue na Cosipa é composto de 22 vagões. Como as locomotivas descem em grupo, em uma viagem é possível o transporte de 12 vagões, porém apenas após a descida do lote é formado o trem que irá para Piaçaguera. Após 8 horas da entrega do lote vagões carregados à Cosipa, eles são devolvidos vazios em Piaçaguera onde são inspecionados para a remoção dos defeituosos e com avaria, e então formar o trem que seguirá de volta para

Raiz da Serra. A atividade de inspeção de vagões é realizada independentemente do tipo de carga transportada, e o tempo médio de operação é de 20 minutos para um lote de 22 vagões.

Figura 3.18: Fluxograma da MRS em direção à margem direita

Figura 3.19: Fluxograma da operação da MRS em direção à margem esquerda

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Caracterização dos Recursos Disponíveis

Uma vez descritas as operações desempenhadas pelas ferrovias, é necessário conhecer a disponibilidade e características de cada um dos recursos que servirão como dados de entrada no ARENA.

4.1.1 Pátios

Os dados relacionados às características físicas e localização dos pátios foram obtidos com a RFFSA (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Capacidade estática dos pátios da Baixada Santista

Pátio	Capacidade Estática (vagões)	Pátio	Capacidade Estática (vagões)
Paratinga	660	Paranapiacaba	237
Perequê	463	Raiz da Serra	173
Valongo	320	Piaçaguera	350
Estuário	206	Conceiçãozinha	187

Os dados apresentados na tabela 4.1 foram calculados de acordo com os comprimentos de linha útil de cada um dos pátios, obtidos através dos *layouts* dos mesmos. Para propósito de simulação, considerou-se que pelo menos 1 das linhas desses pátios deveria estar sempre vazia para ser possível a movimentação dos trens. Adotou-se o comprimento médio dos vagões de 17m para os pátios Paratinga, Perequê, Valongo, Estuário e Conceiçãozinha, e de 15m para os pátios Paranapiacaba, Raiz da Serra e Piaçaguera.

Essa diferença deve-se ao fato de que a maior demanda da MRS é o minério que é transportado em vagões de 14 m de comprimento, enquanto que as cargas da Brasil Ferrovias são transportadas em vagões de 16 a 18 m de comprimento.

As informações relacionadas à localização dos pátios também foram levadas em consideração para a construção do modelo, uma vez que influenciam diretamente o tempo de viagem.

4.1.2 Locomotivas

O transporte ferroviário na Baixada Santista é realizado por um conjunto de locomotivas, as quais são fixadas em determinados trechos e responsáveis pelo transporte de um tipo de tráfego específico. A Figura 4.1 mostra um esquema da disponibilidade de locomotivas em cada um dos trechos.

Figura 4.1: Disponibilidade de locomotivas por trecho

A capacidade de transporte das locomotivas, bem como as cargas transportadas por cada uma delas é mostrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Capacidade de transporte e cargas transportadas por locomotiva

Locomotiva	Tipo	Capacidade de Transporte	Cargas Transportadas
A	U-12	1200 tb	Cargas da Brasil Ferrovias e da FCA que têm como destino o Estuário.
B	U-20	2750 tb	Todas as cargas da Brasil Ferrovias que estão no regime de tráfego mútuo com a MRS.
C	U-23	3000 tb	Cargas do Tráfego mútuo da Brasil Ferrovias que têm como destino Conceiçãozinha, e Cosipa.
D	U-20	2750 tb	Cargas da Brasil Ferrovias em regime de <i>track-right</i> para Conceiçãozinha.
E	U-20	2750 tb	Cargas da FCA em regime de <i>track-right</i> para Conceiçãozinha.
F	U-20	2750 tb	Cargas da MRS que têm a como destino a Cosipa (minério e vagões vazios).
G	U-23	3000 tb	Cargas da MRS que têm a como destino a Conceicaozinha e Valongo (contêiner).
H	Hitachi	500 tb	Todas as cargas da MRS – trecho Cremalheira.
I	U-23	3000 tb	Cargas do Tráfego mútuo da Brasil Ferrovias que têm como destino Valongo.
J	U-20	2750 tb	Cargas da FCA em regime de <i>track-right</i> para Cubatao.

4.1.3 Linha Férrea

A malha ferroviária da Baixada Santista é formada praticamente por trechos de linha singela, o que significa que apenas um único trem pode ocupar o trecho por vez.

A velocidade desenvolvida pelas locomotivas em cada um dos trechos é função tanto das condições e características da via, quanto da potência das locomotivas. As maiores restrições encontradas devido às características viárias são na Cremalheira, onde a velocidade média desenvolvida é de 12 km/h, e no vão sobre o Canal da Bertioiga onde a velocidade média é de 10 km/h.

Tanto as características físicas dos trechos quanto a velocidade máxima desenvolvida em cada um deles foram levados em consideração para a construção do modelo de simulação. De acordo com informações da Brasil Ferrovias e da MRS, a

velocidade média na malha ferroviária da Baixada Santista é de 36 km/h, sendo este o valor adotado em todos os trechos, com exceção dos trechos críticos acima citados.

Para a construção do modelo de simulação foi realizada uma divisão da malha ferroviária da Baixada Santista em 13 trechos conforme mostrado na Figura 4.2, e seus comprimentos são apresentados na Tabela 4.3.

Figura 4.2: Divisão da malha ferroviária por trechos

Tabela 4.3: Comprimento dos trechos da malha ferroviária da Baixada Santista

Trecho	Comprimento (km)	Trecho	Comprimento (km)
1	18,5	8	5,3
2	1,5	9	2,0
3	4,9	10	12,2
4	7,9	11	22,4
5	1,1	12	8,3
6	1,1	13	3,0

7	1,6
---	-----

4.2 Caracterização da Demanda

Inicialmente, o plano de coleta de dados visava obter informações diárias sobre os intervalos de tempo entre chegadas sucessivas dos trens, quantidade de vagões e toneladas úteis transportadas. Essa opção objetivava uma representação mais precisa da operação ferroviária, uma vez que diariamente são estabelecidos os horários em que cada trem ocupará determinado pátio e trecho de linha férrea. No entanto, devido à enorme dificuldade em obter os dados no formato desejado, a demanda das ferrovias envolvidas no processo foi caracterizada conforme explicado a seguir.

4.2.1 Demanda da Brasil Ferrovias

Sobre a operação da Brasil Ferrovias foram obtidos, junto a Portofer, valores mensais de janeiro de 2001 a agosto de 2002 sobre a quantidade de vagões e toneladas úteis transportadas por destino. Em relação aos horários de chegada dos trens, e em especial ao intervalo de tempo entre chegadas consecutivas, só foram obtidos dados do mês de abril de 2002. A Tabela 4.4 apresenta os valores mensais de cada uma das movimentações.

As notações usadas na tabela para representar o destino das cargas são:

BF1 representa regime de *track right* da Brasil Ferrovias em bitola estreita para a margem direita do Porto de Santos (Estuário).

BF2 – TM1 representa regime de tráfego mútuo entre a Brasil Ferrovias e a MRS em bitola larga para a margem esquerda do Porto de Santos (Conceiçãozinha).

BF2 – TM2 representa regime de tráfego mútuo entre a Brasil Ferrovias e a MRS em bitola larga para a margem direita do Porto de Santos (Valongo).

BF3 representa regime de *track right* da Brasil Ferrovias em bitola estreita para a margem esquerda do Porto de Santos (Conceiçãozinha).

BF4 representa regime de *track right* da FCA para a margem esquerda do Porto de Santos (Conceiçãozinha).

Tabela 4.4: Quantidade de vagões transportados pela Brasil Ferrovias por destino

Mês	Quantidade de Vagões Transportados					Total
	BF1	BF2 TM1	BF2 TM2	BF3	BF4	
Jan - 2001	1.304	2.684	1.997	-	-	5.985
Fev - 2001	692	2.523	1.750	-	-	4.965
Mar - 2001	966	4.214	2.710	-	-	7.890
Abr - 2001	1.035	2.838	3.060	1.548	-	8.481
Mai - 2001	1.138	2.766	3.375	1.511	-	8.790
Jun - 2001	1.263	3.079	3.432	1.755	-	9.529
Jul - 2001	1.051	3.254	3.464	1.872	-	9.641
Ago - 2001	730	3.599	3.184	1.859	-	9.372
Set - 2001	953	3.705	3.635	1.772	-	10.065
Out - 2001	842	3.677	3.591	2.250	-	10.360
Nov - 2001	534	2.013	4.057	2.070	-	8.674
Dez - 2001	1.422	831	3.604	747	-	6.604
Jan - 2002	775	663	2.042	484	359	4.323
Fev - 2002	682	1.647	1.395	759	478	4.961
Mar - 2002	328	3.049	4.155	309	648	8.489
Abr - 2002	528	4.035	4.122	833	716	10.291
Mai - 2002	381	3.382	2.392	1.005	516	7.676
Jun - 2002	644	2.878	2.962	1.005	708	8.197
Jul - 2002	1.101	3.921	3.798	942	781	10.543
Ago - 2002	651	3.904	3.551	932	902	9.940
Média	809	2.933	2.977	1.274	639	8.239

Adicionalmente a esses dados, existe uma demanda de calcário para a Cosipa, em regime de tráfego mútuo com a MRS, e de fosfato para Cubatão, em regime de *track rigt* pela FCA. No entanto, para essas demandas só foram obtidos dados de Abril de 2002. A demanda de cargas para a Cosipa foi de 837 vagões e para Cubatão de 279 vagões.

A Tabela 4.5 apresenta o volume em toneladas úteis transportado por vagão para o período de Janeiro de 2001 a Agosto de 2002. Esses valores foram calculados dividindo-se a quantidade de toneladas úteis pela quantidade de vagões transportados mensalmente.

Tabela 4.5: Volume em toneladas úteis por vagão

Destino das Cargas	Valor Médio de Toneladas Úteis (tu/vagão)
BF1	50
BF2 - TM1	64
BF2 - TM2	66
BF3	51
BF4	54
Cosipa	60
Cubatão	59

Como explicado anteriormente, inicialmente a coleta de dados seria composta por informações diárias sobre a movimentação dos trens e ocupação dos pátios, e uma vez que se pensava que esses dados seriam facilmente obtidos junto às ferrovias, não fez parte do escopo da pesquisa um trabalho de coleta de dados por amostragem no campo. No entanto, no decorrer da pesquisa, diversos foram os empecilhos para o recebimento de tais informações, resultando na obtenção dos dados da movimentação diária de trens apenas para o mês de abril do ano de 2002 e da ocupação de apenas um dos pátios, o Perequê.

Uma vez que havia a disponibilidade de dados diários do mês de abril do ano de 2002 sobre o intervalo de tempo entre chegadas sucessivas, e quantidade de vagões movimentadas no pátio Perequê, decidiu-se, por limitação de tempo e recursos financeiros, testar a validade do modelo a partir dos mesmos. Analisando-se a tabela 4.4 verifica-se que esta escolha é bastante razoável, uma vez que esse mês apresenta uma das maiores movimentações observadas, o que implica que a avaliação levará em consideração um pico operacional.

A análise dos dados foi realizada através de uma ferramenta do ARENA, o *Input Analyzer*. O propósito desta ferramenta é auxiliar no tratamento dos dados, na

identificação da distribuição por meio de testes de aderência e na estimativa dos parâmetros que visam identificar e avaliar as melhores opções para as distribuições de probabilidades que serão empregadas [FREITAS FILHO, 2001].

4.2.1.1 Análise dos dados da Brasil Ferrovias

Em relação à quantidade de vagões movimentados pela Brasil Ferrovias, os dados estavam agrupados por margem de destino, ao invés do tipo de demanda. Ou seja, a quantidade de vagões que tinham como destino a margem direita ou esquerda do porto, não importando o regime de tráfego utilizado.

Por essa razão, o modelo proposto e apresentado no capítulo 5, considera que todas as cargas que vão para margem esquerda estão em regime de tráfego mútuo, bem como as cargas que vão para margem direita em bitola larga. As Figuras 4.3 a 4.5, e a Tabela 4.6 apresentam os resultados gerados pelo *Input Analyzer*.

Figura 4.3: Ajuste de distribuição da quantidade de vagões para Cosipa

Figura 4.4: Ajuste da distribuição da quantidade de vagões para margem direita em bitola larga

Figura 4.5: Ajuste da distribuição da quantidade de vagões para margem esquerda

Tabela 4.6: Resultados dos ajustes das distribuições da quantidade de vagões para o mês de Abril de 2002

Destino:	Cosipa	Margem Direita	Margem Esquerda
Distribuição	TRIA(31.5, 36.6, 51.5)	TRIA(26.5, 63, 66.5)	TRIA(19.5, 64.3, 66.5)
Erro Quadrado	0.038365	0.013470	0.008088
Qui Quadrado Calculado	3.01	8.51	5.17
Graus de Liberdade	1	4	4
Qui Quadrado ao Nível de Significância $\alpha=5\%$	3.84	9.49	9.49

Como pode ser observado, os valores críticos tabelados do Qui Quadrado são maiores que os calculados em todos os casos, logo não se pode rejeitar as hipóteses de que os dados levantados seguem as distribuições especificadas em cada caso, sendo as mesmas utilizadas como dado de entrada para validação do modelo.

Devido à quantidade de dados relacionados à movimentação para Cubatão ser bem pequena, desconsiderou-se essa demanda para o propósito da simulação.

Em relação ao intervalo de tempo entre chegadas sucessivas dos trens da Brasil Ferrovias, obteve-se o resultado apresentado na Figura 4.6, e na Tabela 4.7.

Figura 4.6: Ajuste da distribuição do intervalo de tempo entre chegadas sucessivas

Tabela 4.7: Resultado do ajuste da distribuição do intervalo de tempo entre chegadas para o mês de Abril de 2002

Intervalo entre Chegadas Sucessivas	
Distribuição	EXPO(3.98)
Erro Quadrado	0.002063
Qui Quadrado Calculado	9.3
Graus de Liberdade	6
Qui Quadrado ao Nível de Significância $\alpha=5\%$	12.6
Kolmogorov-Smirnov Calculado	0.127
Graus de Liberdade	180
Kolmogorov-Smirnov ao Nível de Significância $\alpha=5\%$	0.101

Para o intervalo de tempo entre chegadas, observa-se que a distribuição passou no teste Qui Quadrado, uma vez que o valor crítico tabelado é superior ao calculado. Entretanto, para o teste Kolmogorov-Smirnov a hipótese de que o intervalo de tempo entre chegadas sucessivas se ajusta a distribuição especificada é rejeitada no nível de significância de 5%.

Apesar do ajuste ter passado em apenas 1 dos testes, a distribuição especificada foi utilizada para a validação do modelo e geração de cenários alternativos e, como será mostrado no capítulo 7, respondeu de forma bastante satisfatória às análises realizadas.

Em relação à movimentação em bitola estreita para a margem direita, só foram obtidos os dados mensais apresentados na tabela 4.4. Essa limitação conduziu à opção

de utilizar distribuições triangulares para representar o intervalo entre chegadas, uma vez que esse tipo de distribuição é recomendado quando se desconhece a curva associada a uma variável aleatória, mas tem-se boas estimativas dos seus limites inferior e superior, bem como de seu valor mais provável [FREITAS FILHO, 2001].

Dessa forma, considerou-se que a quantidade de vagões seguia uma distribuição triangular com mínimo 24, média 26, e máximo 28, sendo a opção por esses valores decorrente do total de 528 vagões movimentados no mês de abril, e da limitação imposta em relação à quantidade máxima de vagões transportados e apresentado no capítulo 3. Para o intervalo de tempo entre chegadas, adotou-se também uma distribuição triangular com mínimo 34, média 36 e máximo 38 horas, uma vez que se supõe que a quantidade de vagões transportada encontra-se uniformemente distribuída ao longo do mês.

Sobre a ocupação máxima do pátio Perequê, a Figura 4.7 ilustra o comportamento observado diariamente ao longo do mês de abril do ano de 2002 para os vagões no sentido exportação.

Figura 4.7: Ocupação máxima diária do Perequê em Abril de 2002 considerando as cargas no sentido exportação

4.2.2 Demanda da MRS

Os dados dessa operação foram obtidos com a própria MRS e com a Portofer.

Conforme apresentado no capítulo 3, a MRS transporta minério, contêineres e vagões vazios no sentido exportação, e sal, trigo e laminados no sentido importação, sendo essas cargas destinadas à Cosipa, e às margens direita e esquerda do Porto de Santos.

As cargas destinadas a Cosipa são minério e vagões vazios para o transporte de laminados. No caso do minério, a demanda mensal é de 350.000 tu/mês, o que corresponde a aproximadamente 11.667 tu/dia. Cada trem de minério é composto de 86 vagões, com capacidade de 94tu cada. Diariamente chegam 2 trens, o primeiro entre 12:00 h e 15:00 h, e o segundo entre 23:00 h e 02:00 h.

A demanda de laminados é de 60.000 tu/mês, correspondendo a 2.000 tu/dia. Cada trem de vagões vazios para o transporte de laminados é composto de 30 vagões, com 27 t de tara e capacidade de 70 tu cada. Diariamente chega apenas 1 trem, entre as 04:00h e 06:30h.

As cargas destinadas à margem direita e esquerda do Porto de Santos são contêineres, e vagões vazios para o transporte de trigo e sal. Em relação aos contêineres, no regime usual de operação, tem-se a chegada diária de 3 trens expressos, que são destinados tanto à margem direita quanto à margem esquerda. Os dados a respeito desses trens são mostrados da Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Informações sobre os trens expressos de contêineres

Trem	Quantidade de Vagões	Frequência	Horário de Chegada	Destino
BASF	15	2 vezes por semana Terça e Sexta	Entre 04:00 e 06:30h	Margem esquerda
ITRI	25	Diário Segunda - Sexta	Entre 04:00 e 06:30h	Margens direita e esquerda
CNAGA	30	Diário Terça - Sábado	Entre 04:00 e 06:30h	Margem esquerda

Os vagões usados para o transporte de contêineres são do tipo plataforma, podendo ser PDR com capacidade para 1 contêiner de 40 pés ou 2 de 20 pés , ou PDS

com capacidade para 1 contêiner de 40 pés e 1 de 20 pés, ou 3 de 20 pés. Cada um desses tipos de vagões tem uma tara específica, porém devido à predominância do PDR sobre o PDS, considerou-se nesse trabalho a tara de 20 t. O valor em toneladas úteis transportadas por cada um desses vagões é de aproximadamente 20t.

A demanda de vagões vazios para o transporte de sal da margem direita varia entre 5 e 20 vagões diários. Uma vez que esses vagões são transportados no mesmo trem que os contêineres, seu horário de chegada também se situa entre 04:00 e 06:30 h.

O capítulo 5 apresenta em detalhes o modelo de simulação proposto e construído em linguagem ARENA.

5 MODELO DE SIMULAÇÃO PROPOSTO

Para se analisar a operação ferroviária na Baixada Santista utilizou-se o método de simulação, sendo escolhido o *software* ARENA, lançado em 1993 pela *Systems Modelling Corporation*, por ser um dos pacotes mais recentes dentre os disponíveis no mercado, apresentar uma interface amigável, possuir um conjunto de ferramentas bastante úteis à análise estatística dos dados, e estar legalmente disponível para os pesquisadores da EESC-USP.

De acordo com PEGDEN *et al* [1995], em geral os modelos de simulação são construídos para responder questões do tipo:

- Por que o sistema não funciona da maneira esperada? (avaliação e previsão)
- Por que o sistema não funciona, e o que poderíamos fazer para ele funcionar?(determinação e otimização de gargalos)
- Qual a melhor alternativa? (comparação e análise de sensibilidade)

Conseqüentemente, os estudos de simulação são usados para projetar novos sistemas e/ou modificar e melhorar a operação dos sistemas existentes.

Para o propósito da construção do modelo de simulação, as demandas da Brasil Ferrovias e da MRS, apresentadas no capítulo 4, foram segregadas em alguns tipos de acordo com características do intervalo entre chegadas e dos seus destinos. As Figuras 5.1 e 5.2, apresentam os fluxogramas de cada um dos tipos, mostrando os pátios e os trechos por onde passam cada uma dessas demandas, e as Tabelas 5.1 e 5.2 explicam as características de cada uma delas.

Figura 5.1: Segregação da demanda da Brasil Ferrovias para propósito da simulação

Em que:

Tipo 1 – Demandas para Cosipa, para margem esquerda e para margem direita em bitola larga do Porto de Santos;

Tipo 2 – Demanda em bitola estreita para margem direita do Porto de Santos.

Os números nos conectores correspondem aos trechos de vias entre pátios representados na figura 4.2.

Tabela 5.1: Características dos tipos de demanda da Brasil Ferrovias usados no modelo de simulação

Demanda	Intervalo entre Chegadas	Instante da Primeira Criação
Tipo 1	EXPO (3.98)	0 hora
Tipo 2	TRIA (34.36.38)	1 hora

Conforme apresentado no capítulo 4, não foi possível obter informações mais detalhadas para caracterizar a demanda Tipo 2, e por essa razão decidiu-se que na construção do modelo de simulação seria empregada a abordagem detalhada neste capítulo. Em relação ao instante da primeira criação, admitiu-se que a defasagem entre as chegadas dos dois tipos são as apresentadas na tabela 5.1, embora de acordo com

dados da Brasil Ferrovias o intervalo mínimo entre chegadas sucessivas seja de 20 minutos.

Figura 5.2: Segregação da demanda da MRS para propósito da simulação

Em que:

Tipo 3 – Demandas de minério para Cosipa;

Tipo 4 – Demanda de contêineres para margem esquerda do Porto de Santos;

Tipo 5 – Demanda de contêineres e vagões vazios para margem direita do Porto de Santos

Tipo 6 – Demanda de vagões vazios para transporte de laminados da Cosipa.

Analogamente ao fluxograma anterior, os números nos conectores correspondem aos trechos de vias entre pátios representados na figura 4.2.

Tabela 5.2: Características dos tipos de demanda da MRS usados no modelo de simulação

Demanda	Intervalo entre Chegadas	Frequência	Instante da Primeira Criação
Tipo 3	UNIF (11,15)	Diário	UNIF (12,15)
Tipo 4	TRIA (167,168,169)	5 vezes por semana	UNIF (4, 6.5)

Tipo 5	TRIA (167,168,169)	5 vezes por semana	UNIF (4, 6.5)
Tipo 6	TRIA (23,24,25)	Diário	UNIF (4, 6.5)

Por simplificação, admitiu-se que a demanda de contêineres da ITRI, apresentada na tabela 4.8, seria destinada apenas à margem direitas do Porto de Santos. O intervalo entre chegadas para os tipos de demanda 4 e 5 tem média de 168 horas, porque no modelo as criações de trens foram subdivididos em 5 chegadas, cada uma correspondendo ao dia da semana em que o tipo de demanda está programado, conforme apresentado na tabela 4.8.

Para as demandas tipo 3 a 6, o instante da primeira criação foi estabelecido de acordo com informações colhidas na MRS, e apresentadas no capítulo 4.

Descreve-se, a seguir, a estrutura do modelo proposto para a operação ferroviária na Baixada Santista. O modelo mostra as principais características do funcionamento e operação da malha ferroviária, e leva em consideração a capacidade dos pátios ferroviários, os recursos disponíveis, os tempos de atendimento em cada um dos processadores envolvidos, as peculiaridades operacionais e a demanda existente (Figuras 5.3 a 5.22).

5.1 Lógica do Modelo

5.1.1 Sentido Exportação

5.1.1.1 Geração de trens e ocupação dos pátios de entrada

A entrada dos trens no sistema se dá através por dois canais de acesso:

- Canal 1 constituído da linha de descida do sistema Brasil Ferrovias e que opera em bitola mista;
- Canal 2 constituído do sistema MRS que opera em bitola larga.

Em cada canal ocorre a criação de uma entidade por vez (**Create**) para cada tipo de demanda, à qual se atribui um intervalo de tempo entre chegadas sucessivas,

conforme apresentado nas tabelas 5.1 e 5.2. O contador de chegadas a cada um dos subsistemas é o bloco lógico **Record**, que faz o registro da quantidade de trens que entraram no sistema para que, ao fim da simulação, tenhamos estatísticas desse dado. A quantidade de trens de cada canal corresponde ao somatório dos registros por tipo de demanda que acessa a Baixada nesse canal.

Para o caso de se tratar de demanda Tipo 1, a entidade ocupa um recurso imaginário (**Seize**) com capacidade para apenas 1 entidade por vez, determina-se a chance de determinada entidade ser destinada à Cosipa, à margem direita ou à margem esquerda do Porto de Santos (**Decide**), são atribuídos à entidade o sentido do trem (exportação), e sorteia-se a quantidade de vagões transportada no trem (**Assign**). Verifica-se então, a capacidade do pátio (**Hold**), o que significa que a entidade não entrará no sistema até que seja atingida a condição especificada, ou seja, a capacidade estática do pátio tem que ser maior que o número de unidades ocupadas acrescido da quantidade de vagões que está entrando no pátio (Figura 5.3).

A função do recurso imaginário é garantir que duas entidades não entrarão no sistema ao mesmo tempo, e dessa forma possibilitar que seja feito um equilíbrio de massas entre os vagões que entram e saem do sistema. Logo, não é possível a entrada de vagões no pátio caso sua capacidade tenha sido atingida. Todo o processo de modelagem baseia-se nesse equilíbrio, que é feito no bloco **Hold**.

No bloco **Hold** é feita uma verificação em relação à quantidade de vagões existentes no pátio e o que está para sair. Então, verifica-se a possibilidade da chegada de um novo trem transportando determinada quantidade de vagões. Esta verificação é realizada em todos os pátios do sistema.

Figura 5.3: Lógica do modelo de geração de trens para a demanda tipo 1

As demandas tipo 2 a 6 apresentam um procedimento um pouco diferente. Há a criação da entidade (**Create**), registra-se a quantidade e trem que entraram no sistema (**Record**), e a entidade ocupa um recurso imaginário (**Seize**) com capacidade para apenas 1 entidade por vez.

São atribuídos à entidade o tipo de demanda e o sentido do trem (exportação), sorteia-se a quantidade de vagões transportados (**Assign**), e então a entidade segue para o bloco **Hold** (Figura 5.4).

Figura 5.4: Lógica do modelo de geração de trens para as demandas tipo 2 a 6

Uma vez atendida a condição especificada no bloco **Hold**, o pátio é ocupado com o valor correspondente à quantidade de vagões que foi sorteada (**Seize**), libera-se o recurso imaginário para que outra entidade possa ocupa-lo (**Release**). O trem, então, passa um tempo no pátio para que sejam realizadas as operações de inspeção nos vagões (**Delay**); registra-se a quantidade de vagões que está entrando no sistema (**Record**), e a entidade é direcionada para uma estação (**Route**).

Figura 5.5: Lógica do modelo de ocupação do pátio para todos os tipos de demanda

Embora a entidade já se encontre no pátio de entrada do sistema, ela precisa ser redirecionada para uma estação, que fisicamente representa o próprio pátio, para que seja possível uma definição posterior das distâncias entre estações, e que serão utilizadas pelos transportadores (locomotivas). Deve-se saber que a estação representa o local em que são realizadas todas as atividades necessárias até a partida do trem para o próximo pátio, e que só é possível estabelecer distâncias entre estações.

Ao chegar na estação seguinte (**Station**) é verificado o tipo de demanda (**Decide**), e então a entidade é redirecionada. A partir daí são realizados todos os procedimentos até a partida da entidade para a estação seguinte.

Figura 5.6: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada – passo 1

Para os tipos 1 e 2, após a definição do tipo de demanda, verifica-se o sentido da carga e se a quantidade de vagões que foi sorteada pode ser transportada pela locomotiva em uma única viagem (**Decide**). Se os vagões puderem ser transportados em uma única viagem, a entidade ocupa um recurso imaginário (**Seize**), com capacidade de apenas 1 unidade por vez, e é atribuída a uma variável a quantidade de vagões que está saindo do pátio (**Assign**). Caso contrário, a entidade é duplicada (**Separate**), a quantidade de vagões transportada é dividida pela metade (**Assign**) e cada entidade irá transportar o valor correspondente, ou seja, somando-se a quantidade de vagões que cada entidade transporta teremos o valor total que foi sorteado no início do processo. A entidade ocupa o recurso seguinte (**Seize**), e é atribuída a uma variável a quantidade de vagões que está saindo do pátio (**Assign**).

Figura 5.7: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada para as demandas tipo 1 e 2 – passo 2

Para o tipo de demanda 3, o procedimento é análogo. É feita a verificação em relação ao sentido do vagão (**Decide**), entretanto, ao invés de duplicar a entidade, ela é multiplicada 86 vezes (**Separate**), que é a quantidade de vagões que chegam por vez. A entidade original sai do sistema (**Dispose**), enquanto que as demais são agrupadas em lotes de 12 unidades (**Batch**), que é a quantidade de vagões que descem a Cremalheira

por ciclo, e então se ocupa o recurso imaginário (**Seize**) e atribui-se a uma variável a quantidade de vagões que está saindo do pátio (**Assign**).

Figura 5.8: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada para a demanda tipo 3 – passo 2

Para as demandas tipo 4 a 6, o procedimento é bem semelhante ao apresentado na figura 5.8, no entanto são desprezados os blocos **Separate**, **Batch** e **Dispose**. Uma vez que a quantidade máxima de vagões por chegada para esses tipos é 45, todos os vagões podem descer em uma única viagem. Conforme apresentado no capítulo 3, a limitação encontrada é em relação ao comprimento máximo do trem, o que significa que podem ser transportados até 15 vagões por dupla de locomotiva, e como existem 3 duplas de locomotivas, 1 viagem é suficiente para transportar todos os vagões.

Verifica-se, então a capacidade do pátio seguinte (**Hold**) e uma vez atingida a condição especificada (capacidade estática do pátio tem que ser maior que o número de unidades ocupadas acrescido da quantidade de vagões que está entrando) aloca-se a locomotiva responsável pelo transporte (**Allocate**), e verifica-se sua localização (**Decide**).

Se a locomotiva estiver no mesmo local da carga que está solicitando transporte, o trecho de linha férrea até o pátio seguinte é ocupado (**Seize**) e aloca-se um tempo de operação de engate da locomotiva aos vagões (**Delay**); caso contrário ocupa-se o trecho, solicita-se o movimento da locomotiva para o pátio em que estão as cargas que necessitam de transporte (**Move**) e então é realizado o engate da locomotiva.

As operações de verificação e ocupação dos trechos são muito importantes, uma vez que a malha ferroviária em estudo é formada em grande parte por trechos de linha singela, o que significa que apenas 1 trem pode ocupar cada trecho por vez. Através dessas operações evita-se que dois trens ocupem o mesmo trecho ao mesmo tempo.

Figura 5.9: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada – passo 3

Decorrido o tempo de engate da locomotiva, o pátio é liberado na quantidade de vagões correspondentes (**Release**) e os vagões são transportados pela locomotiva para o pátio seguinte (**Transport**).

Figura 5.10: Lógica do modelo para as atividades nos pátios de entrada– passo 4

5.1.1.2 Ocupação dos pátios intermediários

Ao chegar no pátio seguinte (**Station**), o sentido das cargas e a quantidade de vagões transportados são verificados (**Decide**), ocupa-se o pátio na quantidade de vagões correspondentes (**Seize**) e liberam-se os trechos e o recurso imaginário ocupado anteriormente (**Release**). Esta liberação só é feita neste instante para garantir que a variável que contém a quantidade de vagões que saíram do pátio anterior permanece com o valor correspondente até a chegada da entidade no pátio seguinte, uma vez que nenhuma outra entidade poderá ocupar o recurso e seguir a sequência dos blocos antes da liberação do mesmo.

Figura 5.11: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 1

É feita a liberação da locomotiva que havia sido alocada (**Free**), atribui-se algum tempo para a realização de alguma atividade que seja necessária (**Delay**), e então se aloca a locomotiva que fará o transporte das cargas para o pátio seguinte (**Allocate**), caso seja necessário.

É feita, então a verificação em relação à localização da locomotiva (**Decide**), e se a locomotiva estiver no mesmo local da carga que está solicitando transporte, ocupa-se trecho de linha férrea até o pátio seguinte (**Seize**); caso contrário ocupa-se o trecho (**Seize**) e solicita-se o movimento da locomotiva para o pátio em que estão as cargas que necessitam de transporte (**Move**).

Figura 5.12: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 2

Só após a ocupação do trecho, é alocado um tempo para o engate da locomotiva (**Delay**), libera-se o pátio da quantidade de vagões especificada (**Release**), e então é feito o transporte dos vagões para o pátio seguinte.

Figura 5.13: Lógica do modelo para as atividades nos pátios intermediários – passo 3

No pátio Perequê especificamente, é verificado se os pátios Conceiçãozinha ou Valongo atingiram sua capacidade máxima de ocupação, e caso isso tenha ocorrido é enviada uma locomotiva vazia para retirar os vagões que se encontram nesses pátios.

Esse procedimento é realizado até que os vagões cheguem ao último pátio da sequência.

Para a demanda tipo 3, além de todas as etapas descritas, deve-se esperar a chegada de todo o lote a ser entregue na Cosipa, composto de 22 vagões, uma vez que em 1 viagem são transportados apenas 12 vagões.

5.1.1.3 Ocupação dos pátios terminais

Ao chegar no último pátio da sequência (**Station**), o tipo de demanda e o sentido das cargas são verificados novamente (**Decide**) e ocupa-se o pátio na quantidade de vagões correspondentes (**Seize**).

Figura 5.14: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 1

É realizada uma verificação para saber se existem vagões de retorno no pátio, ou seja, se existem no pátio vagões vazios ou carregados que retornaram após o processamento nos terminais (**Decide**). A partir daí, dá-se início ao processo de retornos dos vagões. A lógica utilizada é a duplicação da entidade que está no sentido exportação, e dessa forma a entidade original segue o caminho exportação, enquanto que a duplicada recebe os atributos correspondentes a entidade que espera o retorno e segue a lógica no sentido importação. A duplicação da entidade é apenas um mecanismo para possibilitar o retorno dos vagões.

Se existirem vagões de retorno, a entidade é duplicada (**Separate**), a entidade original irá registrar o tempo de viagem entre os pátios (**Record**), aloca-se um tempo para atividades no pátio (**Delay**), e direciona-se a entidade para os terminais (**Route**); enquanto isso, a entidade duplicada irá ocupar um recurso imaginário com capacidade de 1 unidade e posteriormente irá receber os atributos dos vagões de retorno (**Seize**).

Se não existirem vagões de retorno, a entidade também é duplicada (**Separate**), e a entidade original irá registrar o tempo de viagem entre pátios (**Record**), enquanto a duplicada irá mover a locomotiva de volta ao pátio anterior (**Move**), liberar a

locomotiva (**Free**) e o trecho ocupado (**Release**), e será retirada do sistema (**Dispose**). A entidade precisa ser duplicada porque a locomotiva não se move sem que seja requisitada por uma entidade, e caso isso não fosse feito a locomotiva ficaria parada até ser requisitada por alguma entidade.

Figura 5.15: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 2

A partir daí a entidade é direcionada aos terminais (**Station**), ocupa os mesmos e demora um determinado tempo para descarregamento e/ou carregamento de vagões (**Process**). É atribuído à entidade um novo sentido, uma vez que ele retornará ao sistema como importação (**Assign**), a capacidade do pátio é verificada (**Hold**), os terminais são liberados (**Release**), e então a entidade é direcionada de volta para o pátio (**Route**).

Figura 5.16: Lógica do modelo para as atividades nos terminais

Ao retornar ao pátio (**Station**), novamente são feitas as verificações em relação ao tipo de demanda e ao sentido do trem (**Decide**), apresentado na figura 5.14, e dessa vez a entidade segue pelo sentido importação, lógica 3. O pátio é ocupado na quantidade de vagões correspondentes (**Seize**), é atribuída à uma variável a quantidade de vagões do retorno (**Assign**), e espera-se o sinal de que os vagões do retorno estão sendo levados de volta (**Hold**) para então retirar a entidade do sistema (**Dispose**). O sinal só é emitido após a entidade seguir a lógica 4 da figura 5.15, que é explicada logo a seguir.

Figura 5.17: Lógica do modelo para as atividades no pátio terminal – passo 3

5.1.2 Sentido Importação

Nesta parte recomeça o processo da entidade duplicada no instante em que foi verificado que havia vagões para retorno, lógica 4 da figura 5.15.

A partir daí, ocupa-se o recurso imaginário (**Seize**), atribui-se à entidade a quantidade de vagões que retornam (**Assign**), atribui-se um tempo de engate à locomotiva (**Delay**), libera-se o pátio da quantidade de vagões correspondentes (**Release**), dá-se o sinal que os vagões do retorno estão sendo levados de volta (**Signal**), e transporta-se a entidade de volta ao pátio anterior (**Transport**). Somente após a emissão deste sinal é que as entidades que aguardam no **Hold** da figura 5.17 saem do sistema.

Figura 5.18: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 1

Ao voltar para o pátio anterior, novamente é feita a verificação apresentada na figura 5.11, e dessa vez a entidade segue pela lógica 2 (sentido importação). Ocupa-se o pátio na quantidade de vagões especificada (**Seize**), liberam-se os trechos anteriormente ocupados (**Release**), libera-se a locomotiva (**Free**), determina-se um determinado tempo para realização de atividades no pátio (**Delay**), e finalmente aloca-se a locomotiva para o transporte para o pátio seguinte (**Allocate**).

Figura 5.19: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 2

Verifica-se se a locomotiva encontra-se no mesmo local que os vagões (**Decide**). Se isso for verdadeiro, ocupa-se o trecho de linha férrea para ser possível o transporte para o pátio seguinte (**Seize**), caso contrário ocupa-se o trecho (**Seize**), move-se a locomotiva para esse pátio (**Move**), e só então é realizado o engate da locomotiva (**Delay**), liberado o pátio na quantidade de vagões correspondentes (**Release**), e transportados os vagões (**Transport**).

Figura 5.20: Lógica do modelo para o retorno dos vagões – passo 3

Esse procedimento é realizado até que os vagões cheguem novamente ao primeiro pátio da sequência.

Ao voltar ao pátio de entrada, novamente é feita a verificação apresentada na figura 5.6, segue-se para a figura 5.7, e dessa vez a entidade segue pela lógica 1. Verifica-se a quantidade de vagões transportados (**Decide**), ocupa-se o pátio na quantidade de vagões correspondentes (**Seize**) e libera-se o trecho de linha férrea (**Release**) e a locomotiva ocupados anteriormente (**Free**).

Figura 5.21: Lógica do modelo para retorno dos vagões – passo 4

É verificado se apenas uma viagem foi suficiente para o transporte do lote de vagões (**Decide**); se isso for verdadeiro os vagões aguardam um tempo até que sejam realizadas operações de inspeção nos vagões e/ou abastecimento das locomotivas (**Delay**); registra-se a quantidade de vagões no sentido importação (**Record**); libera-se o pátio da quantidade de vagões correspondente (**Release**); e então a entidade sai do sistema (**Dispose**). Caso contrário, espera-se a chegada de todo o lote (**Batch**) para então seguir o mesmo procedimento.

Figura 5.22: Lógica do modelo para retorno dos vagões – passo 5

A lógica apresentada foi utilizada para representar o transporte de todas as cargas entre os pátios da Baixada Santista, havendo apenas algumas sutis diferenças em relação à quantidade de trechos a serem ocupados de um pátio a outro, ao processo de liberação dos mesmos, e à quantidade de vagões a serem transportados pelas locomotivas em determinados trechos.

6 VALIDAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO PARA AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS ATUAIS

O objetivo deste capítulo é a validação do modelo, apresentado no capítulo anterior para as condições operacionais atuais do sistema ferroviário da Baixada Santista, levando-se em consideração a demanda e os tempos de atendimento atuais.

A validação do modelo de simulação é um passo bastante importante e, de acordo com PEGDEN *et al* [1995] a validação é o processo pelo qual pretende-se alcançar um nível aceitável de confiança nas premissas adotadas no modelo, de modo que elas sejam corretas e aplicáveis ao mundo real.

Conseqüentemente, o primeiro passo é checar se a representação da operação de todo o sistema é precisa o bastante para reproduzir as trajetórias futuras do sistema com um adequado grau de confiança. A princípio, dados do sistema real são analisados segundo uma série de critérios técnicos que norteiam a construção do modelo para assegurar, a priori, uma especificação ajustada ao problema em análise. Uma vez terminada esta fase, alimenta-se o modelo com os dados de campo obtidos, e a simulação é validada comparando-se os resultados com as correspondentes medidas reais do sistema através dos testes estatísticos apropriados [BOTTER, 2002].

Uma vez que havia a disponibilidade de dados diários do mês de abril do ano de 2002 sobre o intervalo de tempo entre chegadas sucessivas, e quantidade de vagões movimentados no pátio Perequê no sentido exportação, validou-se o modelo a partir dos mesmos. Uma vez que as demandas da MRS, tanto de minério quanto de contêineres, são praticamente constantes ao longo do ano, não sofrem o efeito da sazonalidade; em relação à demanda da Brasil Ferrovias, a análise realizada já está considerando um pico

operacional. Dessa forma, a escolha do mês de Abril de 2002 para validação do modelo mostra-se bastante apropriada.

As distribuições obtidas no capítulo 4 foram utilizadas como dados de entrada tanto para validação do modelo, quanto na geração dos cenários alternativos apresentados no próximo capítulo.

De acordo com FREITAS FILHO [2001], um número razoável de replicações para a maioria dos problemas é 10, e não mais do que 20 devem ser realizadas, uma vez que acima deste valor as melhorias apresentadas pela estatística t são mínimas. Então, a princípio foram realizadas 10 replicações, com duração de 800 horas e eliminação dos dados de uma fase de transição de 80 horas, resultando um período útil de simulação de 720 horas que corresponde aos 30 dias do mês de abril.

Os resultados gerados pelo modelo para o semi-intervalo de confiança, h , das variáveis em estudo, quantidade de vagões e ocupação máxima do pátio Perequê, foram analisados e comparados com os valores médios obtidos. É comum que se busque intervalos de confiança para os quais o valor de h seja menor ou igual a 10% da média amostral e, caso essa condição não seja observada, um maior número de replicações devem ser realizadas [FREITAS FILHO, 2001]. Uma vez que com 10 replicações essa condição não foi alcançada, este valor foi sendo recalculado até que se conseguiu fixar em 21 o número de replicações a serem realizadas.

6.1 Análise dos Resultados

6.1.1 Quantidade de Vagões

Em relação à quantidade de vagões processados por destino, o modelo mostra-se bastante representativo, uma vez que os resultados são bem próximos do observado na operação real, como pode ser visto na Figura 6.1.

Os erros encontrados para a movimentação da margem esquerda e da Cosipa, foram respectivamente 6% e 23%, e para margem direita em bitola larga foi praticamente zero. Embora o erro máximo para Cosipa tenha sido razoável, pode-se considerar que, por esta demanda ser bem menor que as demais e dessa forma não

influenciar tanto a operação, e também devido às limitações na obtenção de dados para a calibração do modelo e objetivos pretendidos com a pesquisa, este valor parece razoável.

Figura 6.1: Movimento de vagões em Abril de 2002

6.1.2 Ocupação Máxima do Pátio Perequê

De acordo com o modelo, a média da ocupação máxima do Perequê para os vagões no sentido exportação foi de 171 vagões, enquanto que o máximo observado nos dados disponíveis foi 178 vagões, o que corresponde a uma diferença de apenas 7 vagões e um erro de aproximadamente 4% (Figura 6.2).

Figura 6.2: Ocupação máxima do Perequê em Abril de 2002

Ainda em relação ao Perequê, verifica-se na Figura 6.3 que a ocupação máxima obtida através do modelo varia do mínimo de 131 vagões a um máximo de 263, sendo o desvio correspondente de 26% e 47% respectivamente.

Figura 6.3: Comparação entre valores de ocupação máxima

Embora o valor em termos de quantidade de vagões apresente uma diferença grande, na prática corresponde à chegada de um trem a mais ou a menos em determinado horário, o que é algo bem possível de ocorrer.

Uma possível explicação para o ocorrido são as distribuições empregadas tanto para a quantidade de vagões, quanto para o intervalo entre chegadas. No caso da quantidade de vagões observa-se que são gerados trens maiores do que o observado nos dados reais, e para o intervalo de tempo entre chegadas, o emprego de uma distribuição exponencial faz com que haja a probabilidade do intervalo entre chegadas sucessivas ser igual a zero, ou muito pequeno, o que, na prática, é impossível de acontecer.

Isso não quer dizer que as distribuições empregadas estejam erradas, visto que elas representam uma tendência comportamental das variáveis analisadas, mas não necessariamente o seu comportamento real. Qualquer operação sempre demanda um intervalo de tempo mínimo entre chegadas, determinado pelas distâncias de segurança entre dois trens sucessivos em uma mesma linha.

Dada a impossibilidade de validar o modelo para os outros pátios do sistema, nesta pesquisa prospectiva admitir-se-á a hipótese de que o modelo também representa de forma coerente a ocupação dos outros pátios do sistema.

Embora a ocupação dos demais pátios não sirva para o propósito de validação do modelo, a Figura 6.4 apresenta, a critério de ilustração, o comportamento observado nos demais pátios da Baixada Santista.

Figura 6.4: Ocupação máxima dos demais pátios para Abril de 2002

Em que:

Paran D e R_Serra D – correspondem respectivamente à parte dos pátios Paranapiacaba e Raiz da Serra em que ficam as cargas no sentido exportação;

Paran S e R_Serra S – correspondem respectivamente à parte dos pátios Paranapiacaba e Raiz da Serra em que ficam as cargas no sentido importação;

Como pode ser visto, alguns pátios atingiram sua capacidade máxima de ocupação. Este fato, entretanto, não causou comprometimento da operação do sistema, havendo uma redução em suas ocupações decorrido algum tempo após o máximo ter sido alcançado.

De acordo com os resultados apresentados pelo modelo, podemos considerar que o modelo proposto é válido e representa de forma aceitável o fenômeno. São criados, a seguir, cenários alternativos visando análises prospectivas da operação ferroviária na Baixada Santista.

7 GERAÇÃO DE RESULTADOS PARA CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Neste capítulo são gerados 5 cenários alternativos para as condições operacionais na Baixada Santista:

- 1 Transferência da demanda do Estuário para o Valongo – como apresentado no capítulo 4, está prevista a transferência das cargas da margem direita, de bitola estreita para bitola larga (Estuário - Valongo) devido à interferência urbana. Conseqüentemente, haverá aumento do volume de cargas para o Pátio Perequê;
- 2 Substituição da demanda de minério para Cosipa por cargas destinadas ao Porto de Santos – este é um outro cenário real a ser estudado, uma vez que o projeto de construção do sistema de correias transportadoras implicará a liberação de capacidade de tráfego na Cremalheira para cargas com destino ao Porto de Santos;
- 3 Casos 1 e 2 juntos - Transferência da demanda do Estuário para o Valongo e substituição da demanda de minério para Cosipa por cargas destinadas ao Porto de Santos;
- 4 Aumento da demanda de trens por dia da Brasil Ferrovias;
- 5 Casos 3 e 4 juntos - Aumento da demanda da Brasil Ferrovias, transferência da demanda do Estuário para o Valongo e substituição da demanda de minério para Cosipa por cargas destinadas ao Porto de Santos.

Na análise de todos os cenários, considerou-se a forma das distribuições de probabilidade da quantidade de vagões por destino e do intervalo de tempo entre

chegadas sucessivas, como sendo as obtidas através do *Input Analyzer*, e apresentadas no capítulo 4, como se mantendo inalteradas.

Para cada cenário foram realizadas 21 replicações com duração de 800 horas e eliminação dos dados de uma fase de transição de 80 horas, resultando um período útil de simulação de 720 horas correspondente a um período de 30 dias, conforme apresentado no capítulo 6. Adicionalmente a essas 21 replicações, foi realizada uma replicação mais longa, com duração de 7200 horas, com o propósito de verificar se o sistema se comportava de forma estável ao longo do tempo.

Nos cenários em que foi considerado aumento na demanda para o Porto de Santos, admitiu-se que não haveria nenhuma restrição em relação à capacidade dos terminais que receberiam as cargas provenientes da ferrovia.

7.1 Cenário 1

O cenário 1 considerou a transferência das cargas do Estuário para o Valongo. Para viabilizar essa mudança, a Brasil Ferrovias está pleiteando o reparo da segunda linha que vai do Perequê ao Valongo, representada como ramal futuro na figura 3.2.

O propósito deste reparo seria a preservação do regime de tráfego em que as cargas estão sendo transportadas, uma vez que as cargas da Brasil Ferrovias que vão para a margem direita em bitola estreita estão em regime de *track right*, enquanto as que vão para margem direita em bitola larga encontram-se em regime de tráfego mútuo com a MRS.

No cenário 1, entretanto, partiu-se da hipótese de que as condições operacionais seriam mantidas, ou seja, considerou-se a utilização de apenas 1 linha singela ligando o Perequê ao Valongo, sem o reparo da segunda linha, para que seja verificado se o mesmo é imprescindível, ou se é possível a utilização conjunta por parte das ferrovias do ramal atual que se encontra em bom estado operacional.

Considerou-se também que a locomotiva que fará o transporte dessas cargas tem capacidade suficiente para transportar todos os vagões em uma única viagem, o que significa que deverá haver a substituição da locomotiva existente por uma outra com maior capacidade.

Com a transferência das cargas do Estuário para o Valongo, espera-se que haja um aumento na utilização dos pátios Perequê e Valongo, e também dos trechos por onde essa carga irá passar. Os resultados obtidos com este cenário são apresentados a seguir.

Em relação à ocupação média dos pátios para as 21 replicações realizadas, houve um aumento de 15% no Perequê, 17% no Valongo, e 13% no Paratinga (Figura 7.1). Os aumentos relacionados à ocupação do Perequê e do Valongo devem-se a um acréscimo na demanda, enquanto que no Paratinga provavelmente ao acréscimo do tempo de espera decorrente da necessidade de ocupar a linha férrea entre os pátios Paratinga e Perequê, o que não ocorria anteriormente, visto que a demanda que destinava-se ao Estuário não passava pelo Perequê.

Figura 7.1: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 1.

No que diz respeito à ocupação máxima dos pátios, mostrada na Figura 7.2, não houve um aumento expressivo como era esperado, e isto provavelmente deve-se ao fato da quantidade de vagões transportadas por cada locomotiva ser sorteada aleatoriamente pelo programa, conforme apresentado no início deste capítulo, e principalmente pelo baixo valor da demanda que anteriormente tinha como destino o Estuário. Observa-se também que a ocupação máxima dos pátios é bastante elevada, e em alguns casos atinge sua capacidade.

Figura 7.2: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 1

Comparando-se os resultados entre a média dos valores máximos e o máximo dos máximos alcançado em cada pátio, mostrados na Figura 7.3, verifica-se que não há uma variação muito significativa na maioria dos pátios, com exceção do Paratinga.

Figura 7.3: Comparação entre a média dos máximos e o máximo atingido na ocupação dos pátios do cenário 1

Um ponto importante a ser observado é que, a aproximadamente 4 km a montante do pátio Paranapiacaba, existe o pátio de Campo Grande que é responsável pela

alimentação do sistema da MRS. Logo, embora a área do pátio Paranapiacaba em que ficam as cargas no sentido exportação, Paran D, tenha atingido sua capacidade, este fato não compromete a operação do sistema.

Em relação à utilização dos trechos. Verifica-se que os trechos que passam maior parte do tempo ocupados são os trechos 1 e 12, que correspondem respectivamente aos trechos do Paratinga ao Perequê, e à Cremalheira, localizados respectivamente na área de entrada dos vagões da Brasil Ferrovias e da MRS. Devido a isso, é possível que com o aumento da demanda eles venham a constituir um gargalo operacional, ressaltando-se que atualmente a Cremalheira já é um gargalo à operação da MRS.

A Figura 7.4 mostra a utilização de todos os trechos, e a Figura 7.5 mostra de forma mais clara o aumento na utilização dos trechos 1, 2, 9 e 10, que correspondem respectivamente aos trechos entre o Paratinga e o Perequê, entre o Perequê e a bifurcação para margem direita e esquerda, entre esta bifurcação e Cubatão, e entre Cubatão e Valongo. Os valores são apresentados em porcentagem, e como pode ser observado o trecho 1 apresenta uma taxa de utilização bastante elevada.

Figura 7.4: Variação na utilização dos trechos – cenário 1

Figura 7.5: Variação na utilização de alguns trechos – cenário 1

De acordo com os resultados gerados pelo modelo, pode-se considerar que o sistema operacional da Brasil Ferrovias tem condições de viabilizar a mudança proposta neste cenário, e ainda processar um maior volume por ferrovia sem que sejam necessárias intervenções nos recursos, uma vez que a capacidade dos mesmos não foi atingida.

Também se observa que o reparo da segunda linha não é imprescindível, visto que os trechos 9 e 10 que é por onde passam as cargas que se destinam ao Valongo não apresentam uma elevada taxa de utilização.

Em relação à capacidade operacional da MRS, verificou-se que sua capacidade encontra-se comprometida pela utilização da Cremalheira, que é o grande gargalo operacional desse sistema.

Comparando-se os resultados das 21 replicações com duração útil de 720 horas, com os da replicação com duração de 7200 horas, verificou-se que o sistema se comporta de forma estável ao longo do tempo, não sendo observada nenhuma mudança significativa no padrão comportamental do sistema.

7.2 Cenário 2

O cenário 2 considerou a construção de um sistema de correias transportadoras para o transporte do minério destinado à Cosipa. Isso ocasionará uma enorme redução no tráfego da Cremalheira, abrindo espaço para o transporte de cargas para o Porto de Santos. No entanto, ainda não estão sendo divulgadas informações a respeito das características deste sistema, nem seu horizonte de implantação.

De acordo com as informações colhidas na Cosipa em abril de 2003, sabe-se apenas que o projeto está pronto e em fase de licenciamento ambiental, visando a avaliação dos impactos ambientais e esperando aprovação do EIA/RIMA. Somente após a aprovação do projeto, que deve demorar aproximadamente uns 7 meses, é que será possível dar início às obras.

Considerou-se que a demanda atual de minério será revertida em cargas para o Porto de Santos na proporção de 50% para a margem direita e 50% para a margem esquerda. Em relação à quantidade de vagões por trem e ao intervalo de tempo entre chegadas, considerou-se que nesta nova demanda cada trem é composto de 43 vagões e que o intervalo de tempo entre chegadas é de 6 horas.

Alterou-se a capacidade dos pátios Paranapiacaba, Raiz Serra e Piaçaguera, uma vez que se considerou que o comprimento médio dos vagões seria de 17m, ou seja, o mesmo das cargas da Brasil Ferrovias. Por fim, foi considerada a existência de 2 locomotivas para fazer o transporte dessas cargas, uma vez que a locomotiva responsável pelo transporte do minério entre os pátios Raiz da Serra e Piaçaguera ficaria ociosa.

Com a substituição das cargas, são esperadas alterações na ocupação dos Pátios Conceiçãozinha, Valongo, Paranapiacaba, Raiz da Serra e Piaçaguera, bem como um aumento na utilização dos trechos por onde essa carga irá passar. Os resultados obtidos foram comparados com os da configuração atual, e são mostrados a seguir.

Observa-se que houve um aumento na ocupação média da maioria dos pátios; no entanto, houve uma diminuição em Paranapiacaba e Raiz da Serra, tanto na parte do pátio sentido exportação, quanto importação (Figura 7.6). Essa redução deve-se à

diminuição no tamanho médio da composição, uma vez que os trens de minério eram compostos por 86 vagões e nesse novo cenários os trens são compostos por 43 vagões.

Também se observa um aumento na ocupação do Perequê, que decorre de uma maior utilização dos ramais ferroviários entre o Perequê e Conceiçãozinha, e entre o Perequê e Valongo, o que causa um aumento no tempo de espera neste pátio e conseqüente maior ocupação média.

Figura 7.6: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 2

Em relação à ocupação máxima dos pátios, Figura 7.7, verifica-se uma tendência de aumento. No entanto, como explicado anteriormente, a ocupação máxima é função da quantidade de vagões sorteada pelo programa e da aleatoriedade inerente ao processo. De acordo com a figura 7.7, observa-se que os pátios Conceição e Valongo atingiram valores bem próximos da capacidade máxima em alguma das 21 replicações, o que não comprometeu o sistema, uma vez que no final das 800 horas de simulação existiam respectivamente 65 e 47 vagões em cada pátio.

Figura 7.7: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 2

Também neste cenário constata-se que não há uma variação significativa entre a média dos valores máximos e o máximo dos máximos alcançado na ocupação da maioria dos pátios, com exceção do Paratinga, como mostrado na Figura 7.8.

Figura 7.8: Comparação entre a média dos máximos e o máximo alcançado na ocupação dos pátios – cenário 2

Os resultados obtidos para a utilização dos trechos mostram uma tendência ao aumento (Figura 7.9). Entretanto, observa-se uma grande diminuição na utilização da

Cremalheira, trecho 12, devido ao aumento na quantidade de vagões transportados por ciclo de operação e conseqüente menor utilização do trecho.

Figura 7.9: Variação na utilização dos trechos – cenário 2

No transporte do minério, devido a restrições na capacidade das locomotivas, limitava-se o transporte em apenas 4 vagões por dupla de locomotiva. No entanto considerando as condições do cenário 2, ou seja, a substituição da demanda de minério por cargas destinadas ao Porto de Santos, a restrição encontrada é em relação ao comprimento máximo da composição, o que possibilita o transporte de até 15 vagões por dupla de locomotiva.

Em relação ao cenário 2, pode-se concluir que a implementação de um sistema de correias transportadoras e conseqüente substituição da demanda de minério para Cosipa por cargas destinadas ao Porto de Santos, traria uma grande diminuição na utilização da Cremalheira, fazendo com que este trecho deixe de ser um gargalo para a operação da MRS e passe a permitir expansão da demanda em termos de vagões movimentados por dia.

Uma análise comparativa entre os resultados das 21 replicações com os da simulação com longa duração, mostrou que o sistema se comporta de forma estável e sem grandes alterações nas taxas de ocupação dos pátios, e utilização dos trechos.

7.3 Cenário 3

O cenário 3 considerou a operação conjunta dos cenários 1 e 2, explicados anteriormente.

Neste novo cenário, houve um aumento na ocupação média dos pátios Paratinga, Perequê, Conceição e Valongo, como também observado no cenário 2, e uma diminuição nos pátio Paranapiacaba, Raiz da Serra e Piaçaguera como pode ser visto na Figura 7.10. Observa-se também que a ocupação média do pátio Conceiçãozinha quase que duplicou em relação ao cenário 1.

Figura 7.10: Variação na ocupação média dos pátios – cenário 3

A Figura 7.11 mostra uma tendência ao aumento da ocupação máxima dos pátios, e que os pátios Conceiçãozinha e Valongo novamente atingiram valores bem próximos aos de suas capacidades máximas. Da mesma forma que para o cenário 2, não houve comprometimento da operação do sistema. Ao término do período de simulação, na replicação em que o máximo foi alcançado existiam, 45 vagões em Conceição e 165 no Valongo.

Figura 7.11: Variação na ocupação máxima dos pátios – cenário 3

Comparando-se o padrão comportamental entre as médias da ocupação máxima e o máximo alcançado nas 21 replicações, verifica-se a repetição do mesmo, não havendo nenhuma grande diferença entre esses valores (Figura 7.12).

Figura 7.12: Comparação entre a média dos máximos e o máximo alcançado na ocupação dos pátios – cenário 3

Com a operação conjunta dos cenários 1 e 2, os trechos que sofrem maior impacto são o 9 e o 10, uma vez que passam a ter uma maior utilização que as observadas nos cenários 1 ou 2 isoladamente (Figura 7.13). Essa é uma constatação esperada, uma vez

que esses trechos passariam a ser mais utilizados, devido ao aumento na demanda para margem direita das cargas transportadas pela MRS e pela Brasil Ferrovias.

Figura 7.13: Variação na utilização dos trechos – cenário 3

Pode-se concluir em relação ao cenário 3 que as mudanças propostas causarão um considerável impacto no sistema, embora não venha causar sua saturação.

Os trechos de linha férrea de número 4, 5, 6, 7 e 8, localizados entre os pátios Perequê e Conceiçãozinha, apresentam uma utilização bastante elevada, podendo vir a comprometer a operação do sistema.

Comparando-se os resultados obtidos com a simulação mais longa e com as 21 replicações mais curtas, não foi constatada nenhuma alteração significativa no comportamento do sistema, o que comprova sua estabilidade ao longo do tempo.

7.4 Cenário 4

O cenário 4 considerou a possibilidade de aumento da demanda de trens por dia da Brasil Ferrovias mantendo-se as condições operacionais atuais, ou seja, sem as alterações propostas nos cenários 1 e 2.

O aumento na demanda proposto considerou acréscimos de 10%, 20%, 50% e 60% através de uma redução gradual do intervalo de tempo entre as chegada sucessivas dos trens. Dessa forma seria possível uma análise comparativa do efeito de cada uma

dessas reduções. A Tabela 7.1 apresenta as distribuições empregadas em cada um dos 3 casos.

Tabela 7.1: Intervalo de tempo entre chegadas para o cenário 4

Aumento na Demanda	Fator Multiplicador do Intervalo entre Chegadas	Distribuição para Margem Direita em Bitola Estreita	Distribuição para os Demais Destinos
10%	$1/(1 + 0.1) = 0.91$	TRIA (30.9, 32.7, 34.5)	EXPO (3.62)
20%	$1/(1 + 0.2) = 0.83$	TRIA (28.3, 30,31.7)	EXPO (3.32)
50%	$1/(1 + 0.5) = 0.67$	TRIA (22.7, 24,25.3)	EXPO (2.65)
60%	$1/(1 + 0.6) = 0.63$	TRIA (21.3, 22.5, 23.8)	EXPO (2.49)

Analisando-se a Figura 7.14, verifica-se que o pátio que sofreu um maior impacto com a redução do intervalo de tempo entre chegadas foi o Paratinga. Este fato é facilmente explicável, uma vez que todos os vagões da Brasil Ferrovias chegam na Baixada Santista através desse pátio e aí permanecem até que seja possível seu envio para o pátio seguinte.

Observa-se também uma diminuição na ocupação média do Estuário. Visto que esse pátio é utilizado apenas para um tipo de demanda, e que os vagões vazios só retornam ao sistema após a chegada de uma nova remessa de vagões carregados, reduzindo-se o intervalo entre chegadas os vagões esperariam um menor tempo nos pátios, e conseqüentemente reduzindo sua ocupação.

Figura 7.14: Variação na ocupação média dos pátios para aumentos de até 20% na demanda – cenário 4

Em relação à ocupação máxima dos pátios, observa-se na Figura 7.15, que houve um aumento nos pátios Paratinga, Perequê, Conceiçãozinha e Valongo, e que se encontra de acordo com que era previsto.

Figura 7.15: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumentos de até 20 % na demanda- cenário 4

Analisando-se a Figura 7.16, nota-se que o trecho 1, localizado entre os pátios Paratinga e Perequê, apresenta um elevado grau de utilização, vindo este fator comprometer a operação para aumentos de demanda superiores a 20%.

Figura 7.16: Variação na utilização dos trechos para aumentos de até 20% na demanda cenário 4

Durante as 21 replicações realizadas, para aumentos na demanda em até 20%, não foi observado nenhum comportamento fora do padrão esperado e o sistema se manteve estável. O mesmo foi observado para a replicação com maior duração.

Ao tentar aumentar a demanda em 50%, e mantendo-se as condições operacionais atuais, verificou-se que o sistema congestionou para um período de simulação de aproximadamente 115 horas devido a restrições na utilização do trecho 1, que chegou a saturar, ou seja, utilização superior a 0.99.

Embora o trecho 1 aparentasse estar completamente saturado, o que ocorreu de fato foi uma má utilização do mesmo, devido a restrições na capacidade da locomotiva responsável pelo transporte dos vagões. Considerando-se, que existam condições para aquisição de locomotivas com maior potência a situação mostra-se um pouco diferente.

Dessa forma, as avaliações efetuadas para os casos em que o aumento de demanda é superior a 50% irá admitir que não existem restrições em relação à capacidade da locomotiva.

Para essa nova situação em estudo, verifica-se na Figura 7.17, que todos os pátios por onde circulam as cargas da Brasil Ferrovias tiveram um aumento em sua ocupação média.

Figura 7.17: Variação na ocupação média dos pátios para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4

Em relação à ocupação máxima dos pátios, verifica-se na Figura 7.18 que o Paratinga, o Perequê e o Valongo atingiram picos bem próximos da capacidade, o que entretanto não comprometeu a operação do sistema durante as 800 horas de simulação.

Figura 7.18: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4

A Figura 7.19 mostra a utilização dos trechos para os casos em que se considera aumento na demanda em 50% e 60%. Observa-se que todos os trechos por onde passam

as cargas da Brasil Ferrovias estão com uma utilização bastante elevada, com exceção do trecho 11, por onde passa apenas a demanda em bitola estreita para margem direita, e que é muito baixa.

Figura 7.19: Variação na utilização dos trechos para aumento na demanda maior ou igual a 50% - cenário 4

Ao comparar os resultados das 21 simulações de menor duração, com a de maior duração constata-se a estabilidade do sistema apenas para um aumento na demanda de 50%. No caso em que esse aumento é de 60%, a capacidade do pátio Paratinga passa a ser um fator limitante à operação, causando o término da simulação para um período de 2.460 horas.

Em relação ao cenário 4, conclui-se que para aumento na demanda atual da Brasil Ferrovias em até 50%, o sistema responde de forma satisfatória, conseguindo comportar esse aumento. No entanto, a partir do momento em que se incrementa a demanda em 60%, a operação ferroviária na Baixada Santista apresenta-se bastante comprometida, apresentando restrição na capacidade dos pátios e uma elevada utilização dos ramais ferroviários.

Dessa forma, não é viável um aumento na demanda superior a 50% considerando as características operacionais atuais.

7.5 Cenário 5

O último cenário proposto considera um aumento na demanda de trens por dia da Brasil Ferrovias, levando-se em consideração as alterações propostas no cenário 3, ou seja, a substituição da demanda de minério para Cosipa por cargas destinadas ao Porto de Santos. O aumento na demanda foi realizado de forma semelhante ao proposto para o Cenário 4.

Ao se comparar os resultados deste cenário com os obtidos no cenário 3, verifica-se que houve um aumento na ocupação média de todos os pátios, sendo o impacto maior no Paratinga e no Perequê, o que já era esperado (Figura 7.20).

Figura 7.20: Variação na ocupação média dos pátios pra um aumento na demanda de 10% - cenário 5

Na Figura 7.21, observa-se uma tendência ao aumento na ocupação máxima dos pátios e em alguns casos praticamente atingindo a mesma, o que não comprometeu a operação, visto que o sistema conseguiu se restabelecer.

Figura 7.21: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento na demanda de 10% - cenário 5

O incremento na utilização dos trechos para um aumento de 10% na demanda, não é tão significativo como pode ser visto na Figura 7.22. No entanto, observa-se que o trecho 1 apresenta uma taxa de utilização bastante elevada, o que vem a ser um fator limitante ao aumento na demanda para um valor superior 10% como será mostrado a seguir.

Figura 7.22: Variação na utilização dos trechos para um aumento na demanda de 10% cenário 5

Comparando-se os resultados para diferentes períodos de simulação, para o caso de aumento na demanda em 10%, verificou-se que o sistema comporta-se de forma estável. No entanto, quando se tentou aumentar a demanda em 20%, ocorreu o mesmo problema encontrado no cenário 4 para aumento de demanda em 50%, sendo que no cenário 5 a simulação terminou em apenas 50 horas.

Realizou-se então, o mesmo procedimento adotado no cenário anterior, ou seja, adotou-se a hipótese de que não haveria restrição na capacidade da locomotiva, e efetuou-se a análise da operação ferroviária considerando um aumento de 20% na demanda.

A Figura 7.23 mostra que ao se desconsiderar a restrição em relação à capacidade da locomotiva, a ocupação média do Paratinga diminui bastante enquanto que a do Perequê aumenta. Isso era esperado uma vez que está havendo o transporte de uma maior quantidade de vagões em uma única viagem entre esses pátios.

Figura 7.23: Variação na ocupação média dos pátios pra aumento de 20% na demanda cenário 5

A mesma constatação é observada em relação à ocupação máxima dos pátios (Figura 7.24). Verifica-se também que o pátio Conceiçãozinha atingiu sua capacidade

máxima em alguma das 21 replicações, entretanto consegui se restabelecer visto que só havia 56 vagões ao fim do período de simulação.

Figura 7.24: Variação na ocupação máxima dos pátios para aumento de 20% na demanda – cenário 5

Em relação à utilização dos trechos, a Figura 7.25 mostra que houve um aumento na utilização de todos os trechos, e diminuição apenas no trecho 1 que foi onde se retirou a restrição em relação à capacidade da locomotiva.

Figura 7.25: Variação na utilização dos trechos para 20% de aumento na demanda cenário 5

Ao se comparar os resultados entre as 21 replicações menores, com a de maior duração comprovou-se a estabilidade do sistema para um longo período.

Ao se tentar incrementar a demanda em 50%, o sistema mostrou-se instável para um período de simulação mais longo, havendo restrição em relação à capacidade do Paratinga o que causou o término da replicação com 2968 horas de simulação.

Em relação ao cenário acima descrito, conclui-se ser possível o aumento da demanda em até 20%. Outro ponto importante a ser observado é a taxa de utilização dos trechos, que se encontra bastante elevada, o que compromete a operação tornando o sistema frágil ao surgimento de imprevistos.

8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho tem como objetivo uma análise prospectiva da operação ferroviária na Baixada Santista, levando-se em consideração a infra-estrutura atualmente disponível, as características operacionais vigentes e possíveis cenários futuros para um melhor aproveitamento da alternativa ferroviária, sendo utilizado como ferramenta o *software* de simulação ARENA.

O método proposto constou da caracterização da operação ferroviária, identificação das variáveis intervenientes, coleta e análise dos dados, construção e validação do modelo de simulação, geração de cenários alternativos e análise dos resultados.

As maiores dificuldades encontradas durante a realização deste trabalho, ocorreram na fase de coleta de dados devido à necessidade de realizar diversas viagens à Baixada Santista para conhecer a operação ferroviária, e principalmente na fase de aquisição dos dados necessários para construção do modelo de simulação.

Os resultados obtidos com o modelo para os cenários propostos mostram a viabilidade em se realizar as alterações propostas nos cenários 1 a 5, respeitando-se, é claro, os limites de cada um deles.

O cenário 1, que propõe a transferência da demanda do Estuário para o Valongo, aparentemente é o que causaria um menor impacto na operação ferroviária, visto que o efeito causado na ocupação dos pátios e na utilização dos trechos foi o menos relevante.

O impacto foi baixo devido às características atuais de demanda de cargas para o Estuário serem pouco significativas, pois caso a mesma fosse comparável às do Valongo, provavelmente seria observada uma ocupação bem mais elevada do Perequê e

dos ramais ferroviários. Também se observa que o reparo da segunda linha não é imprescindível, visto que os trechos 9 e 10 que é por onde passam as cargas que se destinam ao Valongo não apresentam uma elevada taxa de utilização.

No cenário 2 verifica-se que a construção de um sistema de correias transportadoras para realizar o transporte do minério diretamente para Cosipa, eliminando-se a utilização da Cremalheira, e a substituição da demanda de minério por cargas destinadas ao Porto de Santos, cria uma folga expressiva na Cremalheira, viabilizando um aumento de demanda por esse acesso.

Com a operação conjunta dos cenários 1 e 2, tanto os pátios quanto os ramais ferroviários passam a ter uma taxa de utilização bastante elevada, o que entretanto não causa a saturação do sistema.

No cenário 4, em que se propõe um aumento na demanda de trens por dia pelo acesso Mairinque-Santos da Serra do Mar, considerando a configuração operacional atual, verifica-se que é possível um aumento em até 50% na demanda atual, uma vez que, acima desse percentual passa-se a encontrar restrições na capacidade do pátio Paratinga. Também se observa que a utilização dos ramais entre os pátios Perequê e Conceiçãozinha, trechos 3, 4, 5, 6, 7 e 8 cresce bastante em relação à demanda atual, o que pode vir a constituir um gargalo operacional.

O cenário 5, ao propor a transferência da demanda do Estuário para o Valongo, a construção do sistema de correias transportadoras e o aumento na demanda de trens por dia da Brasil Ferrovias, verifica ser possível o aumento na demanda atual da Brasil Ferrovias em até 20%, visto que, acima desse percentual a operação ferroviária se complica e novamente é encontrada a restrição em relação à capacidade do pátio Paratinga.

Uma vez que o objetivo desta pesquisa visava uma análise prospectiva da operação ferroviária na Baixada Santista, pode-se concluir que o mesmo foi alcançado dentro das limitações impostas no decorrer da pesquisa. A simulação mostrou-se uma ferramenta viável para este propósito e em relação ao *software* ARENA, pode-se considera-lo de fácil manuseio e com uma interface amigável.

8.1 Recomendações

Como sugestão para continuação do trabalho, pode ser feita uma investigação a respeito da operação ferroviária a partir do momento em que os vagões chegam aos pátios que antecedem os terminais. Neste trabalho não foi considerado o processo de distribuição dos vagões para cada um dos terminais, o que também envolve o uso de locomotivas, linhas férreas e a capacidade de acúmulo e processamento de cada um dos terminais isoladamente.

Levou-se em conta que decorrido algum tempo da chegada dos vagões aos pátios que antecedem os terminais, eles seriam entregues aos mesmos, e retornariam ao sistema após um outro período de tempo; em relação aos terminais foi considerada uma grande área de acúmulo com capacidade suficiente para o recebimento dos vagões, ou seja, sem restrições de capacidade, o que na prática não é verdade. Decorre daí que todo o processo envolvido na distribuição dos vagões foi desconsiderado, bem como a capacidade de processamento de cada terminal isoladamente.

Um outro ponto que poderia ser aperfeiçoado é a calibração do modelo de simulação proposto. Para isto seria necessária a obtenção de uma maior quantidade de dados diários sobre a movimentação ferroviária na Baixada Santista, bem como a respeito da ocupação dos demais pátios do sistema, visto que só foram obtidos dados de um mês de operação e de um pátio. Um método de coleta de dados deveria ser elaborado em conjunto com as ferrovias envolvidas, e contando com a colaboração dos operadores de pátio, constando os horários de chegada e partida de cada trem aos pátios, bem como a quantidade de vagões transportada. Dessa forma seria possível determinar a ocupação de todos os pátios ao longo do tempo.

Uma investigação em relação ao comportamento do sistema caso não fossem encontradas restrições em relação à capacidade das locomotivas, bem como limitações de velocidade nos trechos, seria bastante interessante.

Também poderia aumentar-se a abrangência do sistema em estudo, de modo a englobar mais pátios, e em especial aqueles em que são realizadas as operações de classificação e ordenação dos vagões. Diversos trabalhos existentes na literatura mostram que essas tarefas são bastante complexas e demandam uma enorme quantidade

de tempo. No entanto, devido aos pátios em que são realizadas essas tarefas encontrarem-se fora da área de estudo deste trabalho, as mesmas não foram analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTF – Associação Nacional de Transporte Ferroviário. Disponível em: <<http://www.antf.org.br>>. Acesso em: 4 out. 2002.

ASSAD, A. A. [1980]. Models for rail transportation. *Transportation Research – A*, v. 14, p. 205-220.

BOTTER, R. C. [1985]. *Planejamento portuário: modelo para análise operacional do sistema porto associado a níveis de serviço*. 177 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1985.

BOTTER, R. C. [2002] *Tratamento de dados em modelos de simulação discreta*. 147 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2002.

CAREY, M; LOCKWOOD, D. [1995]. A model, algorithms and strategy for train pathing. *Journal of the Operational Research Society*, v. 46, n.8, p. 129-138.

CARNELLOS, F. L. [2001]. *Otimização do dimensionamento de equipamentos para automação de terminal de contêineres*. 102 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001.

CDS - Companhia Docas de Santos. Disponível em: <http://www.geocities.com/ferrovias_brasil/cds-historia.htm>. Acesso em: 2 abr. 2003.

CORDEAU, J. F.; TOTH, P.; VIGO, D. [1998]. A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, v. 32, p. 380-404.

DAGANZO, C.F.; DOWLING, R. G.; HALL, R. W. [1983]. Railroad classification yard throughput: The case of multistage triangular sorting. *Transportation Research*, v. 17A, p. 95-106.

DAGANZO, C.F. [1987a]. Dynamic blocking for railyards. Part I. Homogeneous traffic. *Transportation Research*, v. 21B, p. 1-27.

DAGANZO, C.F. [1987b]. Dynamic blocking for railyards. Part II. Heterogeneous traffic. *Transportation Research*, v. 21B, p. 29-40.

DNIT – Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br>>. Acesso em: 2 abr. 2003.

FERNANDES, M. G. [2001]. *Modelo econômico-operacional para análise e dimensionamento de terminais de contêineres e veículos*. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FREITAS FILHO, P. J [2001]. Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações em Arena. Visual Books Ltda.

GUALDA, N. D. F. [1995]. *Terminais de transportes: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional*. 277 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1995.

HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S.S. [2000]. Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations. *European Journal of Operational Research*, v. 124, p. 307-331.

HIGGINNS, A.; KOZAN, E.; FERREIRA, L. [1995]. Modeling delay risks associated with train schedules. *Transportation Planning and Technology*, v. 19, p. 89-108.

JANIC, M. [1984]. Single track line capacity model. *Transportation Planning and Technology*, v. 9, p. 135-151.

JANIC, M. [1988]. A practical capacity model of a single track line. *Transportation Planning and Technology*, v. 12, p. 301-318.

KOZAN, E. [2000]. Optimizing container transfers at multimodal terminals. *Mathematical and Computer Modeling*, v. 31, n. 10-12, p. 235-243. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mar. 2002.

LEGATO, P.; MAZZA, R. [2001]. Berth planning and resources optimization at a container terminal via discrete event simulation. *European Journal of Operational Research*, v. 133, n. 3, p. 537-547. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mar. 2002.

LIMA JÚNIOR, O. F. [1988]. *Metodologia para concepção e dimensionamento de terminais multimodais de pequeno e médio porte*. 251 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1988.

MELLO, S. F.; CRUZ, W. E.; BOTTER, R. C.; BRINATI, M. A. [1986]. Análise técnico operacional do terminal de contêineres do Porto de Santos. *Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, 11*. Anais. Rio de Janeiro, Sobena. v. 4, p. 263-283.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R.P. [1995]. *Introduction to simulation using SIMAN*. Editora McGraw-Hill, Inc., New York.

PETERSEN, E.R. [1974]. Over-the-road transit time for a single track railway. *Transportation Science*, v. 8, p. 65-74.

PETERSEN, E.R. [1977a]. Railyard modeling. Part I. Prediction of put-through time. *Transportation Science*, v. 11, p. 37-49.

PETERSEN, E.R. [1977b]. Railyard modeling. Part II. The effect of yard facilities on congestion. *Transportation Scienc*, v. 11, p. 50-59.

SAAD, J. A. C. [1999]. *Modelo para análise da operação de trechos ferroviários em linha singela*. 115 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1999.

SANTOS, S. R. C [1998]. *Análise das incertezas dos processos de chegadas na operação de um terminal intermodal*. 74 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1998.

TONDO, C. M [1984]. *Simulação e análise operacional do terminal de contêineres do Porto de Santos*. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1984.

TURNQUIST, M. A.; DASKIN, M.S. [1982]. Queuing models of classification and connection delay in railyards. *Transportation Science*, v. 16, p. 207-230.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

BALLOU, R. H. [2001]. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos*. Bookman Editora Ltda.

BOTTER, R. C. [1985] Emprego de Simulação na Modelagem de Sistemas Portuários. *Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 18*. Anais. Rio de Janeiro, Sobrapo, v. 2, p. 231-248.

CHÁVEZ, D. T. C. e M. A. BRINATI [1999]. Situação e perspectivas do transporte internacional de contêiner na América Latina. *Congreso Panamericano de Ingenieria Naval, Transporte Marítimo e Ingenieria Portuária, 16*. COPINAVAL'99, p. 129-138.

COSTA NETO, P.L.O. [1977]. *Estatística*. São Paulo, Edgard Blucher Ltda.

CRUZ, M. M. C.; PEREIRA, A. L. [1995]. O enfoque sistêmico como apoio a formalização de objetivos em terminais especializados de carga. *In: IX ANPET, São Carlos, 1995*. Anais. p. 308-317.

CULLINANE, K.; KHANNA, M. [2000]. Economies of scale in large containerships: optimal size and geographical implications. *Journal of Transport Geography*, v. 8, n. 3, p. 181-195. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mar. 2002.

DAGANZO, C.F. [1986]. Static blocking at railyards: sorting implications and track requirements. *Transportation Science*, v. 20, p. 189-199.

HIGGINNS, A., KOZAN, E.; FERREIRA, L. [1996]. Optimal scheduling of trains on a single line track. *Transportation Research Part B*, v. 30B, n. 2, p. 147-161.

IMAI, A., NISHIMURA, E.; PAPADIMITRIOU, S. [2001]. The dynamic berth allocation problem for a container port. *European Journal of Operational Research*, v. 35, n 4, p. 401-417. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 2 jun. 2002.

JOHNSON, R. A.; BHATTACHARYYA, G. K. [1992]. *Statistics: principles and methods*. New York, John Wiley.

JOVANOVIĆ, D.; HARKER, P. T. [1991]. Tactical scheduling of rail operations: The SCAN I system. *Transportation Science*, v. 25, n. 1, p. 46-64.

KIM, K. H.; KIM, H. B. [1998]. The optimal determination of the space requirement and the number of transfer cranes for import containers. *Computers & Industrial Engineering*, v. 35, n. 3-4, p.427-430. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mar. 2002.

KIM, K. H.; KIM, H. B. [1999]. Routing straddle carriers for the loading operation of containers using a beam search algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, v. 36, n. 1, p.109-136. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 15 mar. 2002.

MAHONEY, J. H. [1985]. *Intermodal freight transportation*. ENO Foundation for Transportation Inc., Wesport, Connecticut.

McCALLA, R. J. [1999]. Global change, local pain: intermodal seaport terminals and their service areas. *Journal of Transport Geography*, v. 7, n. 4, p. 247-254. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 2 jun. 2002.

NOVAES, A. G. N. [1975]. *Pesquisa operacional e transportes*. São Paulo. McGraw-Hill.(KOLMOGOROV)

SALVI, L. (1998). *Modelo de sistema de supervisão e controle operacional de terminais de contêineres*. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1998.