PEDRO VEIGA DE CAMARGO

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE
GRANÉIS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM
INTEGRADA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO**

**São Paulo
2010**

PEDRO VEIGA DE CAMARGO

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE
GRANÉIS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM
INTEGRADA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção de título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Claudio Barbieri da
Cunha

**São Paulo
2010**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de novembro de 2010.

Assinatura do autor

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Pedro Veiga de Camargo', is written over a horizontal line. The signature is fluid and cursive.

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Camargo, Pedro Veiga de

Análise de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas através de uma abordagem integrada simulação-otimização / P.V. de Camargo. -- ed.rev. -- São Paulo, 2010. p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

**1. Transportes ferroviários (Análise; Simulação; Otimização)
2. Grãos I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.**

PEDRO VEIGA DE CAMARGO

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE
GRANÉIS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM
INTEGRADA SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção de título de Mestre em
Engenharia

Área de Concentração:

Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Dr. Claudio Barbieri da
Cunha

**São Paulo
2010**

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho
à minha mulher, Christina, razão de tudo.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço ao meu orientador, professor Claudio Barbieri da Cunha, que me acolheu como seu orientado quando mudei o rumo de minha vida profissional e que foi peça essencial no desenvolvimento desse trabalho, além de me dar apoio e ensinamentos fundamentais para enfrentar os desafios que se colocam à minha frente na forma do curso de doutoramento.

Agradeço a todos os professores da Escola Politécnica, principalmente àqueles do Departamento de Engenharia de Transportes, pelas lições técnicas e de ética ao longo de quase dez anos de convivência desde a graduação; especialmente ao professor Orlando Strambi, que guiou meus primeiros passos no mundo da Eng. de Transportes e que me abriu as portas da carreira acadêmica.

A Enrico Barnaba Ferri pelo companheirismo nas vidas acadêmica e profissional; aos colegas de Vale Gustavo Zanandrea, Fabiano Pompermayer, Luciano Bandeira e Claudia Pontes, e da Logit, Wagner Colombini Martins, Rubens Almeida Junior e Fabiana Takebayashi, a quem devo parte importante dos dados e do conhecimento empregado nesse trabalho; Ao Andrei, que me ensinou muito sobre o processo de desenvolvimento de uma tese; à minha mãe Ana Christina por todas as ajudas que, aqui e ali, fizeram e ainda fazem minha vida muito mais fácil; à minha mulher, Christina, que me é o motivo e a força necessários para que eu caminhe à finalização desse trabalho e à minha filha Sophia, que me ajudou a acordar nas últimas noites necessárias de trabalho nesse texto.

Finalmente, aos professores do *Institute of Transportation Studies* da *University of California in Irvine*, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Michael McNally, por permitir minha ausência às aulas e obrigações do programa de PhD para estar presente no Brasil sempre que necessário.

RESUMO

O transporte ferroviário é uma das mais eficientes formas para escoamento da safra brasileira de grãos agrícolas. Apesar disso, a malha ferroviária nacional, bem como a sua frota de veículos, não tem sido expandida no mesmo ritmo que a produção de grãos, impondo restrições de capacidade de transporte cada vez mais fortes nesse modal. Nesse contexto, é necessário que a ferrovia torne-se mais eficiente, de forma a suprir o seu crescimento deficitário com aumento de produtividade.

Esse trabalho lança mão de uma abordagem mista simulação-otimização para realizar a análise de possíveis estratégias operacionais para um sistema de transporte ferroviário operando em ciclo fechado, abordagem que se mostrou bastante adequada à representação de sistemas ferroviários do tipo considerado neste trabalho.

É apresentado um modelo de simulação estocástica implementado em linguagem de programação dentro do qual foram testadas diversas regras de decisão baseadas em figuras de mérito diversas, algumas das quais apresentando resultados bastante promissores para testes práticos.

Palavras-Chave: Simulação, Otimização, transporte, ferrovia, grãos.

ABSTRACT

Railway transportation is one of the most efficient means used to carry the Brazilian grain production to export ports. However, grain production has grown at a faster rate than the railway infrastructure, leading to several operational restrictions for this transportation mode. Therefore it is expected from the railway operators an increase in their efficiency to supplement their lack of capacity.

This research presents a discussion of some strategies that could be used for a grain rail transportation system operating in a closed loop, which was modeled as an simulation-optimization type of model, which revealed itself a very suitable approach when modeling this type of transportation system.

This dissertation describes the simulation model developed to characterize the system, the prioritization rules that were incorporated into the model, as well as some very promising results.

Key-words: Simulation, Optimization, transportation, railway, grains.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1.1: ESQUEMA GERAL DA OPERAÇÃO QUE SERÁ MODELADA	2
FIGURA 3.1: SISTEMA FCA-EFVM-TUBARÃO.....	21
FIGURA 3.2: DISTRIBUIÇÃO DA MALHA DA FERROVIA CENTRO-ATLÂNTICA	23
FIGURA 3.3: ESTRADA DE FERRO VITÓRIA-A-MINAS (EFVM)	25
FIGURA 3.4: PONTOS DE INTERCÂMBIO ENTRE FCA E EFVM	29
FIGURA 3.5: TERMINAIS DO PORTO DE TUBARÃO	31
FIGURA 3.6: DETALHE DO TERMINAL DE PRODUTOS DIVERSOS DE TUBARÃO.....	32
FIGURA 3.7: PRINCIPAIS MOVIMENTOS DE EXPORTAÇÃO DE SOJA E FARELO	40
FIGURA 3.8: DEMANDA DE TRANSPORTE DE SOJA E FARELO PARA O ANO DE 2009 (TON/ANO).	41
FIGURA 3.9 – SAZONALIDADE DO TRANSPORTE DE GRÃOS NO SISTEMA FCA/EFVM/TUBARÃO	42
FIGURA 4.1: ESTRUTURAS QUE COMPÕEM O PROCESSO DE TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE GRÃOS	44
FIGURA 5.1 – INTERAÇÃO ENTRE ELEMENTOS DO MODELO DE UMA FERROVIA EM CICLO FECHADO	54
FIGURA 5.2: ESTAÇÕES DE INTERCÂMBIO EM RELAÇÃO A BELO HORIZONTE.....	59
FIGURA 5.3: COMPOSIÇÃO DA DEMANDA APÓS A AGREGAÇÃO DE PRODUTOS.....	63
FIGURA 5.4: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO DE CAPACIDADE DOS SILOS	65
FIGURA 5.5: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO DA FROTA DE LOCOMOTIVAS.....	66
FIGURA 5.6: EVOLUÇÃO DA DIFERENÇA EM RELAÇÃO À MÉDIA CONFORME O NÚMERO DE REPETIÇÕES.....	67
FIGURA 6.1: COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE COMBINAÇÕES UMA-A-UMA ENTRE OS DOIS CENÁRIOS AVALIADOS.....	82
FIGURA 6.2: DESEMPENHO ABSOLUTO DE COMBINAÇÕES UMA-A-UMA DOS DOIS CENÁRIOS AVALIADOS	83
FIGURA 6.3: DEMANDA ATENDIDA Vs. DEMANDA PERDIDA POR PRODUTO OPERADO (CENÁRIO BÁSICO)	92
FIGURA 6.4: DEMANDA ATENDIDA Vs. DEMANDA PERDIDA POR ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO (CENÁRIO BÁSICO)	93
FIGURA 6.5: DEMANDA ATENDIDA Vs. DEMANDA PERDIDA POR PRODUTO OPERADO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	93
FIGURA 6.6: DEMANDA ATENDIDA Vs. DEMANDA PERDIDA POR ESTAÇÃO DE CARREGAMENTO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	94
FIGURA 6.7: CAMINHÕES PERDIDOS Vs. NAVIOS PERDIDOS POR PRODUTO (CENÁRIO BÁSICO).....	95
FIGURA 6.8: CAMINHÕES PERDIDOS Vs. NAVIOS PERDIDOS POR PRODUTO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	95
FIGURA 6.9: DISTRIBUIÇÃO DAS FILAS DE LOCOMOTIVAS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO BÁSICO)	96
FIGURA 6.10: DISTRIBUIÇÃO DAS FILAS DE LOCOMOTIVAS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	96
FIGURA 6.11: DISTRIBUIÇÃO DE FILAS DE VAGÕES CARREGADOS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO BÁSICO)	97
FIGURA 6.12: DISTRIBUIÇÃO DE FILAS DE VAGÕES CARREGADOS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	97
FIGURA 6.13: DISTRIBUIÇÃO DE FILAS DE VAGÕES VAZIOS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO BÁSICO).....	98
FIGURA 6.14: DISTRIBUIÇÃO DE FILAS DE VAGÕES VAZIOS POR ESTAÇÃO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	98
FIGURA 6.15: DEMANDA PERDIDA POR TIPO DE PRODUTO POR REGRA DE PRIORIZAÇÃO UTILIZADA	99

LISTA DE TABELAS

QUADRO 1.1: MALHAS RODO-FERROVIÁRIAS DOS 10 PAÍSES DE MAIOR EXTENSÃO TERRITORIAL	4
QUADRO 3.1: PRINCIPAIS INDICADORES DE DESEMPENHO FERROVIÁRIO PARA O TRANSPORTE DA ORIGEM MÉDIA DOS GRÃOS	26
QUADRO 3.2: EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO MUNDIAL DE SOJA (MILHÕES DE TONELADAS AO ANO)	38
QUADRO 3.3: EVOLUÇÃO DO CONSUMO MUNDIAL DE SOJA (MILHÕES DE TONELADAS AO ANO)	39
QUADRO 3.4: EXCEDENTE/DÉFICIT DE SOJA DOS PRINCIPAIS CONSUMIDORES (MILHÕES DE TONELADAS AO ANO)	39
QUADRO 5.1: CAPACIDADE ESTIMADA DE DIVERSOS ELEMENTOS DO MODELO ESTOCÁSTICO	64
QUADRO 5.2: MATRIZ DE APLICAÇÃO DE REGRAS DE PRIORIZAÇÃO A PROCESSOS DECISÓRIOS	78
QUADRO 6.1: EXCESSO DE CAPACIDADE APÓS ALTERAÇÃO DE FROTAS DE LOCOMOTIVAS	81
QUADRO 6.2: ALTERAÇÃO DA PERDA DE PRODUÇÃO COM ASSOCIAÇÃO UMA A UMA (CENÁRIO DE CAPACIDADE ORIGINAL)	84
QUADRO 6.3: ALTERAÇÃO DA PERDA DE PRODUÇÃO COM ASSOCIAÇÃO UMA A UMA (CENÁRIO ALTERNATIVO DE CAPACIDADE)	85
QUADRO 6.4: PROCESSOS DECISÓRIOS CONSIDERADOS NO MODELO (POSIÇÃO NO NOME)	87
QUADRO 6.5: REGRAS DE PRIORIZAÇÃO UTILIZADAS NO MODELO	88
QUADRO 6.6: CONFIGURAÇÕES DE MELHOR RESULTADO DO MODELO SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO (CENÁRIO BÁSICO)	90
QUADRO 6.7: CONFIGURAÇÕES DE MELHOR RESULTADO DO MODELO SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO (CENÁRIO ALTERNATIVO)	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANTAQ – Agência Nacional de Transportes Aquaviários

CCO – Centro de Controle Operacional

EFVM – Estrada de Ferro Vitória-a-Minas

FCA – Ferrovia Centro-Atlântica

LIFO – Last in, First out

MM – Milhão

PEPS – Primeiro que entra, primeiro que sai

PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes

RSM – Response Surface Method (Metodologia de superfície de resposta)

SSD – Sistema de Suporte à decisão

TPD – Terminal de Produtos Diversos

TPM – Terminal de Praia Mole

UEPS – Último que entra, primeiro que sai

LISTA DE SÍMBOLOS

CV – Cavalo Vapor

Nº - Número

R\$ - Real

ton – Toneladas

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Apresentação	1
1.2	Relevância do tema	3
1.3	Objetivo	5
1.4	Metodologia	6
1.5	Delineamento do trabalho	7
2	Revisão bibliográfica.....	8
2.1	Simulação de sistemas de transporte ferroviário de cargas.....	8
2.2	Modelos de otimização em sistemas ferroviários.....	10
2.3	Modelos híbridos simulação-otimização	12
2.4	Conclusão	20
3	O sistema FCA/EFVM/Tubarão	21
3.1	Características físicas da FCA e da EFVM	22
3.2	Operação ferroviária	25
3.3	O Porto de Tubarão	30
3.4	Planejamento e programação de transporte	33
3.5	Mercado de grãos agrícolas.....	37
3.6	Conclusão do capítulo.....	42
4	Caracterização do problema.....	43
4.1	Figura de mérito para avaliação de desempenho do sistema.....	43
4.2	Etapas do transporte de grãos.....	43
5	Modelo proposto.....	50
5.1	Dados de Entrada	52
5.2	Modelo de simulação	54
5.3	Capacidade limite do sistema de simulação	63
5.4	Verificação do modelo de simulação.....	64
5.5	Regras de priorização	67
6	Experimentos computacionais.....	79
6.1	Cenário com equilíbrio de capacidade	80
6.2	Combinações uma-a-uma.....	81
6.3	Composição de regras de decisão.....	86
6.4	Impacto da utilização de regras de priorização absolutas ou relativas	98
6.5	Conclusões	100
7	Conclusões	100
8	Referências bibliográficas	102

Introdução

1.1 Apresentação

Esse trabalho trata da modelagem de um sistema de transporte ferroviário de grãos agrícolas, ou simplesmente grãos, desde o ponto de origem (correspondente ao local de chegada dos caminhões nos terminais de carregamento dos vagões) até o seu embarque em algum navio no terminal portuário.

Conforme ilustrado na Figura 0.1, os grãos transportados pelo sistema em estudo passam por diversas etapas antes de serem embarcados em algum navio, a saber:

- Chegada dos caminhões transportando grãos provenientes das regiões produtoras às estações de carregamento de vagões;
- Descarregamento dos caminhões em moegas e transferência dos grãos para silos de armazenamento;
- Transferência dos grãos dos silos para vagões vazios;
- Formação e despacho do trem rumo a uma estação intermediária;
- Colocação dos vagões carregados em fila na estação intermediária;
- Formação e despacho de trens com destino ao porto;
- Colocação dos vagões carregados em fila no porto;
- Descarga de vagões em moegas e transferência dos grãos para silos; e
- Transferência dos grãos para os navios que atracam no porto.

Como complemento desse processo, existe ainda o retorno de vagões vazios às estações de carregamento, o que acontece com os vagões percorrendo o mesmo trajeto de vinda e obedecendo à mesma seqüência de etapas do percurso rumo ao porto, mas na ordem inversa.

Nessa seqüência de etapas, algumas atividades apresentam grande variabilidade, não sendo adequada a sua descrição como apresentando um comportamento determinístico. Esses componentes, principalmente a chegada de caminhões às estações de carregamento e de navios ao porto, são condicionadores fundamentais

do desempenho do sistema sendo modelado e, portanto, devem ser considerados como processos estocásticos.

Figura 0.1: Esquema geral da operação que será modelada

Além disso, as atividades de descarga de caminhões, tráfego de trens, carga e descarga de vagões e carregamento de navios também ocorrem com grande variabilidade na operação do sistema real, o que também condiciona o desempenho de sua operação.

1.2 Relevância do tema

A relevância do tema apresentado reside em três constatações feitas durante a pesquisa:

- Previsão de grande crescimento da produção agrícola Brasileira apresentada no **Plano Nacional de Logística e Transportes** do Governo Federal – PNLT (2007), a qual não poderá ser absorvida pelo atual sistema ferroviário por falta de capacidade de transporte;
- Forte competição entre os diferentes modos de transporte no mercado de grãos agrícolas com predominância do modo rodoviário, sendo necessário maximizar o aproveitamento do ativo ferroviário para aumentar sua competitividade; e
- Inexistência de modelos matemáticos para estudo de regras de operação ferroviária que considerem as características estocásticas do problema;

Segundo os dados fornecidos por uma das empresas envolvidas na elaboração do PNLT, os modos ferroviário e rodoviário respondem por 84%¹ de toda a produção de transporte² de soja, farelo e milho, sendo 37% no modo ferroviário e 47% no modo rodoviário.

Essa repartição modal, bastante favorável à rodovia, pode ser explicada, ao menos em parte, pela pequena extensão da malha ferroviária existente no Brasil quando comparada com a sua malha rodoviária.

De acordo com dados disponíveis no *World Fact Book* da Agência Central de Inteligência dos Estados Unidos (CIA/USA), a extensão da malha ferroviária brasileira é de cerca de 1,7% da malha rodoviária, conforme apresentado no Quadro 0.1.

¹ Fonte: Logit Engenharia Consultiva LTDA

² Produção de transporte é calculada pela multiplicação da massa/volume de produto pela distância de transporte.

Quadro 0.1: Malhas rodo-ferroviárias dos 10 países de maior extensão territorial

País	Área (1.000 km ²)	Malha Ferroviária (1.000 km)	Malha Rodoviária (1.000 km)	Malha ferroviária / Malha rodoviária	km ferrovia /1.000 km ²	km rodovia /1.000 km ²
Rússia	17.075	87	933	9,3%	5,1	54,6
Canadá	9.985	48	1.042	4,6%	4,8	104,4
Estados Unidos	9.827	227	6.466	3,5%	23,1	658,0
China	9.597	75	1.931	3,9%	7,9	201,2
Brasil	8.512	29	1.752	1,7%	3,4	205,8
Austrália	7.687	39	813	4,7%	5,0	105,8
Índia	3.288	63	3.316	1,9%	19,2	1008,8
Argentina	2.767	32	231	13,8%	11,5	83,6
Cazaquistão	2.717	14	92	15,0%	5,0	33,7
Sudão	2.506	6	12	50,2%	2,4	4,7

Fonte: *World Fact Book* (CIA/USA)

Uma vez que a produção agrícola de grãos demanda a utilização de grande quantidade de terra, a maior capilaridade da malha rodoviária permite melhor acesso de caminhões às diversas áreas de plantação, bem como a outros mercados de transporte durante a entressafra de grãos.

Segundo dados da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), durante o ano de 2007, as exportações de soja e farelo somadas tiveram seu pico no mês de maio, com 12,5% de toda a exportação anual. Com este valor pode-se calcular a entressafra teórica de transporte de soja e farelo para exportação, de aproximadamente quatro meses, que são calculados como o número de meses do ano menos o número de meses (de demanda igual à máxima mensal) necessários para transportar o total da demanda anual.

Esses fatores contribuem para uma diminuição da competitividade dos operadores ferroviários, que possuem altos custos fixos (como manutenção dos ativos ferroviários e custo de capital do material rodante parado, entre outros), tornando mais necessária a maximização da utilização de seus ativos e a redução dos custos operacionais.

Para que se tenha uma idéia mais clara do impacto do custo de manutenção e de capital do material rodante de uma ferrovia, pode-se tomar como parâmetro o trabalho de Ravara (2005), que mostrou que uma variação de 10% na quantidade de locomotivas necessárias para realizar um determinado transporte resulta na diminuição de 6% no custo total para a realização desse mesmo transporte.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho é estudar políticas operacionais que maximizem o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos composto de duas ferrovias distintas e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino a um único porto.

Essas políticas operacionais deverão responder diversas perguntas, a saber:

- Despacho de vagões
 - Quando existe um conjunto de vagões vazios a serem destinados para carregamento, para qual estação de carregamento se deve enviar esses vagões?
 - Quando existem vagões carregados com diferentes produtos e a capacidade de tração disponível é insuficiente para levá-los todos de uma vez, quais vagões devem ser selecionados para o transporte imediato?
- Definição de carregamento
 - Quando existe um vagão pronto para carregamento e mais de um tipo de produto para carregá-lo, qual produto deve ser priorizado?
 - Quando existem navios em fila para atracação e carregamento com produtos diferentes, qual deles deve ser priorizado? Qual o impacto no sistema decorrente de sua operação de acordo com a regra de primeiro que entra, primeiro que sai (PEPS)?
- Gerenciamento de descarga
 - Quando existem vagões carregados com diferentes produtos em fila para descarga no porto e uma única estrutura de descarga, qual a melhor ordem de descarga e, em particular, qual deles deve ser descarregado em primeiro lugar?
 - Quando existe uma fila de caminhões para serem descarregados nas estações ferroviárias e uma única estrutura de descarga, qual deles deve ser descarregado primeiro e qual a melhor ordem de descarga?

Três fatores contribuem para tornar as respostas a essas perguntas não triviais. O primeiro deles é o caráter aleatório de alguns dos componentes do sistema, que torna muito difícil a sua solução de maneira analítica.

O segundo fator é a interação dos diversos elementos do sistema promovida pela circulação de vagões e locomotivas no sistema. O terceiro fator é a questão temporal, que associada aos dois primeiros fatores, torna de muito difícil previsão a consequência de uma decisão sobre um subsistema qualquer, mesmo em um futuro próximo àquele em que se toma a decisão.

Uma vez que não existe consenso na literatura em relação à melhor forma de se modelar esse problema, torna-se um segundo objetivo desse trabalho a determinação da adequabilidade de modelos simulação-otimização ao estudo de estratégias operacionais em sistemas ferroviários operando em circuito fechado.

1.4 Metodologia

A necessidade de consideração dos componentes estocásticos do problema, aliada ao objetivo de estudar políticas operacionais que maximizem o desempenho do sistema, resultou na proposição de uma abordagem híbrida que incorpora regras heurísticas que busquem a otimização do sistema a um modelo de simulação.

A construção do modelo foi dividida em duas etapas. A primeira delas consistiu da construção de um modelo de simulação estocástica convencional que representasse adequadamente o sistema apresentado na Figura 0.1.

Com o modelo construído, foram enumeradas todas as decisões que poderiam ser substituídas por regras de decisão heurísticas com o objetivo de maximizar o resultado do modelo, aproximando-o, assim, da realidade prática decorrente das ações dos tomadores de decisões.

Nesse processo de enumeração foram consideradas passíveis de substituição por heurísticas todas aquelas regras convencionais de simulação estocástica que eventualmente não representassem os processos decisórios reais e que, de alguma forma, fornecessem respostas aos questionamentos listados na seção 1.3.

Como exemplos mais evidentes dessa questão podem ser citados a escolha de estação de destino para os vagões vazios que chegam à estação intermediária vindos do porto e o gerenciamento de filas, que não se dá no esquema de pilha

(último que entra, primeiro que sai) ou fila do tipo PEPS (primeiro que entra, primeiro que sai).

Observa-se, na operação do sistema real, que tanto a distribuição de vagões quanto o gerenciamento das filas de veículos são feitos com base na análise do sistema como um todo, cujos elementos tangíveis se tentarão representar no modelo proposto.

Esse passo gerou uma lista de sete oportunidades para implementação de regras de priorização, quais sejam: Definição de destino de vagões vazios, escolha de produto para ser carregado em vagões vazios que chegam às estações carregamento, escolha de veículo em fila para descarregar (caminhão e vagão), seleção de vagões carregados para formação de trens (nas estações de carregamento e na estação intermediária) e escolha de navio (dentre aquelas em fila) para atracação e carregamento.

Como consequência dessa substituição, obtém-se um modelo de simulação cujos processos internos (distribuição de recursos e gerenciamento de filas) não dependem de distribuições probabilísticas e regras fixas do tipo PEPS, mas de regras de decisão dedicadas a cada uma dessas questões. Além disso, estas regras consideravam o estado de várias variáveis do sistema, ao invés de apenas as variáveis do ponto onde a decisão seria tomada.

Uma vez que os pacotes de simulação estocástica a que se teve acesso (Arena e ProModel) exigiriam um número muito grande de alterações no modelo a cada nova regra de priorização que se implementasse, foi decidido que o modelo não seria construído sobre plataformas comerciais, mas implementado diretamente em linguagem de programação.

1.5 Delineamento do trabalho

Este item tem por objetivo fornecer uma descrição da organização e estrutura do presente trabalho.

No capítulo 2 será apresentada a revisão bibliográfica da literatura que aborda modelos de simulação de sistemas ferroviários e daquela que trata de modelos híbridos simulação-otimização.

No Capítulo 3 é apresentada uma breve introdução ao sistema de transporte de grãos agrícolas que foi utilizado como principal referência para a elaboração desse trabalho, composto pela Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), Porto de Tubarão e Estrada de Ferro Vitória-a-Minas (EFVM), além de um panorama geral da produção e exportação de grãos agrícolas no Brasil com destaque para os principais corredores de transporte com destino aos portos, bem como a demanda de transporte no sistema FCA/EFVM/Tubarão.

Nos capítulos 4 e 5 são apresentados, respectivamente, o problema e o modelo propostos, bem como o detalhamento de todas as análises realizadas.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos experimentos computacionais e os parâmetros numéricos utilizados, enquanto que o capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e recomendações para pesquisas futuras.

Revisão bibliográfica

Esse capítulo tem por objetivo apresentar a revisão dos principais trabalhos publicados relacionados ao escopo desta dissertação, mais especificamente em torno da simulação de sistemas de transporte ferroviário e de modelos híbridos simulação-otimização.

1.6 Simulação de sistemas de transporte ferroviário de cargas

Segundo Gordon (1969), o termo “sistema” é utilizado para definir uma variada gama de fins, o que resulta na grande dificuldade de conseguir uma única definição para o tema que seja concisa o suficiente para uma utilização qualquer.

Ainda segundo Gordon (1969), simulação de sistemas é a técnica de solução de problemas através do acompanhamento das mudanças ao longo do tempo em um modelo dinâmico de um dado sistema.

Em se tratando sistemas ferroviários, um dos aspectos que aparecem com maior frequência em buscas pelo tema em publicações especializadas em pesquisa operacional e simulação estocástica é a questão da capacidade de tráfego de trens de uma malha, geralmente expresso em pares de trens por dia. Para esse tipo de

estudo existem diversos pacotes comerciais consolidados e que englobam procedimentos de simulação estocástica e otimização.

Entretanto, quando se fala de simulação de sistemas fechados (em que não há entrada nem saída de veículos), como a circulação de vagões entre pontos de carga e de descarga, se é obrigado a recorrer a pacotes genéricos tradicionais, como Arena (Rockwell 2009), ProModel (Promodel Corporation, 2009) ou AnyLogic (xj Technologies, 2009).

Softwares como o Fast Track, tornaram a modelagem de cruzamento de trens e operações de pátios intermediários extremamente simples, (Fast Track II, 2004). Entretanto, não foi encontrado software que trate especificamente a questão dos circuitos fechados.

Botter, Franzese e Fioroni (2003), Fioroni (2007) e Everett (2001) foram as únicas referências encontradas que se relacionam a esse tipo de sistema, e tratam de sistemas de transporte de minério de ferro, os dois primeiros em ferrovias brasileiras e o terceiro em ferrovias australianas.

Botter, Franzese e Fioroni (2003) apresentam um modelo de simulação que considera um circuito fechado de vagões dedicados ao transporte de minério de ferro ao mesmo tempo em que trata a operação da ferrovia, com suas regras de sinalização e interação entre trens.

Apesar de tratar de um sistema ferroviário que é parte daquele representado no presente trabalho, o modelo proposto pelos autores trata em bastante detalhe a interação entre os trens em trânsito e deles com a própria ferrovia, de forma a representar o tráfego de trens verificado na realidade. Apesar disso, o tratamento do circuito fechado proposto pelos autores não explicita claramente a forma como foi considerada a distribuição de vagões e o tratamento de filas, o que será explorado em maior detalhe nesse trabalho.

Em um trabalho semelhante, Fioroni (2007) apresenta um modelo também desenvolvido para analisar um sistema ferroviário fechado de transporte de minério de ferro, dessa vez composto pela malha da MRS Logística S.A. (MRS), em que as questões de interação entre trens e desses com a ferrovia também são tratadas de forma bastante detalhada. Apesar das semelhanças, Fioroni (2007) conferiu um tratamento um pouco mais sofisticado à distribuição de vagões com a introdução de

um modelo de otimização dedicado à escolha de destino para cada um dos trens, mas também não considera a possibilidade de priorização de veículos em fila, um dos principais objetivos do presente trabalho. Dessa forma, apenas Fioroni (2007) e Everett (2001) serão discutidos com mais detalhes ao final desse capítulo.

1.7 Modelos de otimização em sistemas ferroviários

Os problemas de otimização ferroviária tem sido um campo de pesquisa bastante explorado, o que se pode perceber com a quantidade de referências encontradas na literatura. Adicionalmente, os problemas relacionados ao desenho de malha e otimização de grade de trens (cruzamentos/ultrapassagens de trens) estão entre os mais freqüentes, conforme se pode verificar ao realizar buscas textuais nas publicações especializadas na área.

Cordeau, Toth e Vigo (1998) apresentam uma revisão bibliográfica bastante abrangente dos estudos acerca de programação e roteirização em ferrovias, e consideram surpreendentemente pequeno a utilização desses recursos pelas ferrovias frente ao seu grande potencial de economia.

Nesse trabalho, os autores discutem detalhes dos modelos de otimização e os separam em categorias, de acordo com a aplicação dos mesmos. Para isso, foi analisada a seqüência de etapas na operação da ferrovia.

A primeira classe de modelos de otimização aplicados a ferrovia que os autores apresentam é a de gerenciamento de pátios de classificação de vagões. Por políticas de gerenciamento, entendam-se as regras que definem como um trem que entra em um pátio ferroviário deve ser inspecionado, desmontado e seus vagões classificados e posicionados em outros trens que partirão desse mesmo pátio.

Esse tipo de modelo tem por objetivo a análise das operações desempenhadas em pátios de classificação uma vez conhecidos os vagões e locomotivas que devem chegar ao pátio e o destino e composição de todos os trens que devem deixá-lo.

A segunda categoria de modelos analisados pelos autores é a de roteirização, que consiste da definição da “rota” a ser percorrida por cada vagão/trem em termos dos trechos ferroviários a serem percorridos e também das operações de montagem (formação) e desmontagem de trens e a associação de vagões a trens em cada uma

dessas etapas, o que consiste basicamente nos problemas de blocagem de vagões, designação de blocos de vagões a trens e programação de trens.

Esses três problemas, juntamente com a distribuição de vagões vazios possuem, de acordo com o autor, uma interdependência muito forte, mas ainda é pouco viável tratá-los em conjunto.

A terceira categoria de problemas listada, a de gerenciamento de frota, é dividida pelo autor em uma subcategoria em que várias ferrovias operam vagões em esquema de *pool* (vagões compartilhados) e outra em que uma única ferrovia opera um conjunto de vagões, caso mais freqüente na operação ferroviária Brasileira.

As duas outras categorias de problemas citadas, a de alocação de locomotivas a trens e de análise de cruzamento de trens em linha singela são bastante relevantes para a operação ferroviária brasileira, a qual dispõe de um número de locomotivas inferior ao desejável e é realizada quase em sua totalidade em ferrovias de linha singela.

Apesar disso, na gama de problemas listados por Cordeau, Toth e Vigo (1998) não é encontrada referência ao problema tratado no presente trabalho.

Mais recente, Ahuja, Cunha e Şahin (2005) apresentam uma revisão também bastante completa da utilização de modelos de fluxo em rede para o planejamento e programação do transporte ferroviário de carga.

Assim como Cordeau, Toth e Vigo (1998), Ahuja, Cunha e Şahin (2005) constatarem o uso ainda restrito de técnicas de pesquisa operacional no planejamento e operação de ferrovias, o que se atribui à complexidade desses problemas e ao pouco tempo decorrido desde que grande capacidade computacional se tornasse disponível para a solução dos problemas enfrentados pelas ferrovias.

Apesar disso, os autores mencionam a economia obtida pela *Union Pacific*, ferrovia norte americana, com a implantação de um sistema de programação baseado em técnicas de pesquisa operacional como um bom indício de que existe possibilidade de ganhos relevantes nessa área.

Os autores apresentam, de forma extremamente detalhada, os modelos de otimização aplicados aos problemas por eles discutidos, além de propor algoritmos para a solução dos mesmos.

Além dos problemas abordados por Cordeau, Toth e Vigo (1998), Ahuja, Cunha e Şahin (2005) apresentam também o problema de localização de pátio, que se constitui uma alternativa não abordada por Cordeau, Toth e Vigo (1998) para a otimização do desenho de rede na ferrovia.

O problema de programação de equipagem (maquinistas) também é abordado pelos autores, para o qual é proposto um algoritmo de solução baseado em programação inteira relaxada da restrição de que o primeiro trem da fila deve ser o primeiro a receber um maquinista, a qual é considerada apenas no pós-processamento.

Campos (2009), por outro lado, apresenta uma revisão também bastante ampla da aplicação de otimização à operação/planejamento de ferrovias, mas como forma de embasar o desenvolvimento de um modelo de planejamento de malha para o transporte de minério de ferro pelo mesmo sistema estudado por Botter, Franzese e Fioroni (2003), o que a torna bastante relevante como referência dos trabalhos existentes na literatura sobre otimização aplicada em ferrovias e que convém ao caso Brasileiro.

Com a análise desses trabalhos, percebe-se que a aplicação de métodos de otimização não tem sido utilizada para a definição de políticas de decisão de carga e descarga de vagões, considerando sempre que a demanda de vagões cheios e vazios a ser transportados é dada.

Apesar disso, a quase inexistência de trabalhos que considerem as características estocásticas do problema levou o desenvolvimento desse trabalho a considerar uma metodologia de modelagem distinta daquelas clássicas de otimização e que Cordeau, Toth e Vigo (1998), Ahuja, Cunha e Şahin (2005) e Campos (2009) apresentam em grande extensão.

1.8 Modelos híbridos simulação-otimização

Modelos de simulação-otimização caracterizam-se por ter em sua composição elementos básicos de modelos de otimização, como uma função objetivo a ser maximizada/minimizada, e elementos de problemas de simulação, como a existência de variáveis com comportamento estocástico.

Como será apresentada mais adiante, a combinação de modelos de otimização e simulação em uma única ferramenta pode ser feita de diversas formas, o que limita a

definição de um modelo otimização-simulação apenas ao fato de que são utilizados elementos de ambos os tipos de modelo. A seção 1.8.1 é destinada a apresentar as diversas formas de composição desses modelos encontradas na literatura.

Assim sendo, toda a vez em que se tratar da utilização de um modelo otimização-simulação é necessário especificar de forma bastante detalhada como é feita a composição entre esses dois modelos, de forma que se possa saber exatamente qual a abordagem dada ao problema, bem como quais foram os algoritmos utilizados.

Jacobson e Schruben (1989) classificam os modelos híbridos simulação-otimização como sendo de otimização estocástica, cuja solução, segundo eles, é de reconhecida dificuldade.

Segundo Pflug (1996), um problema de otimização estocástica é caracterizado pelo fato de que nem todos dados relevantes à decisão são exatamente conhecidos no instante em que a decisão deve ser tomada.

Ainda segundo Pflug (1996), o não-conhecimento dos valores exatos de algumas variáveis no instante da tomada de uma decisão pode ser fruto de falta de informação a respeito da variável ou de um comportamento estocástico intrínseco dessas variáveis, caso que em que se encaixa o problema tratado nesse trabalho.

As seções desse capítulo que seguem apresentam uma amostra de pesquisas envolvendo modelos híbridos simulação-otimização, e para maior detalhamento do assunto é possível recorrer a Pflug (1996) e revistas científicas nas áreas de otimização e simulação, uma vez que essa é uma área em grande desenvolvimento.

1.8.1 Simulação estocástica como forma de avaliação de função objetivo

Diversas abordagens para a modelagem de sistemas na forma simulação-otimização são propostas na literatura. Dentre todas as abordagens propostas, porém, uma se destaca como sendo a mais comum: A articulação de modelos de otimização e simulação distintos e utilizados de forma iterativa, onde o objetivo é maximizar/minimizar o valor esperado de uma função objetivo, o qual depende do resultado do modelo de simulação, também conhecido por seu nome em inglês *“response surface method”*.

Nesse tipo de abordagem, o modelo de simulação cria a superfície de resposta (esperada), qual seja a distribuição dos resultados da simulação para diversas configurações de variáveis do modelo de forma a criar uma superfície n -dimensional (onde n é igual ao número de variáveis mais um), exatamente como a avaliação de uma função qualquer de n variáveis cria uma superfície de resposta de dimensão $n+1$. Pode-se dizer, então, que o modelo de simulação é a função objetivo do modelo.

Enquanto isso, o modelo de otimização é responsável pela busca do melhor conjunto de variáveis de acordo com essa determinada superfície de resposta, cujos valores são determinados pelo modelo de simulação estocástica e não pela avaliação de uma função objetivo convencional.

Jacobson e Schruben (1989) apresentaram uma revisão bastante ampla desse método de articulação de modelos de simulação e otimização, dividindo-os em quatro grupos: Escolha de caminho, Busca de padrões, Aleatório e Integral.

As diferenças apresentadas pelos autores entre os grupos de modelos definidos consistem apenas da escolha do procedimento utilizado para percorrer a superfície de resposta em busca de seu ótimo (máximo ou mínimo), que variam desde a busca aleatória até procedimentos baseados no método de gradientes e de Hooke e Jeeves, (Bazaraa et al, 2006).

Greenwood, Rees e Siochi (1998) realizaram uma análise das superfícies de resposta fornecidas por modelos de simulação para tentar inferir quais os melhores métodos de busca em função de diferentes superfícies de resposta, tendo analisado diferentes estatísticas associadas aos resultados dos modelos estocásticos (valores esperados, médias, variâncias, etc.).

Apesar desse trabalho não apresentar grande sucesso na indicação dos melhores métodos de busca para cada tipo de superfície de resposta, deixou claro o comportamento **caótico** das mesmas, mesmo quando considerado modelos de simulação mais simples.

Ceciliano (2007) apresenta uma extensa revisão sobre diversas alternativas, algumas delas bastante recentes, para a implementação de modelos híbridos simulação-otimização em que o modelo de simulação é equivalente à avaliação da função objetivo em um problema de otimização convencional.

O autor expõe em detalhes diversas formas possíveis de utilização desse tipo de modelo, mas fica claro que as diferenças entre as diversas alternativas de implementação estudadas residem apenas na forma de implementação, e não na forma como os modelos de otimização e simulação acoplados um ao outro, sempre de forma sequencial e iterativa.

Simulação estocástica como forma de avaliação de função objetivo é o método de articulação entre modelos de otimização e simulação mais presente na literatura, podendo ser citados os trabalhos de Guimarães e Kingsmann (1989) para a determinação de parâmetros ótimos de operação em um terminal de grãos e Ahmed e Alkhamis (2006), que propuseram a utilização de um modelo de otimização estocástica utilizando como método de busca o algoritmo de Hooke e Jeeves, (Bazaraa et al, 2006).

No mais relevante dentre os artigos encontrados, Guimarães e Kingsman (1989), justificam a utilização de um modelo híbrido otimização-simulação pelo tamanho da região viável gerada pelo conjunto de variáveis analisadas no modelo de simulação em questão.

O modelo analisado em seu trabalho trata da operação de um terminal de grãos dedicado ao recebimento de grãos e sementes importados e que é operado com recursos compartilhados. Uma vez que a chegada de navios aos dois portos considerados no estudo é estocástica, o planejamento de atracação de navios, alocação de produtos a silos e envio de cargas a clientes está sujeita a incertezas. O objetivo dos autores era, então, construir um modelo capaz de representar adequadamente o problema real e no qual pudessem ser testadas regras para a tomada de decisões como qual produto alocar a qual parte do silo, qual cliente ser atendido em primeiro lugar e qual navio ser descarregado em primeiro lugar.

De acordo com os autores, a busca de um conjunto de valores de variáveis por um analista que se utiliza apenas de sua sensibilidade é inviável quando o número de possibilidades é muito grande, o que justificou a escolha de um modelo híbrido para a solução do mesmo.

Outro aspecto relevante em relação a esse método de articulação entre os modelos de otimização e simulação estocástica é a sua freqüente utilização no dimensionamento de recursos em sistemas comumente tratados em projetos de

consultoria (e.g. caixas de supermercados, número de empilhadeiras em centros de distribuição, moegas para descarga de grãos, etc.), o que resultou na disponibilização de ferramentas de otimização acopladas a pacotes comerciais de simulação, caso do OptQuest, ferramenta disponível no software Arena.

O OptQuest é uma ferramenta desenvolvida pela companhia OptTek Systems, e que se utiliza de meta-heurísticas (busca-tabu, *Scatter Search* e *redes neurais*) para a solução de problemas de otimização não lineares. A rigor, o OptQuest é o método, ou conjunto de métodos, utilizado juntamente com a plataforma de simulação Arena para a criação de modelos híbridos.

Esse tipo de abordagem, apesar de fartamente discutida na literatura, não corresponde ao objetivo do presente trabalho (os modelos de otimização considerados não são utilizado na tomada de decisão durante a rodada do modelo de simulação, mas apenas para a alteração dos parâmetros do modelo de simulação para a rodada posterior), mas é necessário conhece-la para que se compreenda o grande número de formas em que modelos otimização-simulação podem se apresentar.

Em uma linha já totalmente diferente encontram-se os modelos cujo objetivo é a de minimização da probabilidade de ocorrência de uma determinada configuração do sistema final. Essa abordagem foi proposta por Hamdouni, Soumis e Desaulniers (2007) para o problema de despacho de ônibus ("*Bus Dispatch Problem*"), e sua aplicação se mostrou bastante adequada para a operação de um sistema sujeito a um grande número de restrições.

Entretanto, não foram encontrados outros trabalhos que utilizassem essa mesma técnica, aparentemente bastante recente.

1.8.2 Otimização como método de definição de prioridade e de regras de decisão em modelos de simulação

Uma forma completamente distinta das anteriores para a articulação entre modelos de simulação e otimização encontrada na literatura é a de substituição de regras intrínsecas dos modelos de simulação, como as de fila (PEPS, UEPS, etc.), por regras heurísticas baseadas em modelos de otimização. Apesar de menos explorada, é uma abordagem bastante adequada para problemas de

seqüenciamento de produção e despacho de veículos, uma vez que considera os estados do sistema no momento de cada decisão.

Essa abordagem foi proposta por Everett (2001) para o problema de seqüenciamento de produção e transporte de minério de ferro com o objetivo de atingir a qualidade do minério em cada pilha formada para embarque no porto.

Segundo Everett (2001), a qualidade do minério de ferro não é definida simplesmente pela concentração de ferro metálico, mas também pela concentração de diversos outros elementos químicos, como fósforo, alumínio e sílica, e para todos esses elementos existe uma concentração média que deve ser atingida.

O seqüenciamento proposto por Everett (2001) considera a existência de uma série de minas em operação, distribuídas a diferentes distâncias do porto e com diversas frentes de lavra em operação, cada uma delas fornecendo minérios com composições químicas distintas.

Nesse problema, foram identificadas quatro oportunidades de decisão de seqüenciamento no sistema como um todo:

- Escolha da ordem de lavra das diversas frentes existentes em cada mina;
- Escolha da seqüência de trens a ser despachado considerando todas as origens possíveis;
- Decisão acerca da pilha de minério em que será descarregada a carga do trem que chega ao porto; e
- Escolha da pilha que será utilizada para carregar o navio quando ele chega ao porto.

Apesar de terem sido identificadas quatro oportunidades de escolha, características físicas dos dois problemas tratados por ele resultaram em dois modelos diferentes, cada um com duas oportunidades de escolha.

O primeiro problema contém um conjunto de três minas e diferentes frentes de lavras por mina, mas com apenas uma pilha no porto. Essa configuração permite duas oportunidades de escolha, a 1ª e a 2ª.

O segundo problema apresenta apenas uma mina com uma única frente de lavra e um porto com espaço para múltiplas pilhas de minério, o que leva a que se tenham as oportunidades de escolha 2 e 3.

A primeira etapa para a aplicação do modelo de otimização foi a definição de uma figura de mérito para estabelecer base de comparação entre as escolhas possíveis em cada passo.

Essa figura de mérito, chamada pelo autor como medida de stress, S_i , parte da hipótese de que para cada um dos elementos químicos controlados existe uma faixa de aceitação de tamanho D_i , e cujo ponto médio T_i é o valor esperado.

A medida de stress para uma determinada massa de minério fica assim definida:

$S_i = (C_i - T_i)/D_i$ (0.1), sendo C_i o valor encontrado na amostra para a concentração do mineral i .

A composição das medidas de stress de cada um dos minerais em uma medida única para toda a amostra é feita de forma bastante simples, de acordo com a equação:

$A = \sqrt{\sum_i S_i^2}$ (0.2), em que A é a medida de stress da amostra.

A partir da definição de uma função de stress, do conhecimento do tempo de transporte de cada uma das minas para o porto, da composição do minério extraído de cada uma das frentes de lavra de cada uma das minas e da composição química desejada para cada pilha de minério no porto, Everett (2001) propõe heurísticas bastante simples para substituir os procedimentos de regras de fila. Com isso, cria um modelo otimização-simulação para seqüenciamento da produção, transporte e descarga no porto.

Nesse modelo, cada uma das escolhas citadas acima é feita com base na avaliação da função de stress resultante de cada uma das possibilidades imediatas.

Isto é, as decisões são baseadas apenas no efeito imediato delas, e não considera as próximas decisões que deverão ser tomadas. No caso em que se deve decidir qual das minas fornecerá minério para o próximo trem, analisa-se apenas o primeiro trem de cada uma das minas possíveis, escolhendo-se aquele que resultará em menor valor da função de stress para o volume acumulado até então.

Essa mesma regra aplica-se à decisão de qual frente de lavra será minerada para carregar o próximo trem e para a decisão de qual pilha deverá receber o minério quando o trem chegar ao porto.

A decisão de qual pilha será utilizada para carregar o próximo navio, no entanto, é tomada com base na menor medida de stress entre todas as pilhas formadas em relação à especificação do produto demandado pelo navio.

Outro trabalho que se utiliza da mesma metodologia para articulação entre os elementos de simulação e otimização é o de Fioroni (2007), que apresenta a consolidação de uma metodologia para o desenvolvimento e validação de modelos de sistemas ferroviários de transporte de granéis por trens operando em ciclo fechado.

Apesar da semelhança, o trabalho apresentado por Fioroni (2007) restringe-se exclusivamente à ferrovia, desconsiderando aspectos de disponibilidade de carga nas estações de carregamento e de disponibilidade de espaço de armazenagem para descarga dos vagões que chegam aos seus destinos.

Além dessa diferença em relação ao presente trabalho, Fioroni (2007) propôs o acoplamento de uma ferramenta externa ao simulador para solução dos problemas de otimização, a qual teve de ser feita com a utilização de um terceiro software que estabelecesse a comunicação entre eles, ao invés de desenvolver todo o modelo de simulação em linguagem de programação com interface direta com as bibliotecas de otimização disponíveis no mercado.

Entretanto, assim como no presente trabalho, Fioroni (2007) apresentou um modelo que incorpora heurísticas em substituição a regras estocásticas convencionais em modelos de simulação.

A complexidade de seu trabalho, entretanto, reside no grande detalhamento da representação da malha ferroviária e da circulação de trens que, uma vez estabelecido, induz a necessidade de se representar mais realisticamente a destinação dos trens operados na ferrovia.

Fioroni (2007) argumenta que o mecanismo de destinação convencionalmente utilizado em modelos de simulação, o sorteio sem tendência, era inadequado ao modelo pretendido, uma vez que não representa o dia-a-dia do problema real, preocupação fundamental no trabalho por ele apresentado.

A utilização de regras heurísticas, portanto, é apresentada apenas como uma forma de representação de processos decisórios reais em modelos de simulação, e não com o objetivo de analisar diferentes processos decisórios e seu impacto no desempenho do sistema.

Fioroni (2007) apresentou uma única formulação para o problema de direcionamento de trens (único problema tratado heurísticamente), qual seja:

$$\text{Maximizar: } \left\{ \frac{127}{tc} + \frac{209}{td} + \frac{143}{(D_a/D_o)} - [900.000 * (D_o = 0)] - (999 * T_e) \right\} (0.3); \text{ onde:}$$

127, **209**, **143** e **999** foram fatores ajustados durante o processo de validação do modelo;

tc – Tempo de carregamento no terminal;

td – Tempo de deslocamento até o terminal;

D_a – Demanda atendida até o momento;

D_o – Demanda Objetivo; e

T_e – Trens em curso para o terminal.

Calculado esse fator para todos os terminais de carregamento existentes no modelo, receberá o trem aquele que resultar no maior valor.

Fica claro que a formulação apresentada por Fioroni (2007) é bastante mais complexa do que aquela utilizada por Everett (2001), o que se explica pelos diferentes objetivos de ambos os autores. Enquanto o primeiro tem o objetivo de representação precisa da realidade, o segundo pretende estudar a operação do sistema e sugerir alterações que melhorem seu desempenho.

1.9 Conclusão

Como já era esperado, foi possível encontrar um grande número de publicações a respeito de modelos de otimização aplicados a sistemas de transporte ferroviário, o que também é verdade para os modelos simulação-otimização do tipo “*response surface method*”.

O mesmo não pode ser afirmado, entretanto, em relação aos modelos em que utilizam métodos de otimização como substitutos de elementos convencionais dos modelos de simulação, o que é exatamente o caso desse trabalho.

Dessa forma, o trabalho de Everett (2001) foi, sem dúvida, o que mais se aproximou do presente estudo, e por isso será utilizado como referência metodológica para o desenvolvimento subsequente do modelo.

O sistema FCA/EFVM/Tubarão

Conforme apresentado no capítulo de introdução, esse trabalho trata da modelagem de um sistema de transporte ferroviário de grãos. Faz-se importante, dessa forma, apresentar as principais características físico-operacionais do sistema em estudo, de forma que se permita o entendimento das hipóteses realizadas nas etapas de caracterização do problema e de proposição do modelo.

Figura 0.1: Sistema FCA-EFVM-Tubarão

Fonte: Vale

O sistema em estudo compreende a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), a Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM) e o Porto de Tubarão, conforme mostrado na Figura

3.1. Esse sistema, por exceção da quase totalidade dos terminais de carregamento, é operado pela Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce).

No que tange à organização desse capítulo, a seção 1.10 apresenta algumas características físicas das ferrovias FCA e EFVM, a seção 1.11 apresenta os principais aspectos da operação do transporte modelado, como modelo operacional, blocagem e classificação de vagões e programação de trens. A seção 1.12 caracteriza brevemente a organização do porto de Tubarão e de seu pátio ferroviário, incluindo os processos de armazenagem de grãos.

A seção 1.13 apresenta as diversas etapas em que se executa planejamento e produção de transporte na operação real do sistema, desde o planejamento plurianual até a emissão de ordens de carregamento. Por último, a seção 1.14 apresenta uma breve discussão dos mercados mundial e brasileiro de soja (principal produto transportado nesse sistema, como será discutido adiante) como contexto no qual se insere o sistema FCA-EFVM-Tubarão, além de apresentar uma análise mais detalhada da demanda por transporte de grãos pelo sistema em estudo para o ano de 2009³.

1.10 Características físicas da FCA e da EFVM

Essa seção tem como principal intuito fornecer informações para ilustrar os motivos que levam à diferenciação das operações da FCA e da EFVM que se verifica na prática, e que será apresentada na seção 1.11, a qual trata especificamente da operação do sistema ferroviário.

Uma questão freqüentemente levantada na literatura que aborda a operação ferroviária no Brasil é a existência de duas bitolas (espaçamento entre trilhos) distintas no país (1,00 m e 1,60 m). Uma vez que ambas as ferrovias possuem a mesma bitola, 1,00 m, essa questão será ignorada no restante desse trabalho.

³ - Previsão feita pela diretoria comercial da logística da Vale ao final do ano de 2008

1.10.1 Ferrovia Centro-Atlântica (FCA)

A malha da FCA tem uma extensão de mais de 6.500 km operacionais (há inúmeros trechos atualmente desativados) distribuídos conforme ilustrado na Figura 0.2, sendo destinada principalmente ao transporte de carga geral.

Figura 0.2: Distribuição da malha da Ferrovia Centro-Atlântica

Fonte: Vale

Grande parte dessa malha foi construída nos séculos 19 e 20, não tendo sofrido grandes intervenções para melhoria de seus padrões físico-operacionais. Por esse motivo, a maioria da extensão da sua malha suporta apenas locomotivas de pequena potência, vagões de menor peso total e composições com menor número de vagões.

Diversos são os fatores que limitam a capacidade operacional da via, como raios de curvatura muito pequenos, trilhos de perfil muito delgado, altas taxas de

dormentação podre, pátios de cruzamento muito curtos e pontes sem o reforço estrutural necessário.

Por esses motivos, em grande parte da malha, a carga admissível por eixo não passa de 20 toneladas, sendo de 15 a 17,5 toneladas em diversos trechos. No principal corredor de exportação de grãos, que liga a região do triângulo mineiro à Estrada de Ferro Vitória-a-Minas, a carga admissível por eixo foi elevada para 25 toneladas após a realização de diversas obras, o que permite utilizar vagões com melhor desempenho operacional (isto é, melhor relação entre carga transportada e tara do vagão) e locomotivas de maior porte.

Outra característica operacional importante é a relação peso/potência dos trens. Na mesma rota de transporte de grãos citada acima, esse indicador varia de 1,03 ton/CV até 0,42 ton/CV. Nos piores trechos da malha da FCA, no entanto, esse valor chega a meros 0,076 ton/CV.

Apenas a título de ilustração, um caminhão bi-trem com 74 toneladas de peso bruto e um cavalo mecânico de 420 CV de potência⁴ (maior composição rodoviária para grãos em atividade no Brasil) teria uma relação peso/potência de 0,18 ton/CV, superior a muitos trechos da malha da FCA.

Como último fator limitante da capacidade da FCA, pode ser citada a baixa velocidade máxima dos trens, que gira em torno de 40 km/h em grande parte da malha, velocidade que raramente é mantida por longos trechos, uma vez que a ferrovia corta diversos municípios em toda a sua extensão, os quais tem que ser atravessados com velocidades bastante reduzidas por questões de segurança ao tráfego de carros e pedestres que cruzam a via em mesmo nível em diversos pontos.

1.10.2 Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)

A EFVM é uma ferrovia com mais de 900 km de extensão, sendo que os aproximadamente 570 km de sua linha tronco são em via dupla, conforme mostrado na Figura 3.3. Além disso, é uma ferrovia com excelente relação peso/potência (aproximadamente 1,92 ton/CV no sentido do porto de Tubarão), peso admissível

⁴ Fonte: www.aguerra.com.br

por eixo na casa de 25 ton e velocidades máximas de 60 km/h em quase toda a malha.

Figura 0.3: Estrada de Ferro Vitória-a-Minas (EFVM)

Fonte: Vale

Essas características atendem à função principal da ferrovia que é a de transporte de grandes quantidades de minério de ferro, e a coloca na categoria das ferrovias *heavy-haul*, que são aquelas capacitadas para o transporte de cargas pesadas e em grande quantidade.

1.11 Operação ferroviária

Operação ferroviária denota um conjunto de assuntos bastante amplo, que não poderiam ser totalmente cobertos por esse trabalho. Entretanto, os processos mais relevantes à representação da operação ferroviária foram incluídos no modelo de simulação, como modelo operacional, classificação de vagões e formação e despacho de trens, o que faz necessário defini-los adequadamente.

Adicionalmente, serão apresentadas algumas características particulares da operação conjunta de duas ferrovias, que no caso da operação analisada nesse trabalho configura-se pela utilização de vagões em comum (que trafegam desde a origem em uma das ferrovias até o destino na outra) e de frotas de locomotivas dedicadas a cada ferrovia e que acessam um pátio ferroviário em comum, onde as

locomotivas de uma ferrovia deixam os vagões para que as locomotivas da outra ferrovia assumam seu tracionamento daquele ponto em diante.

Algumas atividades existentes na operação do sistema real, como cruzamento de trens trafegando em linha singela, troca de maquinistas e abastecimento de locomotivas, entre outros, não serão tratados nesse texto. Entretanto, uma descrição bastante detalhada de operações ferroviárias reais pode ser encontrada em Haines (2007) e Pachl (2002).

1.11.1 Modelo operacional

Em operação ferroviária, pode-se entender por modelo operacional a composição que trafega em um determinado trecho da ferrovia, expressa por um determinado número de locomotivas e de vagões (especificando-se o tipo/modelo da locomotiva e o tipo/peso bruto dos vagões).

Deve-se ressaltar que, embora possam existir diversos modelos operacionais possíveis para um determinado trecho, em termos de tamanhos de trens (número de vagões) e tração, é natural que se estabeleça um modelo operacional que apresente o melhor desempenho (que pode ser definido como aquele que resulta no menor custo operacional por tonelada transportada).

No Quadro 0.1 são sumarizadas as características físicas mais importantes das duas ferrovias, FCA e EFVM, para o transporte de grãos (os valores correspondem às médias ponderadas pela demanda em cada estação geradora de carga).

Quadro 0.1: Principais indicadores de desempenho ferroviário para o transporte da origem média dos grãos

Indicador ⁵	FCA	EFVM
Distância (km)	750	650
Tempo de percurso (h)	42	29
Velocidade de percurso (km/h)	17,9	22,4
Numero de vagões/trem	40/80	80
Número de locomotivas/trem	3/6	1
Potência total (CV)/trem	8.500/19.000	4.000

⁵ Dados referentes à rota de transporte de soja entre o triângulo mineiro e o porto de Tubarão

Indicador ⁵			FCA	EFVM
Relação	Peso	Potência	0,42	1,92
Peso por eixo (ton)			25	25

Fonte: Vale

Pode-se observar que as duas ferrovias são absolutamente distintas, apesar de poderem compartilhar ativos como vagões e locomotivas, corroborando as informações apresentadas nas seções anteriores deste capítulo quanto às características das malhas das duas ferrovias.

Essa distinção entre as ferrovias é evidenciada na operação do sistema real pela operação de frotas distintas de locomotivas para cada uma das ferrovias e da substancial diferença na formação dos trens operados em cada uma das ferrovias, conforme será detalhado adiante.

As diferenças físicas entre a FCA e a EFVM refletem-se de maneira bastante clara no modelo operacional adotado em cada uma das ferrovias. Enquanto que na EFVM o trem médio é composto com 80 vagões de até 100 toneladas brutas (aproximadamente 80 toneladas de carga) e uma locomotiva de 4.000 CV, na FCA diversos modelos de trem são utilizados.

Por exemplo, no trecho da FCA que vai da estação de Eldorado (uma das estações de intercâmbio entre as duas ferrovias) até a estação de Brejo Alegre no Triângulo Mineiro, o modelo operacional médio é composto por 80 vagões de até 80 toneladas brutas (aproximadamente 60 toneladas de carga), duas locomotivas de 3.600 CV e duas locomotivas de 3.000 CV e duas locomotivas de 2.600 CV (num total de 18.400 CV) no sentido do porto, resultando em 0,35 ton/CV, e exatamente a metade desses ativos (40 vagões mais uma locomotiva de cada tipo) no sentido oposto.

No trecho da FCA entre Brasília e Brejo Alegre a composição média contém 34 vagões de até 80 toneladas brutas e duas locomotivas de 2.600CV, o que resulta em uma relação peso/potência de aproximadamente 0,52 ton/CV. Já o trecho da FCA que liga o ponto de intercâmbio à estação de Pirapora é operado com uma composição padrão de 40 vagões de até 80 toneladas brutas e 4 locomotivas de 2.000 CV, o que significa uma relação peso-potência de 0,40 ton/CV.

De forma a estabelecer um padrão para simplificar a etapa de modelagem, estabeleceu-se como padrão o trem de 40 vagões para a FCA e de 80 vagões para a EFVM em ambos os sentidos.

Quanto à tração, considerou-se que apenas uma locomotiva equivalente transportaria o trem adotado em cada trecho. Para tanto, calculou-se o número de locomotivas que, em cada trecho, corresponderiam à frota real em operação pela simples divisão da potência total disponível para operação no dado trecho pela potência necessária para transporte de um trem de 40 vagões. Como resultado, obteve-se um total de 49 locomotivas em operação na FCA e outras trinta em operação na EFVM, para uma frota de vagões de 4.800 vagões disponíveis, conforme descrito mais adiante na seção 1.19.1.

1.11.2 Blocagem e recomposição de vagões

Segundo Barnhart, Jin e Vance (2000), um bloco de vagões é um conjunto de vagões que possuem os mesmos origem e destino na malha ferroviária e, por isso, não precisam ser reclassificados (i.e., separação de vagões com o objetivo de formar os trens que devem partir de um pátio rumo a outro pátio qualquer).

Uma definição derivada desse conceito é a de lote mínimo de vagões, que consiste em um número mínimo de vagões a ser enviados para um carregamento (i.e. um carregamento é configurado por uma única carga com um único par origem-destino). Em outras palavras, a definição de um lote de n vagões implica na obrigatoriedade de que os clientes da ferrovia transportem carga em quantidades múltiplas de n vezes a capacidade dos vagões, e não apenas em valores múltiplos da capacidade individual dos vagões.

Na prática isso implica no impedimento de que clientes com pouca quantidade de carga a ser transportada (e.g. suficiente para preencher apenas 2 ou 3 vagões) utilizem os serviços da ferrovia. Um lote de n vagões se comporta de forma idêntica a um vagão n vezes maior, com capacidade n vezes maior, tempos de carga e descarga n vezes maiores, etc. A definição de lotes fixos de vagões terá implicações bastante relevantes no modelo apresentado nesse trabalho, como será descrito adiante.

Recomposição de trens é o processo realizado em pátios de classificação e tem por objetivo reunir vagões que venham de origens diferentes, que tenham o mesmo destino e que devam ser transportadas no mesmo trem, ou separar vagões que tiveram a mesma origem, mas tem destinos distintos, conforme descrito por Haines (2007), Barnhart *et al* (2000) e Ahuja, Cunha e Şahin (2005). Esse processo torna-se necessário quando o transporte de uma carga desde a sua origem até o seu destino por um único trem não é considerado a melhor opção.

Outra situação onde é necessária a recomposição de trens é quando há grande diferença de modelo operacional entre trechos distintos. Este é o caso do sistema de transporte de grãos analisado. Uma vez que os modelos operacionais para transporte de grãos adotados para cada uma das ferrovias são distintos entre si, é necessária uma recomposição no intercâmbio entre as duas ferrovias que compõe o sistema.

Na operação real existem dois pontos de recomposição distintos, um que se situa na estação de Capitão Eduardo, que é utilizado pelos vagões que se destinam à estação de Pirapora, e outro que se situa na estação de Eldorado, para aqueles vagões que se destinam às demais estações, ambas as estações muito próximas à cidade de Belo Horizonte, conforme apresentado pela Figura 0.4. Apesar disso, o modelo proposto contará com apenas um ponto de recomposição, conforme descrito no capítulo seguinte desse documento.

Figura 0.4: Pontos de intercâmbio entre FCA e EFVM

1.11.3 Programação de trens

Quando se trata do estabelecimento do horário de partida de um trem, pode-se trabalhar com pelo menos dois modos de operação possíveis: “trens de lotação” e trens com horários fixos.

Os chamados “trens de lotação” são aqueles que partem da sua estação de origem no instante em que todos os vagões designados a ele (cheios ou vazios) são disponibilizados para a partida e os procedimentos de formação do trem são completados. Esse tipo de operação é muito comum em operação de grandes volumes de granéis, principalmente minerais, e em sistemas que não sejam limitados por contratos rígidos de nível de serviço, uma vez que não existe previsão de horário para saída ou chegada dos produtos a seus destinos.

A outra forma de operação possível é a operação com partida de trens em horários programados de acordo com um plano (plano de trens), independente da disponibilização de todos os vagões programados. Essa forma de operação garante melhor nível de serviço aos clientes, e é mais comum em operações com grande número de clientes, origens e destinos, como aquelas que envolvem transporte de contêineres.

Em teoria, o sistema FCA-EFVM-Tubarão de transporte de grãos opera de acordo com um plano de trens, mas a aderência aos horários de partida e chegada dos trens de grãos é extremamente baixa, o que torna sua operação muito parecida com a de “trens de lotação”.

Como consequência disso, as decisões relacionadas à formação e despacho de trens, carregamento de produtos em vagões e gerenciamento de filas de vagões e locomotivas estão sujeitas exclusivamente à disponibilidade de recursos no sistema, e não a horários e regras de operação mais rígidas, o que terá impacto fundamental na etapa de desenvolvimento do modelo.

1.12 O Porto de Tubarão

O porto de Tubarão localiza-se no litoral do Espírito Santo, na região metropolitana de Vitória. Segundo a Agência Nacional De Transportes Aquaviários, ANTAQ, foi o porto com maior movimentação de carga no ano de 2007, ultrapassando a barreira dos 104 milhões de toneladas.

Esse volume divide-se entre os terminais dedicados a operações de minério de ferro e ao terminal dedicado à operações de produtos diversos (TPD), o qual é dividido em um terminal dedicado à importação de fertilizantes e um segundo dedicado à exportação de grãos agrícolas, apresentados na Figura 0.5.

Figura 0.5: Terminais do Porto de Tubarão

A área do porto dedicada à exportação de grãos agrícolas, que é aquele de maior interesse para esse trabalho, possui dois berços de atracação compartilhados com a operação de importação de fertilizantes.

Além disso, o terminal possui estruturas de descarga de vagões e armazenagem de grãos, cuja disposição apresenta-se na Figura 0.6.

Figura 0.6: Detalhe do Terminal de Produtos Diversos de Tubarão.

1.12.1 Descarga de vagões no porto

Os vagões de grãos são descarregados no porto de Tubarão em duas moegas com capacidade para 19 vagões por vez. Cada um desses lotes consome cerca de 190 minutos de uma moega, dos quais cerca de 98 minutos referem-se à efetiva descarga, e os outros 92 minutos são relativos a atrasos provocados pela operação da moega e do posicionamento de vagões pela ferrovia (taxa de utilização de 51,6%).

Esses valores resultam em uma taxa média de descarga de 260 mil toneladas por mês por moega, num total de 520 mil toneladas por mês, de acordo com valores fornecidos pela Vale.

1.12.2 Silos/Armazéns

No porto de Tubarão existem 9 armazéns para armazenagem de grãos, com capacidades que variam entre 43 e 51 mil toneladas cada, totalizando 444 mil toneladas. A administração desses silos é, possivelmente, uma das maiores dificuldades encontradas pelos analistas de planejamento/programação do porto, uma vez que alguns deles são de propriedade de donos de carga (grandes *traders* de grãos agrícolas) e outros são de propriedade da Vale, mas os detalhes dessa questão não serão abordados nesse trabalho. Dessa forma, considera-se que todos os armazéns estão disponíveis para utilização, independente da sua propriedade.

1.12.3 Processamento de navio

A primeira etapa do recebimento de um navio por um porto é o que se chamada nomeação do mesmo, que consiste em especificar qual o navio deverá chegar e quando, ou seja, em qual janela de tempo. A nomeação normalmente ocorre com antecedência de quinze a trinta dias antes da sua chegada, não sendo possível sua alteração.

Após a nomeação, as equipes de planejamento e programação do porto e da ferrovia já sabem qual produto deve ser disponibilizado para embarque no navio, o que permite verificar a disponibilidade desse produto no porto e, eventualmente, tornar prioritário o seu transporte ao longo de todo o trajeto desde o embarque na carga na ferrovia até a descarga dos vagões no porto.

Com a chegada do navio ao porto, segue-se com a emissão de uma ordem de atracação, após a qual seguem a atracação propriamente dita e o carregamento do produto.

1.13 Planejamento e programação de transporte

Até agora, foram descritas as características mais importantes de cada um dos principais componentes do transporte de grãos. Essa seção destina-se a esclarecer o processo de planejamento e programação de transporte integrado do sistema em estudo, composto das ferrovias FCA e EFVM e do Porto de Tubarão.

O processo de planejamento de transporte de grãos é feito com base em diversos horizontes de tempo, com graus de detalhamento e de incerteza compatíveis com a finalidade de cada um desses horizontes de planejamento. Essa seqüência de etapas é conduzida com o objetivo de se fazer um detalhamento maior a cada etapa cumprida, até a efetiva realização do transporte.

Assim, entende-se que a etapa de planejamento plurianual possui o objetivo de manter o plano de transportes dentro das expectativas da companhia operadora do sistema, no caso a Vale, e que seu detalhamento em orçamento, planejamentos mensal e semanal e, finalmente, programação e emissão de ordens de serviço, tenha como resultado a realização do transporte de um conjunto de fluxos que estão alinhados com os objetivos estratégicos da companhia.

A seguir procede-se a uma breve explanação sobre quais os horizontes de planejamento existentes, destacando-se os processos de planejamento em que o presente trabalho pretende colaborar e contribuir. É importante destacar, porém, que os processos de planejamento e programação de transportes não são perfeitamente compartimentados como apresentados a seguir, mas o número e natureza das interferências de um processo de planejamento nos demais são muitos e irrelevantes para o entendimento do problema e do modelo propostos nesse trabalho.

1.13.1 Planejamento Plurianual

O planejamento plurianual é atualizado anualmente, e considera os 5 a 10 anos subseqüentes. Apresenta o menor grau de certeza quanto aos dados dentre todas as etapas de planejamento e destina-se a fornecer à companhia a meta de transporte de carga para o horizonte de sua validade, na forma de uma lista de fluxos de transporte. Sua finalidade mais importante é definir uma lista de investimentos necessários em toda a infra-estrutura de transporte (material rodante, terminais, via, etc.) para cada ano do horizonte (com base em informações muito pouco detalhadas, sendo a demanda de transporte apresentada pelos clientes da ferrovia apenas com as informações de origem, destino e tipo de produto).

Com essas informações, a companhia pode programar a compra de ativos e intervenções na estrutura física da ferrovia, além de poder proceder à assinatura de contratos de longo prazo apenas para aqueles produtos que estão previstos no seu planejamento.

1.13.2 Planejamento Anual

Feito anualmente, o planejamento anual considera, para o ano seguinte, um cenário de demanda com maior probabilidade de acerto, e baseia-se prioritariamente na realização de transportes previstos em contrato entre o operador da ferrovia e donos de cargas.

Nesse horizonte de planejamento algumas informações ainda não estão disponíveis, como previsão do dia/semana de carregamento (conhece-se apenas o valor para cada mês do ano) e especificação de produto (sabe-se apenas que o produto a ser transportado é soja, mas se desconhece o tipo – orgânica, transgênica, comum).

A maior diferença em relação ao planejamento plurianual do ponto de vista prático, entretanto, é a impossibilidade de se fazer aquisição de vagões e locomotivas ou mesmo intervenções de maior porte na via com apenas um ano de antecedência.

Por isso, enquanto o planejamento plurianual concentra-se em mensurar as aquisições e intervenções necessárias para a realização de todos os fluxos de transporte (definido por uma carga, de um determinado cliente e com uma origem e um destino conhecidos) que se mostrarem financeira e economicamente viáveis, o planejamento anual concentra-se em selecionar, dentre os fluxos presentes no planejamento plurianual, aqueles que tragam a maior margem líquida de contribuição possível, limitada pela frota existente de vagões e locomotivas, pela capacidade de circulação de trens em cada trecho, a capacidade de carga e descarga dos terminais e do porto e outras características da ferrovia e do porto, além dos compromissos contratuais já assumidos com os clientes da ferrovia.

1.13.3 Programação mensal

A etapa de programação mensal é aquela em que primeiro se tem conhecimento de todas as características dos produtos a serem transportados e a semana em que eles estarão disponíveis para carregamento nas estações de origem.

Com o objetivo de tentar atender os fluxos de transporte previstos no Planejamento Anual (resultado da etapa anterior na cadeia de planejamento e programação de transporte), essa etapa tem a tarefa de acomodar as alterações ocorridas na demanda e na oferta de transporte previstas pelo planejamento anual à disponibilidade de vagões e locomotivas, à capacidade de tráfego na via permanente e às capacidades dos terminais de carregamento e do pátio ferroviário no porto.

Essa acomodação de alterações se faz importante pois é a última oportunidade de modificações no conjunto de transportes a ser realizado, não sendo possível, em teoria, a inclusão de nenhum outro fluxo de transporte nas etapas subsequentes de programação de transporte da ferrovia.

A verificação de quais fluxos de transporte é possível atender não conta, atualmente, com ferramentas muito sofisticadas, o que torna o processo totalmente dependente da experiência dos analistas da Vale responsáveis pela tarefa. Esses mesmos analistas, em conjunto com representantes das áreas comercial e de operações de

pátios, tomam a decisão, em caso de inexistência de ativos ferroviários (isto é, vagões e locomotivas) suficientes para atendimento de toda a demanda, sobre quais fluxos serão atendidos e quais serão preteridos.

Além disso, os critérios atuais para decisão são intangíveis, pois são frutos de uma negociação feita com base não apenas em informações técnicas dos fluxos e da quantidade de recursos (vagões, locomotivas, moegas, etc) necessários à realização do transporte, mas também em negociações comerciais informais e na experiência dos analistas.

1.13.4 Programação semanal

A característica mais operacional dessa etapa de planejamento também é definida pela forte interação com os setores operacionais da ferrovia, tais como o Centro de Controle Operacional (CCO), que é responsável pelo controle de tráfego e licenciamento dos trens, e as áreas responsáveis pela manutenção de vagões e locomotivas, que são aquelas que garantirão a disponibilidade desses ativos para a realização do transporte. Maiores detalhes sobre as operações de licenciamento e sinalização ferroviários podem ser encontradas em Pachi (2002).

De forma simplificada, essa etapa da programação de transporte tem por objetivo fazer uma última verificação das informações e planejamento realizado na etapa de programação mensal, antes que recursos da ferrovia sejam efetivamente alocados, o que se entende como a movimentação de locomotivas e vagões, carregados ou não, entre duas estações quaisquer.

Com base em informações dos agentes de cargas, fornecidas às suas contrapartes da área comercial da ferrovia, a equipe responsável pela programação semanal tem a tarefa de calcular o número de vagões necessários (isto é, determinando a frota operacional⁶) em cada estação de carregamento, o que é feito com o auxílio de ferramenta especializada cujas especificidades fogem ao escopo desse trabalho.

⁶ Uma frota operacional de vagões consiste em um grupo de vagões que estão habilitados a realizar um determinado transporte, obedecendo todas as restrições relativas ao produto a ser transportado e às operações de transporte (incluindo-se carga e descarga).

1.13.5 Programação diária – Emissão de ordens de serviço

A programação diária tem por finalidade dar autorização para que se inicie o carregamento de vagões e que se emitam os documentos fiscais necessários; entretanto não se deve, nesta etapa, proceder a uma nova priorização dos produtos a serem carregados.

Verifica-se, porém, que os analistas responsáveis pela programação diária alteram a programação de carregamento prevista na etapa de programação semanal através de um processo de priorização de fluxos semelhante àquele da fase de programação mensal, o que sugere que a definição dos produtos que devem ser carregados em cada estação e em cada semana não é tão rígida como o processo de planejamento e programação informado pela companhia faz parecer.

Outras atividades eventuais, como cancelamento de carregamento por problemas quaisquer do agente de carga ou da ferrovia, e ajustes marginais nas quantidades a serem carregadas também podem ocorrer nessa etapa de planejamento, o que não será considerado explicitamente nas etapas posteriores desse trabalho, uma vez que se pode admitir que todos esses fatores estão implicitamente considerados na formulação da chegada de produtos às estações como processos aleatórios.

1.14 Mercado de grãos agrícolas

Diversos são os tipos de grão transportados pelo sistema FCA/EFVM/Tubarão, dentre os quais se incluem soja, milho, trigo (importado), farelos, etc. Durante o desenvolvimento desse trabalho, entretanto, verificou-se que apenas soja nas formas de grão e farelo e milho são exportados pelo sistema em estudo com destino ao porto.

Além de a soja ser a carga mais importante em termos de volumes movimentados, com cerca de 60%, verificou-se também que o milho representa apenas 8% da quantidade total de grãos transportados pelo sistema, conforme será melhor detalhado mais adiante na seção 1.19.2.1.

Por esse motivo, apenas a soja mereceu análise mais detalhada, sendo apresentado um panorama de seu mercado mundial, em que se apresentam os seus maiores produtores e consumidores e os corredores de maior demanda por transporte do granel no Brasil.

1.14.1 Mercado mundial de Soja

Segundo dados publicados no sítio de internet do *United States Department of Agriculture* (2008) para a safra 2006/2007 que encontram-se reproduzidos no Quadro 0.2, a produção mundial foi de 239 milhões de toneladas, dos quais aproximadamente 82% foram produzidos por Estados Unidos, Brasil e Argentina.

Quadro 0.2: Evolução da produção mundial de soja (Milhões de toneladas ao ano)

País	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09 (prev. Out/08)
Estados Unidos	85.013	83.368	86.770	72.824	81.185
Brasil	53.000	57.000	59.000	61.000	62.500
Argentina	39.000	40.500	48.800	46.500	50.500
China	17.400	16.350	15.200	13.500	16.500
Índia	5.850	7.000	7.690	9.300	9.200
Paraguai	4.040	3.640	6.200	6.800	7.200
Canadá	3.042	3.161	3.460	2.700	3.240
Outros	8.413	9.512	9.441	8.066	9.105
TOTAL	215.758	220.531	236.561	220.690	239.430

Fonte: United States Department of Agriculture (2008)

É importante destacar, porém, que as safras de Brasil e Estados Unidos ocorrem em diferentes períodos do ano, o que gera uma enorme pressão para que se escoe toda a produção nacional antes do início da safra norte-americana, de forma que não aconteça sobreposição das ofertas do produto no mercado e conseqüente queda dos preços.

A mensuração do consumo de soja é um pouco mais difícil, uma vez que é resultante do balanço entre produção, importação, exportação e alteração dos estoques de cada país. Entretanto, considerando-se que o consumo de um país em um dado período é igual à soma de sua importação à sua produção subtraída a sua exportação, se pode verificar que os Estados Unidos se constituíram no maior consumidor mundial de soja para o período da safra 2006/2007, com 56 milhões de toneladas, segundo esse mesmo sítio da internet, cujos dados encontram-se apresentados no Quadro 0.3.

É importante destacar, no entanto, que as previsões apresentadas nesse sítio para as safras 2007/2008 e 2008/2009 dão conta de que a China praticamente iguala-se aos Estados Unidos em primeiro lugar no consumo de soja.

Quadro 0.3: Evolução do consumo mundial de soja (Milhões de toneladas ao ano)

País	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09 (prev. Out/08)
China	43.202	44.667	43.926	50.000	52.500
Estados Unidos	55.153	57.789	56.384	41.254	53.969
Argentina	30.124	33.835	41.227	35.950	39.925
Brasil	32.863	31.089	35.515	35.620	35.000
Outros	54.416	53.151	59.509	57.866	58.036
TOTAL	215.758	220.531	236.561	220.690	239.430

Fonte: United States Department of Agriculture (2008)

Os quatro principais consumidores de soja em grão do mundo, então, são responsáveis pelo consumo de mais de 70% de todo o grão produzido no mundo, mas apenas a China apresenta déficit, como se pode depreender do Quadro 0.4. Dessa forma, é de se esperar que as rotas marítimas de transporte de soja com destino à China apresentem-se com destaque em meio às rotas para outros países.

Quadro 0.4: Excedente/Déficit de soja dos principais consumidores (Milhões de toneladas ao ano)

País	2004/2005	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009 (prev. Out/08)
China	-25.802	-28.317	-28.726	-36.500	-36.000
Estados Unidos	29.860	25.579	30.386	31.570	27.216
Argentina	8.876	6.665	7.573	10.550	10.575
Brasil	20.137	25.911	23.485	25.380	27.500

Fonte: United States Department of Agriculture (2008)

1.14.2 Produção e exportação brasileira de soja

O mercado nacional de soja gira, fundamentalmente, em torno da exportação de soja em grão e do beneficiamento da soja para produção de óleo e farelo. Esse segundo altamente demandado pelo mercado de ração animal e também exportado em quantidades expressivas, na casa dos 12 milhões de toneladas em 2007, contra os mais de 23 milhões de toneladas de soja em grão, segundo dados da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) disponíveis em seu sítio na Internet (2008).

Conforme mostrado na Figura 0.7, os maiores corredores de exportação de soja existentes no país são a ligação do estado de Rio Grande do Sul ao porto de Rio Grande, do estado do Paraná ao porto de Paranaguá e a ligação do estado de Mato Grosso ao porto de Santos, no litoral paulista. Esses três corredores responderam por 50% de toda exportação de farelo e grão de soja do Brasil em 2007.

Outras ligações importantes são as do estado de Mato Grosso aos portos de Manaus, Paranaguá e Vitória; Goiás aos portos de Santos e Vitória; Santa Catarina ao porto de São Francisco do Sul; e Maranhão ao Porto de São Luis. Essas ligações correspondem, em conjunto, a outros 25% da exportação de farelo e grão de soja no país.

Figura 0.7: Principais movimentos de exportação de soja e farelo

Fonte: SECEX

Entretanto, se for considerado apenas o Porto de Tubarão, verifica-se que ele foi responsável pela movimentação de cerca de 10% de toda a exportação de soja e farelo no ano de 2007, tendo exportado produtos de São Paulo, Minas Gerais e Bahia, além de Mato Grosso e Goiás, que são os maiores exportadores por aquele porto, também de acordo com a SECEX.

A soja exportada pelo porto de Vitória, como pode ser visto na Figura 0.7, vem principalmente o estado de Goiás, movimento atendido pelo conjunto das ferrovias FCA e EFVM.

1.14.3 Demanda por transporte de grãos no sistema FCA/EFVM/Tubarão

A demanda prevista para o ano de 2009 contemplava um total de pouco mais de 5,1 milhões de toneladas de grãos agrícolas para exportação distribuídas por 11 estações de carregamento, todas elas situadas na malha da FCA, com as estações de Brejo Alegre e Uberlândia responsáveis por quase 60% do total dessa demanda, conforme a distribuição geográfica apresentada na Figura 0.8. As demais 9 estações de carregamento são responsáveis por quantidades bem menos significativas, como também pode ser observado na Figura 3.8.

Figura 0.8: Demanda de transporte de soja e farelo para o ano de 2009 (ton/ano).

Fonte: Vale

1.14.3.1 Sazonalidade

Quanto à distribuição dessa demanda de transporte de soja ao longo do ano, percebe-se uma concentração bastante significativa entre os meses de Abril e

Setembro, em contraste com a demanda bastante inferior dos meses de Janeiro, Fevereiro, Novembro e Dezembro, conforme apresentado no gráfico da Figura 0.9.

Isso ocorre de maneira bastante uniforme em todas as estações de carregamento, uma vez que a colheita de soja se inicia a partir de março, com o fim da estação chuvosa.

Figura 0.9 – Sazonalidade do transporte de grãos no sistema FCA/EFVM/Tubarão

Fonte: Vale

1.15 Conclusão do capítulo

O processo de planejamento aplicado ao sistema de transporte objeto deste estudo evidencia a necessidade de um maior embasamento para a priorização do atendimento aos clientes do serviço de transporte de soja e farelo. Este capítulo apresentou ainda as principais características do sistema ferroviário e do porto que compõe o sistema estudado. Ressaltaram-se as peculiaridades do sistema que precisam ser consideradas na modelagem pretendida, incluindo-se uma breve explanação do mercado mundial e brasileiro de soja de forma a explicitar os efeitos que isso traz sobre a demanda de transporte do sistema FCA-EFVM-Tubarão, em especial a concentração desta demanda em alguns meses do ano.

Caracterização do problema

Esse capítulo tem por objetivo apresentar, de forma objetiva e detalhada, o problema que é objeto da pesquisa e que será modelado. Em linhas gerais, esse problema consiste no transporte de grãos agrícolas pelo sistema ferroviário formado pela FCA e pela EFVM até o porto de Tubarão, compreendendo todos os processos desde a chegada dos caminhões às estações de carregamento na ferrovia até a transferência dos grãos para navios.

O ponto central do problema tratado é o conjunto dos processos decisórios existentes na operação desse sistema, como gerenciamento de filas e distribuição de ativos, os quais também serão discutidos em maior detalhe nesse capítulo.

Pretende-se, através da modelagem proposta, avaliar e determinar um conjunto de estratégias operacionais que resultem no melhor desempenho possível para o sistema, sendo necessário em primeiro lugar definir como medir “melhor desempenho”.

1.16 Figura de mérito para avaliação de desempenho do sistema

A definição de uma figura de mérito para avaliação do desempenho do sistema poderia ser composta por diversas variáveis, como medidas do nível de serviço em cada estação, tempo de espera/*demurrage* total dos navios que chegam ao porto, tempo de espera dos caminhões nas estações de carregamento, taxas de utilização de vagões e locomotivas, etc.

Entretanto, decidiu-se utilizar apenas o total de carga transportada pelo sistema ferroviário como medida de desempenho do sistema e apresentando estatísticas referentes às demais medidas de desempenho do sistema mencionadas acima como forma de se manter o controle sobre as variações que as políticas operacionais estudadas causam em cada uma dessas variáveis.

1.17 Etapas do transporte de grãos

De forma que se possa compreender de maneira mais clara e detalhada o sistema que se pretende modelar, foram identificadas as diversas etapas do transporte ferroviário de grãos, possibilitando desenvolver um modelo representativo do sistema real.

Em linhas gerais, essas etapas correspondem à chegada de caminhões carregados de grãos à estação ferroviária de carregamento, à armazenagem dos grãos na estação de carregamento, o transporte ferroviário dos mesmos, à estadia do grão no porto de embarque e o seu carregamento em navios, conforme ilustrado na Figura 0.1. Cada uma delas é descrita sucintamente a seguir, embora discussões a respeito de capacidade de cada elemento e das hipóteses de modelagem utilizadas serão discutidas no capítulo seguinte desse documento.

Figura 0.1: Estruturas que compõem o processo de transporte ferroviário de grãos

Adicionalmente a isso, serão apresentados os processos decisórios, às quais se faz necessário aplicar estratégias operacionais a fim de alocar recursos.

1.17.1 Chegada de grãos às estações de carregamento

O sistema a ser modelado inicia-se na chegada dos caminhões às estações ferroviárias onde os grãos serão transferidos para vagões.

Os grãos agrícolas considerados no modelo (milho, soja em grão e farelo) chegam às estações de carregamento em diversos tipos de caminhões e sem regularidade, ou cadência, ou seja, o intervalo médio entre as chegadas de dois caminhões consecutivos varia bastante.

Ao chegar a uma dessas estações, o caminhão deve entrar em fila e esperar para ter sua carga transferida para os silos da estação com a utilização de equipamento adequado (e.g. moega), o que só acontece quando esse(s) equipamento(s) de descarga está(ão) livre(s) para receber o caminhão e existe espaço de armazenagem disponível para receber a carga do caminhão.

Vale ressaltar, porém, que uma vez que os produtos transportados por esse sistema são similares, os equipamentos utilizados para sua descarga são os mesmos, e portanto forma-se uma fila única de caminhões para descarga.

1.17.2 Estações de carregamento

Na interface da estação de carregamento com veículos rodoviários, as estações de carregamento devem receber os grãos que chegam em caminhões e são

descarregados em diferentes estruturas de descarga, conforme descrito na subseção anterior.

Na interface com a ferrovia, por outro lado, as estações de carregamento devem não apenas possuir estruturas de carregamento de vagões, mas também possuir uma configuração de linhas ferroviárias que permitam o recebimento e formação de trens e as manobras associadas a essas operações.

Assim como no tocante às estruturas de descarga de caminhões, considerou-se estruturas comuns para carregamento de vagões qualquer que fosse o produto carregado, o que implica na colocação de vagões em fila única no aguardo para carregamento.

À parte de suas interfaces rodoviária e ferroviária, as estações de carregamento possuem um conjunto de silos de armazenagem para estoque das cargas recebidas por via rodoviária e que serão carregadas em vagões ferroviários. O número e a capacidade de cada silo em uma dada estação de carregamento dependem do número e da quantidade de produtos embarcados nessa estação, e tem como uma de suas funções a criação de um *buffer*, na tentativa de evitar que um caminhão chegue à estação para descarregar e não encontre espaço disponível no silo, ou que um trem chegue à estação para carregamento e não encontre produtos suficientes para carregar os vagões.

O dimensionamento do número e capacidade ótimos para os silos nas estações de carregamento, que é função dos custos de implantação e operacional dos silos e do custo que as filas de veículos (trens e caminhões) representam na operação do terminal, não é objetivo desse trabalho, e por isso não será considerado na modelagem. Ao contrário, serão utilizados valores baseados em informações fornecidas pela empresa ferroviária responsável pelo sistema.

Por último, é importante destacar que esse trabalho não tratará da operação de outros produtos que eventualmente possam ocorrer nessas estações ou mesmo das possíveis sinergias ou desinergias provenientes dessas operações que possam afetar a operação de grãos.

- **Processos decisórios envolvidos**

Presumindo-se que haja uma fila de caminhões à espera para descarga, toda a vez em que existir espaço disponível em silos e a estrutura de descarga estiver liberada,

é possível que um caminhão seja descarregado (desde que o produto carregado no caminhão seja o mesmo daquele existente no silo com espaço disponível).

A solução trivial para esse problema seria a priorização do primeiro veículo em fila que atender à condição de compatibilidade de seu produto com espaço disponível em fila, mas pode não ser a melhor opção caso, por exemplo, existam vagões em fila esperando para carregar outros produtos.

Nesse caso, porém, pode ser vantajoso não descarregar nenhum caminhão que esteja em fila e decidir-se esperar por um caminhão que contenha o produto “mais urgente” a ser descarregado na estação. Essa possibilidade, entretanto, não será tratada em maiores detalhes nesse trabalho, podendo ser explorado em futuras pesquisas que abordem esse tema.

O carregamento de vagões é análogo ao descarregamento de caminhões, à medida que um vagão vazio só pode ser carregado se a estrutura de carregamento da estação de carregamento estiver disponível e houver carga nos silos para ser transferida para o vagão em questão.

Diferentemente do caminhão, entretanto, a definição de qual produto deve ser carregado nos vagões é de responsabilidade da ferrovia. Dessa forma, a melhor decisão a tomar não é a de qual vagão deve ser carregado, dada uma alocação de produto a vagão qualquer, mas sim qual produto deve ser carregado em cada vagão disponível para carregamento.

Essa decisão corresponde à emissão de ordem de serviço, e pode ser feita com o vagão a caminho da estação de carregamento ou após a sua chegada. A esse processo decisório agrega-se, então, a possibilidade de escolha do melhor momento para a tomada da decisão ou ainda o impacto que uma menor antecedência em relação ao carregamento pode ter no desempenho do sistema.

1.17.3 Transporte ferroviário

O transporte ferroviário dos grãos, conforme será entendido a partir desse ponto, compreende os procedimentos de formação de trem, trânsito entre estações de origem e destino e desmontagem do trem, além da passagem dos vagões por uma estação intermediária onde passarão por um processo de re-composição, conforme

descrito no capítulo anterior, quando foi descrito o modelo operacional utilizado nessa operação.

É importante salientar, porém, que pelo fato de se estar modelando um sistema que opera em ciclo fechado, a disponibilidade de vagões e locomotivas para formação de trens depende dos processos pelos quais passaram vagões e locomotivas até o momento da formação de trens.

- **Processos decisórios envolvidos**

O despacho de trens carregados das estações de carregamento para a estação intermediária consiste em selecionar um conjunto de vagões para a anexação à locomotiva que tracionará o trem.

Por natural que seja, os vagões carregados e locomotivas disponíveis devem esperar no pátio da estação de carregamento até que haja ao menos uma locomotiva e o número mínimo de vagões necessários para a formação de um trem.

Caso o número de vagões disponíveis seja exatamente o número necessário para que um trem seja formado, então não existe oportunidade de escolha, a não ser que se decida atrasar a saída de um trem a fim de se esperar por um ou mais vagões carregados com produtos distintos daqueles carregados nos vagões prontos para formação dos trens. Esse caso, porém, não será tratado em maiores detalhes nesse trabalho, podendo ser explorado em futuras pesquisas que abordem esse tema.

O mesmo processo de seleção de vagões para formação de trens que ocorre nas estações de carregamento se repete na estação intermediária, mas dessa vez para formação dos trens com destino ao porto.

O último processo decisório relacionado à formação e despacho de trens é a distribuição de vagões vazios para as diversas estações de carregamento, que é aquele que menos características compartilha com as demais decisões envolvidas no problema tratado nesse trabalho.

Para que se decida enviar uma composição de vagões vazios para uma estação de carregamento qualquer é necessário apenas que exista uma locomotiva disponível para realizar o transporte e vagões vazios em número suficiente para compor um trem. Sendo satisfeitas essas duas condições, é **possível** despachar um trem rumo a alguma das estações de carregamento.

Apesar de existir um número pequeno de condições para uma decisão qualquer poder ser colocada em prática, a quantidade de elementos do sistema que pode ser avaliados para suportar essa decisão é bastante grande, desde os “estoques” de vagões vazios e cheios em cada estação, até as quantidades e tipos de cargas disponíveis em cada terminal. Na prática, essa é uma das decisões mais importantes dentre as analisadas nesse trabalho, pois define quais estações receberão vagões vazios para embarque de produtos.

1.17.4 Processamento dos grãos no porto

Uma vez que os vagões carregados chegam ao porto, devem aguardar em fila para descarga em uma das duas moegas de descarga existentes, que comportam 19 vagões por vez, os quais devem estar carregados com o mesmo produto, pois são transportados pelo mesmo equipamento e para o mesmo silo.

A classificação desses vagões carregados dentro do pátio de Tubarão, bem como o seu posicionamento nas moegas é feito por locomotivas dedicadas a esses processos, o que foge ao objetivo desse trabalho, como também o posicionamento dos vagões vazios após a descarga.

Assim como no caso dos silos de armazenagem existentes nas estações de carregamento, os silos disponíveis no porto são em número e capacidade tal que objetivam minimizar a probabilidade de que os vagões que chegam carregados tenham de esperar por liberação de espaço nos silos para serem descarregados, e que os navios que chegam ao porto tenham que esperar para que parte ou mesmo toda a carga necessária para seu carregamento chegue ao porto.

Apesar de ser um tópico dos mais relevantes para a melhoria da operação do sistema real representado nesse trabalho, o dimensionamento dos silos de armazenagem necessários no porto não será considerado nesse modelo e será considerado fixo ao longo do processo de modelagem, da mesma forma como foram tratados os silos das estações de carregamento.

1.17.5 Descarga de vagões no porto

A descarga de vagões no porto é um processo muito parecido com a descarga de caminhões nas estações de carregamento. Isso porque os vagões devem

permanecer em fila enquanto esperam a disponibilização da estrutura de descarga e disponibilização de espaço ocioso em silos de armazenagem.

Enquanto a chegada de caminhões às estações de carregamento é totalmente independente do operador ferroviário, a chegada de vagões carregados ao porto depende exclusivamente das decisões tomadas em cada uma das etapas anteriores pelas quais passam os grãos transportados com destino ao porto.

Essa diferença em relação à descarga de caminhões nas estações de carregamento faz com que essas decisões possam ser parcialmente antecipadas nas etapas anteriores do processo, o que reduz potencialmente o seu impacto no desempenho do sistema.

1.17.6 Carregamento de navios

Conforme já ilustrado, o porto de Tubarão possui um terminal com um único berço de atracação para operação de grãos e um segundo terminal com outro berço de atracação para a operação de fertilizantes. Apesar de existir essa divisão, o terminal de fertilizantes é utilizado de forma eventual para a operação de grãos, o que ocorre quando existe a disponibilidade desse terminal por tempo suficiente para o carregamento de um navio.

Uma vez que se decidiu não considerar a operação de outros produtos e suas interações com o transporte de grãos, apenas um berço será considerado nesse trabalho, conforme será descrito no capítulo seguinte desse documento.

- **Processos decisórios envolvidos**

A atracação e carregamento de navios estão sujeitos às mesmas duas condições básicas que os demais processos decisórios que envolvem filas de veículos para carga e descarga.

A primeira condição é a necessidade de se ter o berço de atracação no porto livre para o navio que vai atracar, enquanto que a segunda condição é ter grãos em estoque em quantidade suficiente para preencher a capacidade do navio.

Analogamente à chegada de caminhões ao sistema, não é possível ao operador do sistema definir qual produto cada navio que chega ao porto deverá carregar, uma vez que isso fica a critério dos donos das cargas.

Dessa forma, é natural que se formem filas de navios para atracação no porto não só por conta da eventual chegada de navios (a chegada é aleatória) em um intervalo de tempo inferior ao necessário para carregamento dos mesmos, mas também pela chegada de navios aos quais estão designados produtos que não se encontram disponíveis para carregamento no porto. No caso de formação de filas, entretanto, o porto deve pagar *demurrage* ao armador, que consiste em uma multa por atraso na atracação/carregamento.

Em ambos os casos, é necessário que se escolha qual navio deverá atracar no porto sempre que o berço de atracação estiver livre, de forma a se conseguir o melhor desempenho possível do sistema.

Embora a escolha do navio que deverá atracar, em detrimento da operação em fila PEPS, não seja uma prática observada em operações reais, entendeu-se relevante estudar qual o impacto que esse tipo de operação teria sobre o desempenho do sistema, tanto em termos da quantidade de produto transportada, quanto nos tamanhos de filas de veículos e taxas de ocupação dos diversos recursos do sistema.

Modelo proposto

A análise do problema de transporte de grãos agrícolas pelo sistema ferroviário, descrito no capítulo anterior, indica que, para a sua correta modelagem e a fim de assegurar uma representação adequada da realidade da operação, requer uma abordagem que considere simulação e otimização de forma integrada.

A escolha de um modelo híbrido otimização-simulação deve-se, basicamente, ao fato de que a utilização de apenas uma abordagem, otimização ou simulação, resultaria em um modelo que não atenderia alguns dos objetivos dessa pesquisa, estabelecidos nos questionamentos levantados anteriormente na seção 1.3, em particular a correta avaliação de políticas operacionais que maximizem o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos composto por duas ferrovias distintas e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino a um único porto

A alternativa de desenvolvimento de um modelo de otimização puro não seria capaz de tratar adequadamente as características fortemente estocásticas do sistema, as

quais teriam de ser deixadas de lado em um modelo desse tipo. Vale frisar que esse componente estocástico é muito mais forte na chegada de grãos aos pátios de carregamento e chegada de navios ao porto, processos que não se encontram sob o domínio do operador ferroviário.

Por outro lado, o desenvolvimento de um modelo de simulação puro se destinaria exclusivamente a representar o sistema da forma como ele opera, e não um modelo que pudesse responder às indagações da melhor forma de operar o sistema, conforme apontado na seção 1.3. Mais especificamente, um modelo de simulação puro considera regras de decisão baseadas em ordem de chegadas, ponderadas por algum critério de prioridade, não permitindo uma avaliação baseada em uma análise global do sistema. Por exemplo, a decisão de qual navio em fila para atracação deve ser priorizado para embarque pode depender de uma análise mais complexa que assegure a minimização do tempo total de espera e carregamento.

Dessa forma, o modelo que se julgou ideal para esse problema deve representar as características estocásticas do problema real e permitir que o modelo seja orientado à maximização de uma função objetivo (definida para fins desse trabalho como maximização do volume transportado), o que permite, juntamente com resultados clássicos de modelo de simulação como filas, taxas de ocupação e tempos de espera, avaliar as estratégias operacionais que serão discutidas adiante.

A forma encontrada para a união dessas duas vertentes em um único modelo, diferente da abordagem convencional de múltiplas simulações seqüenciais orientadas por um algoritmo otimizante (técnica conhecida na literatura como “*Response Surface Method*”, ver Jacobson e Schruben (1989)), foi a utilização de um modelo de simulação cujas regras de tratamento de filas e distribuição de recursos fossem mais sofisticadas do que aquelas normalmente utilizadas (fila, pilha, proporcional a um determinado fator, etc.), em consonância com o proposto por Everett (2001) e por Fioroni (2007).

Conforme apontado anteriormente neste trabalho, a implementação desse modelo nos pacotes de simulação a que se teve acesso seria bastante complexa, o que levou à decisão de implementá-lo diretamente em linguagem de programação.

Muitos dos recursos que uma linguagem de programação poderia oferecer, entretanto, não se fizeram necessários, como estruturas complexas para

armazenagem de dados em memória ou grande velocidade de processamento (pois o modelo não necessita dar respostas em tempo real). Dessa forma, considerou-se indiferente a escolha da linguagem computacional, ficando a decisão atrelada à facilidade de implementação do modelo, o que levou à escolha da linguagem VBA (*Visual Basic for Applications*) em ambiente Microsoft Excel.

Nesse capítulo serão detalhados, então, os seguintes aspectos concernentes ao modelo:

- Dados do sistema real que suportaram o desenvolvimento do modelo;
- Configuração do modelo de simulação e as considerações simplificadoras mais relevantes;
- Cálculo analítico da capacidade do sistema;
- Validação do modelo de simulação; e
- Regras de priorização desenvolvidas para integração ao modelo de simulação.

1.18 Dados de Entrada

Os dados necessários para a simulação foram solicitados junto à Vale (antiga Companhia Vale do Rio Doce), operadora do sistema modelado. São eles:

- Matriz Origem-Destino de granéis;
- Frota de Vagões;
- Frota de Locomotivas;
- Capacidade de carga dos Vagões;
- Formação típica dos trens;
- Tempo de trânsito entre estações ferroviárias;
- Tempo para formação e desmonte de trens;
- Capacidade de descarga de vagões no porto;
- Capacidade de armazenagem no porto;
- Capacidade média de navios;

- Capacidade de carregamento do porto;
- Capacidade de carga dos caminhões;
- Tempo de descarga por caminhão;
- Capacidade de descarga de caminhões nos terminais;
- Capacidade de carregamento de vagões nos terminais;
- Tempos de carregamento de vagões; e
- Tempo de descarga de vagões no porto.

Devido a exigências de confidencialidade e segurança de dados, diversas informações solicitadas à Vale não foram fornecidas, e outras o foram em formato distinto daquele solicitado. Por esse motivo, não puderam ser realizadas análises estatísticas que permitissem confrontar e validar os resultados com a realidade para a maioria dos processos modelados.

As únicas informações fornecidas em formato de banco de dados, e que permitiriam análise mais detalhada, foram o relatório do sistema de licenciamento de trens da FCA e os dados de atracação de navios ao píer.

Uma vez que o sistema de licenciamento da ferrovia fornece apenas os instantes de entrada e saída dos trens em um determinado trecho e não considera paradas para abastecimento, troca de maquinista ou recomposições, o banco de dados fornecido não contém os dados necessários para a determinação de tempo de trânsito médio entre estações quaisquer.

Entretanto, a partir da informação fornecida pela Vale de que o tempo de tráfego entre pátios de cruzamento é a principal componente do tempo total de trânsito entre duas estações quaisquer, o banco de dados fornecido foi utilizado para o estudo da distribuição de probabilidades para o tempo de trânsito entre estações cujo valor médio corresponde aos valores médios fornecidos pela companhia para cada par de estações consideradas.

Quanto à base de dados relativa à atracação de navios, não foi possível utilizá-la, uma vez que a mesma contém exclusivamente os instantes de atracação e desatracação, sem fornecer dados de capacidade dos navios ou o instante em que eles chegaram à região do porto e comunicaram estar prontos para atracação. Além

disso, o intervalo médio entre navios deveria ser compatível com a demanda considerada (de um ano futuro) e não com o transporte realizado em outro ano qualquer.

1.19 Modelo de simulação

O submodelo de simulação foi elaborado para servir de base ao modelo simulação-otimização que se construiu a seguir e fornecer uma base de comparação para os resultados do modelo final. Por conta da necessidade de inclusão das regras de decisão nesse modelo, buscou-se definir um esquema simples o suficiente para permitir a análise do efeito de cada regra implementada.

Uma vez que esse modelo consiste na circulação de vagões e locomotivas em circuito fechado, cada mudança ocorrida em um dos elementos do sistema tem impacto direto ou indireto nos demais elementos do sistema. Essa interação é apresentada pelo pseudocódigo do modelo apresentado na forma do **anexo I** desse trabalho e cujo resumo é representado pela Figura 0.1.

EVENTO	ELEMENTOS/EFEITOS												
	Locomotiva colocada em fila	Vagão vazio colocado em fila	Vagão carregado em fila	Caminhão colocado em fila	Chegada do navio definida	Navio colocado em fila	Estado de silos atualizado	Libera Moegas	Libera Carregadores de navios	Iniciar descarga de caminhão	Iniciar carregamento de vagão	Sair com trem de carregados	Sair com trem de vazios
Caminhão chegando à est. de carregamento													
Final do processo de descarga de caminhão													
Chegada de vazios às est. de carregamento													
Final do processo de carregamento de vagão													
Chegada de carregados à est. interm.													
Chegada de carregados ao porto													
Chegada de vazios à est. interm													
Final do processo de descarga de vagão													
Final do processo de carregamento de navio													
Chegada de Navios													
Nomeação de navios													

Figura 0.1 – Interação entre elementos do modelo de uma ferrovia em ciclo fechado

Após as simplificações propostas em relação ao sistema real, a estrutura final do modelo, apresentada na Figura 0.1, será detalhada em duas subseções distinta, para melhor entendimento.

A primeira subseção é a de **recursos e processos do sistema**, que concatena os veículos que trafegam na ferrovia (vagões e locomotivas), estruturas físicas de suporte ao transporte (estações de carregamento, moegas de descarga, silos, etc) e o conjunto de processos que demandam certa quantidade de tempo e pelos quais caminhões, navios e vagões devem passar.

A segunda subseção é a de **demanda por transporte**, que contém todas as informações sobre a chegada de caminhões e navios às extremidades do sistema.

1.19.1 Recursos e processos do sistema

Do conjunto de recursos do sistema fazem parte uma frota homogênea de 4.800 vagões 100% disponíveis⁷, 49 locomotivas equivalentes⁸ disponíveis⁹ operando na FCA e 20 locomotivas disponíveis¹⁰ operando na EFVM, as malhas ferroviárias da FCA e EFVM, as estações carregamento, a moega de descarga no porto, silos de armazenagem das estações de carregamento e porto, berço de atracação e estrutura de carregamento de navios.

O termo “processo” é definido para o modelo em questão como toda atividade produtiva a que se sujeita um ou mais veículos considerados no modelo (vagões, locomotivas, caminhões e navios) e à qual esteja associado um tempo de duração diferente de zero. Dentre esses processos estão a descarga de caminhões, o carregamento de vagões, a formação e desmontagem de trens, o transporte ferroviário, descarga de vagões e o carregamento de navios.

Uma vez que diversos processos que consomem recursos do sistema real não foram representados no modelo, como troca de equipagem, abastecimento de locomotivas, cruzamento de trens, entre outras, o impacto (tempo) médio desses processos foi adicionado àqueles processos representados no modelo, de forma que fosse preservada a validade do modelo,

Os processos considerados no modelo são:

⁷ Frota total menos o número máximo de ativos previstos para estar em manutenção durante o período simulado

⁸ Conceito discutido na seção 1.11.1

⁹ Idem 7

¹⁰ Idem 7

- Descarga de caminhões;
- Carregamento de vagões;
- Descarga de vagões;
- Carregamento de navios;
- Montagem de trens;
- Transporte ferroviário; e
- Desmontagem de trens.

Além desses processos, o único outro fator que implica em gasto de tempo é a espera em fila, a que estão sujeitos caminhões, vagões, locomotivas e navios.

Na subseção a seguir serão apresentados cada um dos processos associados aos diversos recursos do modelo e os aspectos de modelagem mais relevantes associados a eles.

1.19.1.1 Estações de carregamento

São quatro os processos associados às estações de carregamento: Descarga de caminhões, carregamento de vagões, montagens de trens e desmontagem de trens. Entretanto, alguns outros relevantes aspectos de modelagem merecem ser discutidos, como parâmetros numéricos utilizados para tratar esses quatro processos, e as hipóteses simplificadoras adotadas, o que se faz a seguir.

A descarga de caminhões que chegam às estações de carregamento é modelada como ocorrendo em uma única estrutura de descarga, e uma vez que não se dispõe de dados sobre os tempos de descarga para elas, foi arbitrado um tempo de descarga que resultasse em uma taxa de ocupação da estrutura de 75% no período pico de demanda, resultante de uma distribuição triangular dos tempos de descarga.

Quanto à formação de filas de caminhões para descarga, considera-se um tempo limite de 36 horas após o qual o caminhão é retirado da fila e é considerado “demanda perdida”. Essa hipótese se faz necessária por não ter sido considerado razoável assumir que os caminhões ficariam em fila indefinidamente. Esse artifício tem como objetivo refletir a hipótese de que existe um nível de serviço mínimo que deve ser oferecido aos caminhões que chegam carregados de grão de forma a evitar

que eles sejam direcionados a outras estações de transbordo/porto pelo dono da carga.

Não foram encontradas referências bibliográficas para esses valores, mas a análise de sensibilidade realizada mostrou pequena dependência (para valores entre poucas horas até vários dias) do resultado final em relação a esse valor, o que reduz a possibilidade de que qualquer valor arbitrado condicione os resultados desse trabalho.

A armazenagem de grãos é modelada como feita em silos com alocação a produtos específicos e capacidade fixos durante todo o período simulado. Além disso, por não se dispor de informações da capacidade total de armazenagem das estações de carregamento, considera-se que a soma das capacidades de armazenagem nas estações de carregamento seja igual à do porto e distribuída entre as estações de carregamento de acordo com a demanda de cada um, o que é bastante conservador, uma vez que capacidade de armazenagem tende a ser muito mais barata (e por isso muito mais abundante) quanto mais longe na cadeia de transporte se está do porto marítimo.

O carregamento de vagões também é modelado como feito em uma única estrutura com desempenho regido por uma distribuição triangular e sem consideração de tempo adicional para que se troque do carregamento de um produto para o carregamento de outro (*setup* do equipamento). Uma vez que não se dispunha de dados de tempo de duração para esse processo, adotou-se um tempo de carregamento que resulte em uma taxa de ocupação da estrutura de 75% no período pico de demanda.

Quanto à configuração de linhas ferroviárias, considera-se que todas as estações possuem espaço ilimitado para recebimento, formação de filas e composição de trens para partida.

1.19.1.2 Malha e transporte ferroviários

A malha ferroviária considerada nesse trabalho é composta por um conjunto de trechos de via singela entre estações, sem restrições de capacidade e aos quais estão associadas distribuições de probabilidades de tempo de percurso cujos valores médios foram fornecidos pela Vale. Cada um desses trechos ferroviários foi

definido pela união dos pontos de interesse para o modelo, que são as quatro estações de carregamento (uma das quais também é o ponto de intercâmbio entre as ferrovias) e o porto, critério que resultou na definição de três trechos na FCA e apenas um na EFVM.

O transporte ferroviário foi modelado como um processo bastante simples, uma vez que alguns componentes desse processo não foram considerados relevantes para os objetivos desse trabalho.

Os principais processos reais não incluídos explicitamente no modelo foram o cruzamento e ultrapassagem de trens, a quebra de trens, o reabastecimento de locomotivas, a troca de maquinistas e o acoplamento/desacoplamento de locomotivas auxiliares (utilizadas para transposição de trechos íngremes); entretanto, o seu impacto médio sobre o tempo de transporte entre estações foi considerado na forma de soma de uma parcela de tempo extra ao tempo de trânsito em cada trecho ferroviário.

Essa simplificação da representação da operação dos trens, embora significativa, está de acordo com a forma atualmente utilizada pela companhia operadora do sistema para dimensionamento de material rodante na ferrovia, e foi considerada suficientemente boa para as análises propostas.

Os processos de desmontagem e recomposição de trens na estação intermediária, para reclassificação de vagões de acordo com o destino, foram mantidos, pois os modelos operacionais das duas ferrovias são distintos.

Quanto à estação intermediária, entende-se que a transferência de vagões e locomotivas entre as duas estações de intercâmbio em operação (Eldorado e Capitão Eduardo), bem como a sua proximidade (40,8km), podem ser representados, sem prejuízos à representatividade do modelo, por uma operação equivalente à de uma única estação. Essa estação intermediária única foi, então, representada pela estação de Belo Horizonte, conforme explicitado na Figura 0.2.

Figura 0.2: Estações de intercâmbio em relação a Belo Horizonte

1.19.1.3 Processamento de grãos no porto

O processamento de grãos no porto compreende as etapas de chegada de composição de vagões carregados, descarga dos vagões em moegas ferroviárias, armazenagem de grãos em silos e transferência dos mesmos para os navios.

Assim como nas demais estações ferroviárias do sistema, os tempos para formação e desmontagem de trens também foram considerados no pátio ferroviário do porto, incluídos atrasos relacionados aos processos não considerados explicitamente no modelo.

Quanto às dimensões do pátio ferroviário no porto, considerou-se que ele tem tamanho suficiente para todas as operações necessárias, mesma hipótese adotada para o pátio da estação intermediária única representando as duas existentes, e para os pátios das estações de carregamento.

Quanto ao processo de descarga de vagões, considerou-se um modelo de moega única. Uma vez que a demanda (e a quantidade de soja transportada pelo sistema real) apresentada é bastante superior à capacidade informada para as moegas ferroviárias, arbitrou-se uma capacidade de descarga de 754 mil toneladas/mês (contra os cerca de 520.000 toneladas/mês informados como sendo a capacidade), o que corresponde a uma taxa de utilização de 75%, valor considerado suficientemente adequado pelos analistas que forneceram os valores reais. Além disso, considerou-se que essa moega única simulada tem capacidade para um único

lote de 10 vagões, de forma a atender especificamente o tamanho do lote definido para a ferrovia; assim, todo o sistema opera com base em um único lote de vagões (no caso da operação com mais de um lote, poderia existir uma situação em que não existem dois lotes do mesmo produto para descarga, o que adicionaria razoável complexidade na implementação do modelo sem uma melhoria equivalente na representatividade do sistema modelado).

Quanto aos silos de armazenagem, a associação das 444 mil toneladas¹¹ de capacidade estática de armazenagem aos produtos considerados no modelo é considerada fixa, e a capacidade alocada a cada produto também fixa ao longo do tempo e proporcional à demanda de cada um deles no trimestre de maior demanda.

1.19.1.4 Carregamento de navios

O carregamento de navios foi modelado como um processo simples a ocorrer em um único berço de atracação e utilizando um único equipamento de carregamento.

Todos os tempos necessários às manobras de atracação e desatracação foram adicionados ao tempo necessário para carregamento do navio, de forma que puderam ser omitidos no modelo matemático.

Considerou-se tamanho único de navio igual a 42 mil toneladas e que equivale ao tamanho médio dos navios que atracam no porto de Tubarão para carregamento dos grãos.

Considerou-se, também, um berço de atracação com uma capacidade de carga que correspondesse àquela do píer dedicado às operações de granéis agrícolas, adicionada da capacidade referente aos períodos em que o píer dedicado à operação de fertilizantes é disponibilizado para carregamento de granéis agrícolas. Isso resultou na capacidade de carregamento informada pela operadora do sistema, o que resultou em uma capacidade máxima de atracação/carregamento equivalente a 57 navios de 42.000 toneladas por mês (2,4 milhões de toneladas), ou 72% de ocupação durante o período de pico de demanda.

Sabe-se que, na operação real, o porto não aceita a nomeação de um navio caso esteja previsto atraso na chegada ao porto de produtos a serem embarcados, ou em

¹¹ Fonte: Vale

caso de haver grande fila de navios para atracação. Entretanto, a inclusão de uma regra de decisão para aceitação ou não da nomeação de um navio foi descartada por não estar diretamente relacionada à operação ferroviária, mas por ter o potencial de impactar negativamente seu desempenho quando alguma decisão não ótima de não nomeação de um navio seja tomada.

A forma encontrada para contornar esse problema foi o estabelecimento de um tempo máximo em que um navio ficaria em fila no porto (72 horas), tempo após o qual ele “desistiria” da carga, sendo considerado “demanda perdida”. A interpretação desse resultado, no entanto, não é a de que certos navios chegariam ao porto e sairiam após certo tempo sem ter conseguido carregar, mas que a nomeação desse conjunto de navios não deveria ter sido aceita pelo porto, tendo em vista tanto a indisponibilidade da carga a embarcar quanto a espera excessiva para atracar.

Quanto ao tempo limite arbitrado, se o considerou adequado para o modelo desenvolvido, e assim como para o tempo de desistência de caminhões verificou-se pequena dependência do resultado final em relação a esse valor (para valores entre poucas horas até vários dias), o que reduz a possibilidade de que qualquer valor arbitrado condicione os resultados desse trabalho.

1.19.2 Demanda por transporte

A demanda por transporte ferroviário de grãos decorre de dois fenômenos distintos. O primeiro é a chegada de caminhões às estações de carregamento, e a segunda é a chegada de navios ao porto.

Na operação real esses processos têm uma óbvia relação de dependência, mas ela fica a cargo do dono da carga, o que priva o operador da ferrovia de um maior controle sobre a sincronização entre carregamento dos vagões na origem e carregamento de navios no porto.

Por esse motivo, os dois fenômenos foram representados no modelo como processos de chegada independentes, mas mantendo-se a “oferta” de navios por tipo de produto igual às demandas por transporte ferroviário (chegada de produtos às estações de carregamento) em cada período simulado, assegurando um balanço de massa no sistema (tudo que chega de caminhão deve ser embarcado).

A chegada de caminhões às estações de carregamento foi mantida aleatória do tipo Poisson, sendo apenas após o sorteio do instante de chegada do caminhão que o seu produto é definido através de um sorteio sem tendência, de acordo com as proporções dos volumes de cada produto operado na estação.

O mesmo processo foi utilizado para a chegada de navios ao porto, mas o número de navios para cada produto em cada trimestre possui um limite superior de 110% da demanda programada, com arredondamento para cima, tendo em vista que a capacidade dos navios pode acarretar um número pequeno de navios a ser nomeado, principalmente para os produtos menos expressivos.

É necessário frisar, entretanto, que os processos de chegada de navios e caminhões não são ajustados a fim de garantir o balanço de massa cada vez que um caminhão desiste de descarregar ou um navio desiste de atracar. Os efeitos dessa hipótese poderão ser verificados no capítulo de resultados computacionais.

1.19.2.1 Tipos de produtos

A demanda considerada para esse trabalho corresponde à projetada, no final de 2008, para ser transportada durante o ano de 2009, ocasião em que foram levantados todos os dados, e é composta por cerca de 20 diferentes produtos.

Essa diferenciação acontece não somente pela existência de diferentes tipos de produtos, como farelo, milho, soja em grão, soja transgênica em grão, etc, mas também pela existência de diversas companhias do setor de produção de grãos transportando seus produtos pelo sistema FCA-EFVM-Tubarão, os quais eventualmente demandam operação segregada das demais.

De forma a simplificar a modelagem do problema, a demanda foi agrupada em quatro produtos diferentes, desconsiderando-se os clientes da ferrovia como fator determinante para distinção entre produtos, e utilizando a descrição do produto como único critério.

Essa consideração garante a manutenção do caráter multi-produto do modelo, ao mesmo tempo em que elimina um nível de discretização da demanda incompatível com o modelo proposto nessa pesquisa. Na prática, isso corresponde à consideração de que todos os donos de carga fazem operação em *pool*, que nada

mais é do que a operação conjunta de diversos donos de carga na qual cada um é dono de uma porcentagem da carga total.

Essa agregação resulta em um conjunto de quatro produtos: farelo de soja, milho e dois tipos de soja em grão, conforme apresentado na Figura 0.3

A última consideração feita acerca da matriz de demanda utilizada é a manutenção da proporção de produtos para cada uma das estações ao longo de todo o ano. Ou seja, ao longo de todo o período simulado, a proporção dos produtos carregados em cada estação foi considerada constante, uma vez que analisar o caso em que essas proporções variam ao longo do ano seria necessário também incluir a alocação de capacidade de estoque em silos/armazéns.

Figura 0.3: Composição da demanda após a agregação de produtos

1.20 Capacidade limite do sistema de simulação

A fim de possibilitar uma análise mais precisa das diversas regras de priorização avaliadas nessa pesquisa, é relevante dispor de uma estimativa inicial da capacidade do sistema. Apesar disso, e uma vez que se trata de um problema estocástico, não é possível definir analiticamente a capacidade do sistema, embora seja possível estimar a capacidade de cada um dos seus subsistemas e encontrar aquele que dispõe da menor capacidade individual dentre todos os subsistemas.

Com base nos recursos do sistema ferroviário e dos tempos médios para carga, descarga, formação de trem, carregamento de navios, etc., estimou-se analiticamente a capacidade de cada um dos elementos do sistema para um período

de três meses, o qual será comparado com a demanda do trimestre simulado de maior demanda, conforme mostrado no Quadro 5.1.

Quadro 0.1: Capacidade estimada de diversos elementos do modelo estocástico

Componente do sistema	Capacidade de:	Dados modelados	Considerações realizadas	Capacidade anual*	Excedente em relação à demanda**
Moegas de caminhão	Moega	Taxa de descarga	Taxa de ocupação de 75%	6,907,000	35%
Terminais de carregamento	Carregador de vagões	Taxa de carregamento	Taxa de ocupação de 75%	6,825,000	33%
Terminais de carregamento	Silos	Volume armazenado	Giro de 2 vezes/mes	7,914,000	55%
Ferrovia	Vagões	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	8,430,000	65%
Ferrovia	Locomotivas FCA	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	5,173,000	1%
Ferrovia	Locomotivas EVM	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	5,561,000	9%
Moega ferroviária	Moega	Taxa de descarga	Taxa de ocupação de 75%	6,718,000	31%
Porto	Silos	Volume armazenado	Giro de 2 vezes/mes	7,914,000	55%
Porto	Carregador de navios	Taxa de carregamento	Taxa de ocupação de 75%	7,092,000	39%

* - Capacidade do trimestre pico ajustada para a capacidade anual pela aplicação do fator de pico (demanda trimestre pico / demanda anual) da demanda

Do Quadro 0.1 pode-se concluir que o limite superior de capacidade do sistema é apenas 1% superior à demanda, correspondente à capacidade excedente das locomotivas da FCA.

O fato de essa folga ser bastante pequena para um sistema ferroviário como o modelado deverá ser levado em consideração quando da análise dos resultados, uma vez que se entende muito pouco provável o atendimento da demanda em sua totalidade, algo que se verifica na prática ao examinar os resultados de anos anteriores.

1.21 Verificação do modelo de simulação

A verificação do modelo foi realizada por duas formas distintas. A primeira delas foi a observação de que, a partir dos dados de entrada utilizados, o valor do volume transportado de acordo com o modelo é compatível com o volume real transportado.

O volume transportado pelo modelo foi da ordem de 4,02 milhões de toneladas, contra uma demanda da casa de 5,2 milhões de toneladas e um recorde real

verificado do sistema ferroviário-portuário (até o ano de 2007) na casa de 4,7 milhões de toneladas (atingido em um momento em que já se dispunha de todos os recursos representados no modelo). Entendeu-se, então, que essa diferença de pouco menos de 17% do resultado do modelo totalmente estocástico em relação ao desempenho do sistema real indica uma boa representatividade do sistema real pelo modelo puramente estocástico.

A segunda forma de verificação do modelo foi o processamento de cenários que se distinguiam por variações em parâmetros de entrada e a observação dos seus efeitos nos resultados do modelo, com o objetivo de demonstrar a sensibilidade do modelo a cada um desses parâmetros.

Os parâmetros selecionados para esse experimento foram a capacidade dos silos das estações de carregamento e do porto e número de locomotivas da FCA e da EFVM.

No caso da análise de sensibilidade em relação à variação das capacidades dos silos, aplicou-se um crescimento que variou de 0 a 90% nas capacidades de **todos** os silos ao mesmo tempo, tanto aqueles das estações de carregamento quanto aqueles situados no porto. O resultado, mostrado na Figura 0.4, revela grande sensibilidade em relação a esse parâmetro, o que está de acordo com a expectativa em relação ao teste.

Figura 0.4: Análise de sensibilidade à variação de capacidade dos silos

A análise da variação da frota de locomotivas foi feita de maneira muito semelhante, aplicando-se à frota de locomotivas da FCA e da EFVM o **mesmo** fator de crescimento, que variou entre 50% de redução da frota até 40% de aumento da mesma.

Figura 0.5: Análise de sensibilidade à variação da frota de locomotivas

Os resultados, apresentados na Figura 0.5, demonstram também forte dependência do desempenho do modelo em relação à frota de locomotivas para uma faixa que vai até 120% da frota real, exatamente de acordo com o esperado. A estabilização da quantidade transportada quando se aumenta a frota acima de um determinado nível reflete o aparecimento de um excedente de locomotivas em relação ao número de vagões, o que resulta nessa estabilização da carga transportada.

1.21.1 Número de repetições

Uma vez que o modelo tem diversos componentes estocásticos, fez-se necessário determinar um número adequado de repetições que permitisse calcular com consistência os resultados médios do modelo e, assim, poder comparar os resultados das regras de priorização analisadas, o que se fez a partir da análise da evolução da média do volume transportado em uma sequência de mil simulações, conforme apresentado na Figura 0.6.

Figura 0.6: Evolução da diferença em relação à média conforme o número de repetições

Percebe-se que a média das dez primeiras iterações já é o suficiente para fornecer um valor médio para o volume transportado com um desvio em relação à média das mil iterações em torno de apenas 3,5%, e em torno de 1,1% para as primeiras 50 iterações. Entretanto, optou-se por realizar um total de 100 iterações de cada experimento, o que corresponderia a uma variação de menos de 1% em relação à média de mil iterações do modelo analisado.

1.22 Regras de priorização

No dia-a-dia da ferrovia se diz que um sistema fechado de transporte de granel como o que é objeto da presente pesquisa pode ser “empurrado” ou “puxado”, o que depende tanto da forma como se opera a própria ferrovia quanto da disponibilidade de produtos para transporte e da chegada de navios ao porto.

Por “empurrado”, entende-se que o sistema funciona com o princípio básico de tentar atender toda a carga que chega às estações da ferrovia na ordem em que ela chega, movendo para a outra extremidade do sistema, o porto nesse caso, a responsabilidade de armazenar a carga até que exista um navio disponível para transportá-la.

Já em um sistema “puxado”, a regra básica do sistema é tentar atender aos navios que chegam ao porto, priorizando-se para embarque nas estações de origem e para

o tráfego ao longo da ferrovia aquelas cargas que deverão ser carregadas nos navios que se encontram mais próximos ao porto.

A noção prática é de que sistemas puxados funcionam melhor do que os empurrados, principalmente por apresentarem menores tempos de fila, embora isso não tenha sido demonstrado de forma objetiva pelos analistas da companhia operadora do sistema consultados. Apesar dessa noção prática, o modelo desenvolvido considerou regras de priorização com base em ambas as possibilidades, conforme será discutido em detalhe a seguir.

As regras de priorização desenvolvidas aplicam-se a três tipos de problemas distintos. O primeiro tipo é o de carregamento de veículos vazios (vagões e navios). Essa situação ocorre quando existe uma fila de navios maior ou igual a dois, cada qual com uma demanda para um produto diferente, ou quando existe um ou mais vagões vazios para serem carregados em uma estação em que se existe mais de um produto disponível para ser carregado.

O segundo tipo de problema é a priorização de veículos em fila carregados com produtos distintos, que podem ser caminhões esperando para serem descarregados ou vagões esperando para serem transportados para outra estação (intermediária ou porto) ou descarregados no porto.

O terceiro tipo contém apenas uma decisão: A distribuição de vagões vazios que partem do ponto de intercâmbio entre as ferrovias com destino às estações de carregamento. Essa decisão consiste em definir qual estação de carregamento receberá cada um dos lotes de vagões vazios que chegam do porto e devem ser encaminhados para novo carregamento.

Tendo em vista que o primeiro passo em todas as decisões estudadas foi sempre definir uma ordem de prioridade dos produtos de forma objetiva, as estratégias para solução dos três tipos de problema puderam ser bastante semelhantes entre si, pois passam a ter apenas a função de encontrar a ação (dentro um número pequeno de possibilidades) que “atenda” ao produto em um maior grau de prioridade possível.

1.22.1 Priorização de produtos

Conforme discutido anteriormente, o sistema modelado nesse trabalho pode ser operado como um sistema *puxado*, quando se prioriza o transporte de produtos

necessários para carregamento nos navios que chegam ao porto, ou *empurrado*, quando se prioriza o transporte dos produtos que primeiro chegam às estações de carregamento. Isso levou à separação das figuras de mérito para priorização de produtos propostas nesse trabalho em dois grupos: aquelas possivelmente empregadas em sistemas **puxados**, e naquelas identificadas com sistemas **empurrados**.

As figuras de mérito consideradas para dar base à priorização de produtos consideram análises de diferentes conjuntos de elementos do modelo, seguindo a notação abaixo:

p – Índice que identifica o tipo de produto;

E – Estação de carregamento;

CN – Carga nominal dos navios;

CC – Carga nominal dos caminhões;

CV – Carga nominal dos vagões;

VT_i^p – Lista dos vagões em trânsito, onde p é o produto transportado;

CAP_p^E – Capacidade de silagem em cada estação E para cada produto p ;

S_p^E – Quantidade de produto p armazenado em cada estação E ;

${}_iFC_p^E$ – Filas de caminhões i nas estações E , carregados com produto p ; e

${}_iFN_p$ – Filas de navios i , a serem carregados com produto p ;

1.22.1.1 Figuras de mérito para sistemas empurrados

Conceitualmente, para que uma regra de priorização de produtos faça com que o modelo apresente funcionamento do tipo *empurrado* deve-se analisar prioritariamente o estado dos recursos do sistema associados às estações de carregamento, tais como silos de armazenagem, filas de caminhões à espera de descarga e disponibilização de vagões vazios para carregamento.

Dessa forma, tenta-se atingir a meta de colocar toda a carga possível dentro do sistema, à medida que se evita a perda de caminhões carregados devido ao excesso de tempo de espera em fila.

1.22.1.1.1 Ocupação percentual de silos nas estações de carregamento

A única figura de mérito para priorização de produtos que apresentou impacto potencialmente bom no desempenho do sistema empurrado foi a análise da ocupação percentual dos silos nas estações de carregamento.

No caso da priorização de produtos para o carregamento de vagões, pode-se utilizar essa figura de mérito para realizar o carregamento daquele produto que ocupar a **maior** porção de seu silo na origem. Dessa forma, busca-se garantir disponibilidade de espaço para a descarga de qualquer caminhão que chegue à estação de carregamento.

De forma análoga, pode-se aplicar essa mesma regra de priorização para subsidiar a distribuição de vagões vazios para as estações de carregamento, também conferindo caráter empurrado ao sistema.

De modo mais formal, a priorização de produtos deve ser feita de acordo com a seguinte expressão: $\max \frac{S_p^E}{CAP_p^E} (0.1)$.

1.22.1.2 Figuras de mérito para sistemas puxados

A operação puxada do sistema pode ser feita por meio da análise de um número muito maior de elementos do que aqueles utilizados quando se deseja operar o sistema de forma empurrada.

Além da análise dos próprios silos de armazenagem das estações de carregamento, pode-se verificar o estado dos silos no porto, fila de navios (incluindo-se os já nomeados), os vagões em trânsito com destino ao porto e os vagões em fila para descarga na moega portuária, o que pode levar a diferentes figuras de mérito, conforme será discutido a seguir.

1.22.1.2.1 Ocupação percentual de silos nas estações de carregamento

A priorização de produtos com base no estado dos silos das estações de carregamento pode ser feita de forma a dar características de sistema puxado na operação do sistema sob condições bastante específicas.

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual de seu silo quando da escolha do caminhão que será descarregado, confere-se

caráter puxado ao sistema, uma vez que se descarrega o produto com maior chance de se esgotar no sistema, o que poderia resultar na formação de filas de navios.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita de

acordo com a expressão: $\min \frac{S_p^E}{CAP_p^E} (0.2)$

1.22.1.2.2 Ocupação percentual de silos no porto

A priorização de produtos com base no estado dos silos localizados no porto é uma das abordagens mais simples dentre as estudadas nesse trabalho que conferem características de sistema puxado à operação do sistema.

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual de seu silo no porto quando da escolha do caminhão que será descarregado, de qual produto será carregado no próximo vagão, qual lote de vagões será transportado e qual será descarregado no porto, confere-se caráter **puxado** ao sistema, uma vez que se prioriza o produto que é mais necessário no porto.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita de

acordo com a expressão: $\min \frac{Silo_p^{porto}}{CAP_p^{porto}} (0.3).$

1.22.1.2.3 Ocupação percentual de espaço no porto: Silos e navios

Uma evolução natural do critério de priorização anterior é a consideração da capacidade dos porões de navios nomeados ou já em fila quando se analisa o volume total de armazenagem no porto.

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual do espaço de armazenagem do porto e dos porões dos navios em fila/nomeados quando da escolha do caminhão que será descarregado, de qual produto será carregado no próximo vagão, qual lote de vagões será transportado e qual será descarregado no porto, confere-se caráter **puxado** ao sistema, uma vez que se prioriza o produto que é mais necessário no porto.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita de

acordo com a expressão: $\min \frac{S_p^{porto}}{CAP_p^{porto} + CN * (\sum_{i=1}^n t_i FN_p)} (0.4).$

1.22.1.2.4 Ocupação percentual de espaço no porto: Vagões, silos e navios

A próxima evolução do critério de priorização anterior é a consideração adicional da carga dos vagões já carregados (em qualquer ponto do sistema), considerando-os como “carga com chegada iminente ao porto”.

Considerando-se prioritário aquele produto que tiver a **menor** ocupação percentual do espaço de armazenagem do porto e dos porões dos navios em fila/nomeados (e considerando-se a carga dos vagões carregados como já disponíveis no porto) quando da escolha do caminhão que será descarregado, de qual produto será carregado no próximo vagão, qual lote de vagões será transportado e qual será descarregado no porto, confere-se caráter **puxado** ao sistema, uma vez que se prioriza o produto que é mais necessário no porto.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita de

acordo com a expressão:
$$\text{Min } \frac{S_p^{\text{porto}} + CV * (\sum_{i=1}^n VT_i^p)}{CAP_p^{\text{porto}} + CN * (\sum_{i=1}^n i FN_p)} \quad (0.5).$$

1.22.1.2.5 Número de navios em fila

Um critério bastante simples de priorização de produtos é fazê-lo de acordo com o número de navios com demanda para cada produto que estejam nomeados/em fila, tornando prioritário aquele produto que for demandado para carregamento pelo maior número de navios aguardando em fila

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita pela seleção do primeiro navio em fila para carregamento do produto cujo carregamento é solicitado pelo maior número de navios em fila. O que matematicamente pode ser representado por:
$$\text{Max } \sum_{i=1}^n i FN_p \quad (0.6).$$

1.22.1.2.6 Disponibilidade absoluta de espaço em silo no porto

Uma abordagem alternativa à figura de mérito “ocupação percentual de silos no porto” é a priorização do produto para o qual exista o maior espaço disponível em silos em termos absolutos. Em uma primeira análise, concluiu-se que essa abordagem poderia levar ao atendimento desigual aos diversos produtos transportados pelo sistema como consequência da diferente parcela que cada um

deles representa do total transportado, mas decidiu-se pela sua implementação para que a hipótese de atendimento desigual pudesse ser verificada.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita pela seleção do produto que atender ao seguinte critério de seleção:

$$Max(CAP_p^{porto} - S_p^{porto}) \quad (0.7).$$

1.22.1.2.7 Ocupação absoluta de espaço: Silos e navios

Seguindo a mesma linha de análise adotada na proposta do critério de priorização anterior, propôs-se a correspondente em termos de disponibilidade absoluta de espaço considerada figura de mérito “ocupação percentual de espaço no porto”.

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita pela seleção do produto que atender ao seguinte critério de seleção:

$$Max(CAP_p^{porto} + CN * \sum_{i=1}^n iFN_p S_p^{porto}) \quad (0.8).$$

1.22.1.2.8 Ocupação absoluta de espaço: Vagões, silos e navios

Finalmente, será testada a regra de priorização de disponibilidade absoluta de espaço no porto considerando os silos, os navios em fila e os vagões já carregados no sistema, analogamente ao que foi proposto para a figura de mérito “5.5.1.2.4 Ocupação percentual de espaço no porto: Vagões, silos e navios”

Em termos matemáticos, a priorização de produtos nesse caso deve ser feita pela solução do seguinte problema de maximização:

$$Max(CAP_p^{porto} + CN * \sum_{i=1}^n iFN_p - S_p^{porto} - CV * \sum_{i=1}^n VT_i^p) \quad (0.9).$$

1.22.2 Processos decisórios

Em um modelo de simulação estocástica convencional estão embutidas diversas decisões que representam decisões operacionais reais, como gerenciamento de filas e distribuição de recursos. Nos modelos tradicionais, entretanto, essas decisões costumam ser representadas por regras bastante simples (PEPS ou UEPS para o tratamento de filas) ou por princípios derivados de teoria de probabilidades (distribuição de recursos de acordo com a demanda média, por exemplo), o que não representa necessariamente os processos reais, uma vez que os operadores do sistema tomam decisões relacionadas a gerenciamento de filas e distribuição de

recursos com base no estado do sistema no momento de cada decisão, e não simplesmente com base nos valores médios ou distribuição de probabilidades associados a cada decisão.

De forma a entender quais dessas decisões tem maior impacto sobre o resultado do modelo quando da aplicação das diversas regras de priorização apresentadas, foram mapeados todos os processos decisórios existentes no modelo proposto, os quais são apresentados a seguir.

1.22.2.1 Carregamento de vagões – Programação na estação intermediária

A definição de qual produto será carregado em cada lote de vagões vazios despachados da estação intermediária é, certamente, um dos processos decisórios com relação mais direta com as atividades desenvolvidas na operação real da ferrovia.

Uma vez que cada estação de carregamento da ferrovia opera mais de um produto, é necessário decidir qual o produto que será carregado nos vagões que partem da estação intermediária com destino a qualquer uma dessas estações.

1.22.2.2 Carregamento de vagões – Programação no carregamento

Uma variação bastante simples do processo decisório anterior é a definição do produto a ser carregado nos vagões vazios apenas na hora do próprio carregamento, ao invés de tomar essa decisão no momento de despacho dos vagões na estação intermediária.

Essa alternativa tem a vantagem de evitar que se forme uma fila de vagões para carregamento de um produto que pode, momentaneamente, não estar disponível para carregamento.

Entretanto, a sua utilização reflete um menor grau de planejamento da ferrovia no processo de programação de carregamento, e pode não corresponder tão adequadamente à situação real quanto a programação do carregamento durante o despacho na estação intermediária.

1.22.2.3 Carregamento de navios

No caso do carregamento de navios, aos quais produtos já estão associados por sorteio quando gerados no modelo, a decisão que deve ser feita é de qual navio deve ser carregado. Essa decisão aplica-se à situação em que existem dois ou mais navios em fila aguardando para serem carregados com produtos distintos.

Não foram encontradas operações reais em que o porto não opere de acordo com a ordem de chegada (PEPS), o que parece ser um “padrão de mercado”. Entretanto, a avaliação do potencial impacto que uma política operacional desse tipo teria sobre o sistema permite estimar adequadamente o custo que a operação PEPS impõe ao sistema como um todo em termos de volume total carregado.

1.22.2.4 Montagem de trens carregados nas estações de carregamento

A montagem de trens nas três estações de carregamento também é um processo decisório relacionado com o gerenciamento de filas, e a substituição de uma regra do tipo PEPS por um critério de priorização tem por objetivo selecionar, dentre os lotes carregados e prontos para transporte, aqueles que transportam os produtos com maior grau de prioridade de acordo com a regra de priorização selecionada.

1.22.2.5 Montagem de trens carregados na estação intermediária

Igualmente à decisão anterior, essa se destina a formar um trem composto pelos lotes que transportam os produtos com maior grau de prioridade dentre todos os lotes carregados disponíveis, com as diferenças de que pela estação intermediária passam todos os vagões carregados no sistema, e são formados trens com oito lotes de dez vagões carregados, ao invés de quatro lotes.

1.22.2.6 Descarga de caminhões

A descarga de caminhões que chegam às estações de carregamento está condicionada exclusivamente à disponibilidade da moega e à existência de espaço vazio nos silos de armazenamento, qualquer que seja a regra operacional de gerenciamento de filas adotada.

Dessa forma, toda vez que a moega de descarga estiver ociosa, existir espaço disponível em silos e existirem caminhões aguardando para serem descarregados, é

possível substituir a regra tradicional de gerenciamento de filas (PEPS) e selecionar para descarga um caminhão que contenha um produto com maior grau de prioridade em detrimento daquele que se encontra no primeiro lugar da fila.

1.22.2.7 Descarga de vagões no porto

A descarga de vagões no porto é análoga à descarga de caminhões nas estações de carregamento, sendo necessárias à sua inicialização a disponibilidade da moega ferroviária e de espaço nos silos de armazenagem. Apesar da similaridade entre as duas operações, é necessário fazer a hipótese adicional de que sempre existirá espaço disponível para a manobra de vagões no pátio ferroviário no porto.

1.22.2.8 Distribuição de vagões

A distribuição de vagões é o processo decisório mais complexo dentre os existentes na operação do sistema real e, talvez por isso, seja aquele de mais inadequada representação em modelos de simulação estocástica convencional.

Em um modelo puramente estocástico quando aplicado ao modelo proposto, a distribuição de vagões vazios seria realizada de forma proporcional à demanda por vagões de cada ponto de carga. A alternativa estudada nesse trabalho, por outro lado, propõe o envio dos vagões vazios para aquela estação que tiver disponibilidade do produto prioritário e que se encontrar mais próximo à estação intermediária.

De forma a garantir a eficácia do procedimento, entretanto, é necessário verificar a disponibilidade de caminhões carregados para descarga e o número de vagões já disponibilizados para carregamento em cada estação, de forma que evite a formação de filas de vagões vazios à espera de produto para carregamento nas estações mais próximas enquanto as estações mais distantes da estação intermediária ficam ociosas.

1.22.3 Aplicação de regras de priorização a processos decisórios

Uma vez que as regras de priorização de produtos focam, cada uma delas, elementos muito específicos do modelo, a associação de algumas regras de priorização a certos processos decisórios não faria sentido.

Um possível exemplo de incongruência gerada pela combinação de todos os processos decisórios a todas as regras de priorização seria escolher para atracação o navio que tivesse demanda para carregamento do produto que tivesse mais espaço disponível em silo em vez de escolher aquele que tiver com o silo mais cheio.

Uma vez que são muitas as combinações possíveis, 72 para ser mais exato, decidiu-se não apresentar os motivos pelos quais se excluiu cada uma das possibilidades, mas apenas o resultado dessa análise na forma do Quadro 0.2.

Quadro 0.2: Matriz de aplicação de regras de priorização a processos decisórios

Critério de priorização	Processo Decisório							
	Produto que estiver ocupando o menor percentual de seu silo no porto	Produto que tiver a menor relação entre carga no porto e capacidade de silagem + capacidade de navios em fila	Produto que tiver a maior ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a menor ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a maior fila de navios	Produto que tiver o menor valor de carga no porto, mais carga em trânsito, menos capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver o menor proporção de carga no porto, mais carga em trânsito, em relação à capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver a maior capacidade livre de silo no porto
Atribui produto para carregamento no despacho de vagões vazios na estação intermediária	X	X	NA	NA	X	X	X	X
Seleciona vagões carregados para formação de trem na estação intermediária	X	X	NA	NA	X	X	X	X
Atribui produto para carregamento no instante de carregamento do vagão	X	X	NA	NA	X	X	X	X
Seleciona os caminhões a serem descarregados	X	X	NA	X	NA	X	X	X
Seleciona vagões carregados para formação de trem nas estações de carregamento	X	X	NA	NA	X	X	X	X
Seleciona os vagões a serem descarregados no porto	X	X	NA	NA	X	X	X	X
Escolhe o produto prioritário na hora de atracação de navio	NA	NA	NA	NA	X	NA	NA	NA
Distribuição de Vagões	X	X	NA	NA	X	X	X	X

Experimentos computacionais

A simulação do sistema estocástico, conforme já mencionado na seção de validação do modelo, apresentou um resultado de 4,0 milhões de toneladas transportadas, o que estava de acordo com o esperado e a cerca de 15% (a menos) do resultado do sistema real. Uma alternativa para se analisar o resultado do modelo estocástico, no entanto, é contabilizar o volume total de grãos não transportados (demanda perdida), que configura a margem sobre a qual as regras de priorização propostas podem apresentar melhora.

Nesse capítulo, o volume transportado pelo modelo estocástico, e em particular a demanda perdida naquela configuração, serão utilizados como referência para os resultados dos modelos que incorporam as diversas regras de priorização sendo analisadas.

Uma vez que não seria viável simular todas as mais de 10 milhões de combinações possíveis entre regras de priorização e processos decisórios, decidiu-se adotar uma abordagem mais simples, realizando, em primeiro momento, uma análise uma-a-uma das 53 combinações possíveis de cada uma das regras de priorização com cada um dos processos decisórios, conforme matriz de associação apresentada no capítulo anterior no Quadro 0.2.

Após essa etapa de análise das 53 combinações de cada uma das regras de priorização com cada um dos processos decisórios, foram então analisadas combinações entre regras de priorização e processos decisórios que apresentaram resultados positivos, de forma a se determinar o melhor conjunto de regras de decisão/processos decisórios para o sistema de transporte considerado nesse trabalho.

Uma vez que o número de possíveis combinações seria ainda bastante grande (cerca de 200.000), decidiu-se adotar uma abordagem heurística na busca da melhor combinação das diversas possibilidades de associação de regras de decisão a processos decisórios, conforme será detalhado adiante.

Foram analisados também os histogramas de tempo de espera para as filas em diversos pontos do sistema para que se pudesse inferir quais foram os pontos do modelo em que a implementação de regras de priorização teve o maior impacto, e o

perfil da demanda atendida, de forma que se pudesse verificar como a implementação de diferentes regras de priorização influencia o atendimento aos diversos produtos e estações de carregamento operados.

Antes de se proceder a essas análises, entretanto, decidiu-se também analisar um cenário em que os excessos de capacidade em cada um dos subsistemas que compõem o modelo fossem semelhantes, de forma a se verificar a aplicabilidade das regras de priorização a um diferente conjunto de condições operacionais e cujos resultados são apresentados conjuntamente com aqueles do cenário correspondente ao modelo real.

1.23 Cenário com equilíbrio de capacidade

Conforme destacado na seção 1.21 de verificação do modelo e apresentado no Quadro 0.1, os diversos elementos do sistema modelado apresentam diferentes excessos de capacidade. Uma vez que essa assimetria do sistema pode condicionar o desempenho das regras de priorização estudadas, decidiu-se analisar um cenário em que o modelo apresentasse excedentes de capacidade semelhantes para todos os elementos do sistema.

Como se pode perceber ao analisar o Quadro 0.1, os únicos elementos do sistema que apresentavam excessos de capacidade muito distintos dos demais eram as frotas de locomotivas da FCA e da EFM.

De forma a não descaracterizar completamente o sistema modelado, decidiu-se incrementar a frota de locomotivas de ambas as ferrovias até atingir um excedente de capacidade compatível com o excedente de capacidade dos terminais de carga de caminhões e carga e descarga de vagões, conforme pode ser visto no Quadro 0.1. Essa alteração corresponde a um total de 65 locomotivas equivalentes na FCA e de 37 locomotivas na EFVM, quantidades bastante superiores às frotas existentes.

Quadro 0.1: Excesso de capacidade após alteração de frotas de locomotivas

Componente do sistema	Capacidade de:	Dados modelados	Considerações realizadas	Capacidade anual*	Excedente em relação à demanda**
Moegas de caminhão	Moega	Taxa de descarga	Taxa de ocupação de 75%	6,907,000	35%
Terminais de carregamento	Carregador de vagões	Taxa de carregamento	Taxa de ocupação de 75%	6,825,000	33%
Terminais de carregamento	Silos	Volume armazenado	Giro de 2 vezes/mes	7,914,000	55%
Ferrovia	Vagões	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	8,430,000	65%
Ferrovia	Locomotivas FCA	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	6,862,000	34%
Ferrovia	Locomotivas EVM	Tempos de ciclo	tempos em fila iguais a zero	6,859,000	34%
Moega ferroviária	Moega	Taxa de descarga	Taxa de ocupação de 75%	6,718,000	31%
Porto	Silos	Volume armazenado	Giro de 2 vezes/mes	7,914,000	55%
Porto	Carregador de navios	Taxa de carregamento	Taxa de ocupação de 75%	7,092,000	39%

* - Capacidade do trimestre pico ajustada para a capacidade anual pela aplicação do fator de pico (demanda trimestre pico / demanda anual) da demanda

Após a montagem do modelo com esse cenário de maior capacidade procedeu-se à avaliação do modelo estocástico correspondente a ele, o qual resultou em 4.16 milhões de toneladas transportadas, um incremento de 3,7% em relação ao cenário básico e um atendimento adicional de 13,5% da demanda perdida por aquele modelo, o que é um aumento bastante pequeno se considerado ao grande incremento no número de locomotivas disponíveis no cenário alternativo.

1.24 Combinações uma-a-uma

As combinações uma-a-uma realizadas apresentaram, em sua maioria, valores consistentes com o esperado, com reduções de quase 38% na demanda perdida pelo modelo estocástico quando considerado o modelo com a capacidade original, e 32% quando considerado o modelo com excesso de capacidade compatibilizada entre os diversos subsistemas, conforme apresentado nas tabelas do Quadro 0.2 e do Quadro 0.3.

Apesar desses resultados, algumas das combinações testadas resultaram em piora no desempenho do sistema, resultados que também foram consistentes entre os cenários analisados. Esse fato pode ser mais bem verificado no gráfico da Figura 0.1, o qual também permite verificar que existem dois grupos bastante distintos de

combinações de regras de priorização a processos decisórios, um primeiro que tem resultados bastante negativos sobre o desempenho do sistema e um segundo que é composto por modelos que apresentaram resultados semelhantes àquele do modelo estocástico a moderadamente superiores a ele.

Outra questão bastante importante que essa figura aponta é o fato de que o incremento da quantidade de produto transportado no cenário alternativo de capacidade foi consistentemente 8,5% menor do que aquele obtido quando considerado o cenário básico, o que corresponde, basicamente, a resultados absolutos muito semelhantes nos dois cenários de capacidade para as combinações uma-a-uma de melhor desempenho.

Esse fato é um primeiro indicativo de que um incremento no número de locomotivas aumenta muito pouco a capacidade do sistema como um todo, conforme se verifica no gráfico da Figura 0.2, que apresenta um desempenho para o cenário alternativo de capacidade que é superior ao cenário básico por apenas 3,75% na média de todos os cenários, diferença que cai para menos de 1% quando considerados as duas combinações uma-a-uma que apresentaram o melhor desempenho em ambos os cenários.

Figura 0.1: Comparação do desempenho de combinações uma-a-uma entre os dois cenários avaliados

Analisando-se ambos os gráficos, o Quadro 0.2 e o Quadro 0.3 não foi possível detectar grandes discrepâncias no que diz respeito ao desempenho de cada uma das combinações testadas entre os dois cenários, o que permite analisar em maior

detalhe apenas os resultados do cenário básico, utilizá-los como referência para a análise do cenário alternativo e para gerar as combinações de regras de priorização e processos decisórios que seriam rodadas na fase seguinte da análise.

Figura 0.2: Desempenho absoluto de combinações uma-a-uma dos dois cenários avaliados

A partir dos resultados do Quadro 0.2 verifica-se que o processo decisório que apresentou os melhores resultados foi a seleção de produto a ser carregado apenas na hora do próprio carregamento. A razão mais provável para esse resultado é o fato de que esse procedimento evita que existam vagões vazios esperando pela chegada de produtos nas estações de carregamento, uma vez que só podem ser selecionados aqueles produtos que estiverem efetivamente disponíveis para carregamento.

Outro processo decisório que se mostrou bastante importante foi a de seleção de vagões para transporte nas estações de carregamento, a qual foi consistentemente mais eficiente do que a aquela concernente à seleção de vagões para transporte na estação intermediária.

A última regra de decisão a apresentar resultados consistentemente positivos foi a distribuição de vagões vazios na estação intermediária, que chegou a reduzir em quase 6% a perda de demanda quando associada a uma das regras de priorização.

Assim, a partir dos resultados do Quadro 0.2, foram selecionadas as associações de regras de priorização a processos decisórios que seriam analisados em conjunto na fase seguinte dessa análise, e que será apresentada na seção seguinte desse texto.

Quadro 0.2: Alteração da perda de produção com associação uma a uma (cenário de capacidade original)

Critério de priorização	Processo decisório							
	Produto que estiver ocupando o menor percentual de seu silo no porto	Produto que tiver a menor relação entre carga no porto e capacidade de silagem + capacidade de navios em fila	Produto que tiver a maior ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a menor ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a maior fila de navios	Produto que tiver o menor valor de carga no porto, mais capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver o menor valor de carga no porto, mais capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver a maior capacidade livre de silo no porto
Atribui produto para carregamento no despacho de vagões vazios na estação intermediária	-96.1%	-95.4%	-1.1%	N.A.	-109.1%	-102.8%	-102.3%	-130.0%
Seleciona vagões carregados para formação de trem na estação intermediária	11.0%	11.6%	N.A.	N.A.	7.6%	10.9%	11.6%	12.1%
Atribui produto para carregamento no instante de carregamento do vagão	34.3%	35.9%	6.1%	N.A.	-16.6%	34.3%	36.9%	33.7%
Seleciona os caminhões a serem descarregados	2.8%	3.6%	N.A.	1.4%	N.A.	0.9%	0.6%	1.7%
Seleciona vagões carregados para formação de trem nas estações de carregamento	2.7%	5.3%	N.A.	N.A.	2.7%	3.0%	3.8%	4.3%
Seleciona os vagões a serem descarregados no porto	2.4%	1.9%	N.A.	N.A.	-118.6%	1.4%	0.0%	1.1%
Escolhe o produto prioritário na hora de atracação de navio	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	2.1%	N.A.	N.A.	N.A.
Distribuição de Vagões	2.9%	2.1%	-5.8%	N.A.	3.6%	3.6%	5.7%	4.0%

Quadro 0.3: Alteração da perda de produção com associação uma a uma (cenário alternativo de capacidade)

Critério de priorização	Heurística								
	Produto que estiver ocupando o menor percentual de seu silo no porto	Produto que tiver a menor relação entre carga no porto e capacidade de silagem + capacidade de navios em fila	Produto que tiver a maior ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a menor ocupação percentual de silos na Origem	Produto que tiver a maior fila de navios	Produto que tiver o menor valor de carga no porto menos capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver o menor valor de carga no porto, mais carga em trânsito, menos capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver o menor proporção de carga no porto, mais carga em trânsito, em relação à capacidade de silagem e dos navios em fila	Produto que tiver a maior ocupação percentual de silos no porto
Atribui produto para carregamento no despacho de vagões vazios na estação intermediária Seleciona vagões carregados para formação de trem na estação intermediária	-101.2%	-109.8%	-0.6%	N.A.	-118.9%	-118.9%	-113.6%	-110.6%	-136.9%
	15.8%	14.4%	N.A.	N.A.	10.0%	12.9%	13.7%	15.9%	16.1%
	29.7%	30.6%	5.9%	N.A.	-13.6%	29.3%	31.3%	32.0%	27.0%
	3.2%	-0.1%	N.A.	1.8%	N.A.	2.0%	1.4%	1.5%	-1.1%
Seleciona os caminhões a serem descarregados Seleciona vagões carregados para formação de trem nas estações de carregamento	1.3%	2.8%	N.A.	N.A.	0.5%	1.5%	-0.1%	2.9%	1.0%
	2.7%	3.7%	N.A.	N.A.	-107.5%	3.9%	5.0%	3.7%	3.3%
	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	-2.1%	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
	7.2%	6.1%	-7.4%	N.A.	6.6%	8.0%	10.0%	8.7%	6.8%
Distribuição de Vagões									

1.25 Composição de regras de decisão

Como já mencionado anteriormente, o número de possíveis combinações a testar nessa etapa da análise seria extremamente grande. Portanto se fez necessário determinar um procedimento para reduzir o número de combinações a serem analisadas.

A forma que se encontrou para reduzir o número de combinações analisadas assemelha-se ao método de Hooke & Jeeve, Bazaraa et al. (2006), à medida em que realiza buscas por melhores soluções em uma dimensão (processo decisório nesse caso) por vez.

Como ponto de partida para esse procedimento escolheu-se a combinação da melhor regra de priorização (desde que tenha apresentado impacto positivo na análise uma-a-uma) para cada um dos processos decisórios. A partir desse ponto, iniciou-se um processo iterativo em que se testava a melhor configuração encontrada para o modelo com apenas uma regra de priorização de produtos diferente para um dos processos decisórios.

Após testar todas as regras de priorização para o processo decisório sendo analisado, escolhia-se aquela regra que tivesse resultado em melhor desempenho do sistema e passava-se a analisar um novo processo decisório da mesma forma que a anterior.

Como exemplo desse procedimento, tomemos o modelo que tem em sua configuração a mesma regra de priorização, por exemplo a regra 10, aplicada a todos os processos decisórios e que tenha um determinado desempenho.

Inicia-se o processo de busca alterando-se a regra de priorização aplicada ao 1º processo decisório por cada uma das regras de priorização disponíveis e avaliando-se o desempenho do modelo para cada uma dessas novas configurações. Após todas as regras de priorização terem sido testadas seleciona-se aquela que resultou no melhor desempenho e, caso não seja a regra de priorização original, a 10 nesse caso, toma-se essa nova configuração como base e repete-se o processo para o próximo processo decisório, até o oitavo e último processo decisório.

Uma vez que esse processo analisa apenas um pequeno espectro das combinações possíveis, e o faz apenas nas imediações da solução inicial proposta, decidiu-se repetir o processo (sempre utilizando como configuração inicial a melhor

configuração encontrada na tentativa anterior) até que nenhuma combinação testada na vizinhança da solução inicial resultasse em melhor desempenho do sistema modelado.

Por último foram simuladas alternativas escolhidas com base em uniformidade nos critérios de priorização para todos os processos decisórios selecionados, o que poderia ser considerado uma alternativa mais provável de aplicação na operação do sistema real, uma vez que o nível de prioridade dado a cada produto é o mesmo independente do processo decisório em questão. Como forma de complementar essa análise essas alternativas foram também utilizadas como configurações iniciais para o processo de busca proposto acima.

Para que se pudessem apresentar os resultados das simulações das diversas combinações realizadas foi necessário criar uma forma compacta para descrever cada uma dessas combinações, o que foi feito criando-se nomes compostos por posições numéricas separadas por hífens, em que cada uma dessas posições corresponde a um processo decisório e cada número corresponde a uma regra de priorização distinta. O formato final desse nome é “x-y-z-w-q-r-t-p”, que pode ser lido com o auxílio do Quadro 0.4, que contém a descrição de cada elemento (posição numérica) do nome das combinações, e do Quadro 0.5, que contém a descrição de cada uma das regras de priorização que aparecem nos quadros de resultados apresentados.

Quadro 0.4: Processos decisórios considerados no modelo (posição no nome)

Processo decisório	Descrição
1º	Atribui produto a vagão na estação intermediária
2º	Seleciona vagões carregados para formação de trem na estação intermediária
3º	Atribui produto para carregamento no instante de carregamento do vagão
4º	Seleciona os caminhões a serem descarregados
5º	Seleciona vagões carregados para formação de trem nas estações de carregamento
6º	Seleciona os vagões a serem descarregados no porto
7º	Seleciona navio a atracar no porto
8º	Distribuição de Vagões

Quadro 0.5: Regras de priorização utilizadas no modelo

Regra	Descrição
0	Regras estocásticas convencionais (aleatório)
1	Produto que estiver ocupando o menor percentual de seu silo no porto
2	Produto que tiver a menor relação entre carga no porto e capacidade de silagem + capacidade de navios em fila
3	Produto que tiver a maior ocupação porcentual de silos na Origem
4	Não aplicada
5	Produto que tiver a menor ocupação porcentual de silos na Origem
6	Produto que tiver a maior fila de navios
7	Produto que tiver o menor valor de carga no porto menos capacidade de silagem e dos navios em fila
8	Produto que tiver o menor valor de carga no porto, mais carga em trânsito, menos capacidade de silagem e dos navios em fila
9	Produto que tiver o menor proporção de carga no porto, mais carga em trânsito, em relação à capacidade de silagem e dos navios em fila
10	Produto que tiver a maior capacidade livre de silo no porto

A configuração 0-9-9-2-9-1-0-0, por exemplo, corresponde a um modelo que possui as seguintes regras de priorização associadas a cada um dos processos decisórios existentes no modelo e listados no Quadro 0.4:

1º - Nenhuma regra de priorização

2º - Regra de priorização No 9

3º - Regra de priorização No 9

4º - Regra de priorização No 2

5º - Regra de priorização No 9

6º - Regra de priorização No 1

7º - Nenhuma regra de priorização

8º - Nenhuma regra de priorização

No total foram analisadas 253 combinações, sendo que aquelas que resultaram em melhor desempenho do sistema são apresentadas no Quadro 0.6. Essas mesmas combinações foram simuladas considerando o cenário alternativo de capacidade, e os principais resultados são apresentados no Quadro 0.7.

Como é possível verificar a partir desses dois quadros, os resultados da simulação de diversas combinações foram substancialmente superiores àqueles apresentados pelas diferentes associações uma-a-uma das regras de priorização a processos decisórios. Apesar de o transporte ainda ficar abaixo dos 90% da demanda total, algumas combinações testadas foram capazes de estender o atendimento a um total de 4,53 milhões de toneladas transportadas para o cenário básico de capacidade e quase 4,57 milhões de toneladas para o cenário alternativo, o que significa um

incremento de 22,1% e 21,8%, respectivamente, sobre os desempenhos das combinações uma-a-uma mais eficazes em cada um dos cenários no que tange ao atendimento às demandas perdidas em cada um dos cenários pelo modelo puramente estocástico.

Verifica-se também que as configurações compostas pela aplicação de apenas uma regra priorização a todos os processos decisórios (denominadas “configurações especiais” no Quadro 0.6 e no Quadro 0.7) apresentaram resultados bastante inferiores em relação às configurações compostas por diferentes regras de priorização.

Os conjuntos que resultaram nas maiores quantidades de grãos transportadas, entretanto, não incorporam regras de priorização para atracação de navios ou para distribuição de vagões, que intuitivamente seria aquela regra a causar maior impacto no desempenho do sistema. São compostos, entretanto, por regras de priorização aplicadas aos demais processos decisórios.

Não se pode deixar de notar, entretanto, a semelhança entre os resultados das configurações que apresentaram melhor desempenho, mesmo que compostas por diferentes regras de priorização. Embora não se tenha chegado a uma conclusão definitiva a respeito do porquê desse resultado, a semelhança entre as diversas regras de simulação pode ter resultado na existência de múltiplas configurações do modelo com resultados bastante semelhantes.

Quadro 0.6: Configurações de melhor resultado do modelo simulação-otimização (cenário básico)

Configuração	Resultado (MM ton)	Demanda perdida (MM ton)	Redução da demanda perdida	Melhora em relação à "uma-a-uma"
0-9-9-2-9-1-0-0	4.526	0.592	46.3%	22.1%
0-9-9-2-8-1-0-0	4.524	0.594	46.1%	21.6%
0-9-9-5-9-1-0-0	4.522	0.597	45.9%	21.0%
0-1-9-2-8-1-6-0	4.520	0.598	45.8%	20.6%
0-9-9-2-10-1-0-0	4.520	0.599	45.7%	20.5%
0-1-9-9-8-1-6-0	4.520	0.599	45.7%	20.5%
0-9-9-2-9-10-0-0	4.519	0.599	45.7%	20.4%
0-9-9-2-2-10-0-0	4.518	0.601	45.6%	20.1%
0-9-9-9-9-1-0-0	4.518	0.601	45.6%	20.0%
0-8-9-2-9-1-0-0	4.517	0.601	45.5%	19.9%
0-1-9-2-2-1-6-0	4.516	0.602	45.4%	19.6%
0-1-9-2-8-1-0-0	4.516	0.603	45.4%	19.6%
0-1-9-2-9-1-0-0	4.515	0.603	45.3%	19.4%
0-9-9-2-9-7-0-0	4.515	0.603	45.3%	19.4%
0-1-9-2-8-9-6-0	4.514	0.604	45.2%	19.2%
0-1-9-2-8-7-6-0	4.514	0.604	45.2%	19.2%
0-1-9-1-8-1-6-0	4.514	0.604	45.2%	19.2%
0-9-9-2-9-0-0-0	4.514	0.604	45.2%	19.2%
0-1-9-2-8-2-6-0	4.514	0.605	45.2%	19.1%
0-9-9-10-9-1-0-0	4.514	0.605	45.2%	19.0%
Combinações especiais				
0-1-1-1-1-1-0-1	4.356	0.763	30.9%	-18.6%
0-2-2-2-2-2-0-2	4.347	0.772	30.0%	-20.8%
0-7-7-7-7-7-0-7	4.318	0.801	27.4%	-27.7%
0-8-8-8-8-0-0-8	4.331	0.788	28.6%	-24.6%
0-9-9-9-9-9-0-9	4.334	0.784	28.9%	-23.9%
0-10-10-10-10-10-0-10	4.291	0.828	25.0%	-34.2%

Quadro 0.7: Configurações de melhor resultado do modelo simulação-otimização (cenário alternativo)

Configuração	Resultado (MM ton)	Demanda perdida (MM ton)	Redução da demanda perdida	Melhora em relação à "uma-a-uma"
0-9-9-2-2-10-0-0	4.569	0.549	50.2%	21.8%
0-9-9-2-9-7-0-0	4.567	0.552	50.0%	21.3%
0-9-8-9-9-10-0-0	4.565	0.553	49.9%	21.0%
0-9-9-5-9-1-0-0	4.564	0.555	49.7%	20.7%
0-9-9-2-0-1-0-0	4.563	0.555	49.7%	20.6%
0-9-9-2-9-2-0-0	4.562	0.556	49.6%	20.4%
0-1-9-2-8-1-0-0	4.562	0.556	49.6%	20.3%
0-9-9-2-8-10-0-0	4.562	0.557	49.6%	20.3%
0-9-9-2-9-9-0-0	4.562	0.557	49.6%	20.3%
0-9-9-0-9-10-0-0	4.562	0.557	49.5%	20.2%
0-9-9-2-0-10-0-0	4.561	0.557	49.5%	20.2%
0-9-9-2-2-1-0-0	4.561	0.557	49.5%	20.1%
0-9-9-2-10-10-0-0	4.561	0.558	49.4%	20.0%
0-9-9-10-9-10-0-0	4.560	0.558	49.4%	19.9%
0-9-9-2-7-10-0-0	4.560	0.558	49.4%	19.9%
0-1-9-10-8-1-6-0	4.560	0.559	49.4%	19.8%
0-9-9-0-9-1-0-0	4.560	0.559	49.4%	19.8%
0-2-9-5-9-9-0-0	4.559	0.559	49.3%	19.7%
0-9-9-2-10-1-0-0	4.559	0.560	49.3%	19.6%
0-1-8-9-9-10-0-0	4.558	0.561	49.2%	19.3%
Combinações especiais				
0-1-1-1-1-1-0-1	4.468	0.650	41.1%	-0.3%
0-2-2-2-2-2-0-2	4.473	0.646	41.5%	0.7%
0-7-7-7-7-7-0-7	4.460	0.658	40.4%	-2.0%
0-8-8-8-8-0-0-8	4.465	0.654	40.8%	-1.1%
0-9-9-9-9-9-0-9	4.488	0.630	42.9%	4.1%
0-10-10-10-10-10-0-10	4.431	0.687	37.7%	-8.5%

Os resultados das demais combinações simuladas para ambos os cenários de capacidade encontram-se no **Anexo II** desse documento.

1.25.1 Detalhamento da análise das melhores configurações do modelo

Uma análise mais cuidadosa das configurações do modelo que resultaram nos melhores desempenhos finais para cada um dos cenários de capacidade permite chegar a algumas conclusões importantes sobre o funcionamento do modelo e, principalmente, sobre os efeitos que algumas das hipóteses feitas durante a elaboração do modelo tiveram sobre seu resultado final.

A primeira observação que precisa ser feita a respeito do resultado final é derivada da análise dos gráficos da Figura 0.3 e da Figura 0.4, as quais mostram uma tendência bastante clara de um melhor atendimento (em termos relativos) a produtos e estações com maior demanda. Ou seja, quanto maior a demanda por transporte de um produto ou de uma estação, menor a proporção dessa demanda que não será transportada.

É válido comentar, entretanto, que apesar de se poder identificar o atendimento à estação intermediária como exceção a esse comportamento, a posição dessa estação no sistema modelado permite muito menor variação no estado do sistema do momento em que os vagões são enviados para carregamento naquela estação e o momento em que os vagões chegam carregados ao porto.

Figura 0.3: Demanda atendida Vs. Demanda perdida por produto operado (cenário básico)

Figura 0.4: Demanda atendida Vs. Demanda perdida por estação de carregamento (cenário básico)

Assim como os resultados globais, o atendimento a cada estação e cada produto operados no sistema modelado com o cenário básico foram bastante semelhantes àqueles obtidos com o cenário alternativo, conforme se pode observar nos gráficos da Figura 0.5 e da Figura 0.6.

Figura 0.5: Demanda atendida Vs. Demanda perdida por produto operado (cenário alternativo)

Figura 0.6: Demanda atendida Vs. Demanda perdida por estação de carregamento (cenário alternativo)

O segundo aspecto importante a ser notado em relação ao atendimento da demanda é o descompasso existente em relação à demanda perdida entre caminhões e navios (aqueles que abandonam as suas filas de espera), o que pode ser verificado no gráfico da Figura 0.7 (para o cenário básico), o qual é quase que indistinguível do gráfico apresentado na Figura 0.8, que apresenta o mesmo resultado, mas dessa vez para o cenário alternativo.

Uma vez que o espaço de armazenagem nos silos portuários é limitado, a ocorrência de desistência de navios que deveriam ser carregados com produtos já disponíveis nos silos portuários e já carregados em vagões pode resultar em uma situação em que vagões carregados não podem descarregar no porto por falta de espaço em silo, o que pode vir a travar o sistema no caso de uma parte relevante dos vagões, ou mesmo todos, se encontrem nessa situação.

Para o cenário de capacidade atual a perda de caminhões totalizou pouco mais de 440 mil toneladas, e a de navios cerca de 418 mil toneladas (5,2% de diferença). Já para o cenário alternativo de capacidade, a perda de demanda por desistência de caminhões representou cerca de 376 mil toneladas e a de navios cerca de 405 mil toneladas (7,8% de diferença).

Figura 0.7: Caminhões perdidos Vs. navios perdidos por produto (cenário básico)

Figura 0.8: Caminhões perdidos Vs. navios perdidos por produto (cenário alternativo)

O último aspecto a ser destacado na análise do resultado final do modelo é a distribuição das filas de vagões e locomotivas nas diversas estações representadas no modelo.

Conforme se pode verificar no gráfico da Figura 0.9 (para o cenário básico), as locomotivas da EFVM estiveram por mais tempo em fila (e em filas mais longas) no porto, e não na estação intermediária. Isso indica que o modelo apresentou alguma lentidão na descarga de vagões e disponibilização dos mesmos para envio às estações de carregamento, o que pode ter sido causado por falta de capacidade de descarga pela moega ou ainda falta de espaço em silos para armazenagem dos produtos carregados nos vagões que chegavam ao porto.

Figura 0.9: Distribuição das fila de locomotivas por estação (cenário básico)

Como se poderia imaginar, com a introdução de mais locomotivas no cenário alternativo de capacidade as filas de locomotivas ficaram mais longas, o que se pode verificar com uma rápida comparação entre os gráficos da Figura 0.9 e da Figura 0.10.

Figura 0.10: Distribuição das fila de locomotivas por estação (cenário alternativo)

No que tange às filas de vagões vazios e carregados, também se observa diferenças entre os dois cenários testados. Comparando-se os gráficos da Figura 0.11(cenário básico) e da Figura 0.12 (cenário alternativo), percebe-se que, no caso do cenário alternativo, as filas de vagões carregados são mais longas no porto e mais curtas

nas estações intermediária e de Brejo Alegre, que é aquela que concentra a maior demanda dentre todas as estações de carregamento.

Figura 0.11: Distribuição de filas de vagões carregados por estação (cenário básico)

Figura 0.12: Distribuição de filas de vagões carregados por estação (cenário alternativo)

Essa diferença é consistente com uma maior frota de locomotivas no cenário alternativo, que auxilia a movimentação de carga rumo ao porto.

Essa mesma tendência de mais eficiente movimentação de vagões não pode ser observada tão facilmente na distribuição das filas de vagões vazios apresentadas nos gráficos da Figura 0.13 e da Figura 0.14, que são bastante curtas nos dois cenários analisados.

Figura 0.13: Distribuição de filas de vagões vazios por estação (cenário básico)

Figura 0.14: Distribuição de filas de vagões vazios por estação (cenário alternativo)

1.26 Impacto da utilização de regras de priorização absolutas ou relativas

Um dos aspectos incorporados em certo grau de detalhe no modelo desenvolvido foi o desenvolvimento de regras de priorização de produtos que considerassem tanto a disponibilidade de espaço/demanda relativa por produto (como porcentagem de silos ocupados/desocupados, porcentagem da capacidade do navio que ainda não está disponível para carregamento no porto, etc), quanto a disponibilidade/necessidade absoluta de produtos (toneladas que ainda cabem/estão no silo, toneladas necessárias para encher o navio que está em fila, etc).

Para verificar se há diferença entre esses dois tipos de estratégia no desempenho do sistema, decidiu-se analisar os resultados das simulações dos modelos que consideravam a mesma regra de simulação em todos os processos decisórios aplicáveis.

O resultado mais relevante para essa análise, entretanto, não é o volume transportado pelo sistema, mas a proporção da demanda perdida em cada caso, uma vez que a hipótese inicial é que produtos com maior demanda por transporte serão beneficiados em detrimento daqueles com menor demanda caso a regra de priorização utilizada leve em conta medidas de capacidade/demanda absolutas.

Utilizando-se como referência o Quadro 0.5, pode-se verificar que as regras de priorização 1, 2 e 9 levam em conta medidas relativas, enquanto que as demais levam em conta medidas absolutas.

Sabendo-se que os produtos foram numerados da maior para a menor demanda (produto 1 tem a maior demanda e produto 4 tem a menor demanda), pode-se observar na Figura 0.15 que justamente quando da aplicação das regras proporcionais (1, 2 e 9), a diferença da parcela de demanda perdida entre os diversos produtos, particularmente a diferença entre produtos 3 e 4, é consideravelmente menor do que a diferença existente quando do uso de regras de priorização absolutas, o que corrobora a hipótese inicial.

Figura 0.15: Demanda perdida por tipo de produto por regra de priorização utilizada

1.27 Conclusões

A primeira conclusão que pode ser tirada em relação aos resultados apresentados nesse capítulo é que o modelo resultou em diferentes quantidades de produtos perdidos na descarga de caminhões e no carregamento de navios, números que deveriam ser idênticos ou ao menos muito próximos, uma vez que não faz sentido prático transportar grãos até o porto que não serão carregados em navios. A solução para esse problema será discutida no capítulo 0 de conclusão desse documento.

A segunda conclusão que pode ser feita a partir desses resultados é que o porto, mais precisamente a sua pequena capacidade de armazenagem de carga no porto, é que representa o maior gargalo de capacidade no sistema, resultando em longas filas de vagões carregados à espera de descarga, o que derruba de forma definitiva a tese defendida por alguns analistas que trabalham na operação real do sistema que defendem que o principal gargalo é a escassez de vagões e locomotivas.

Quanto aos resultados das diferentes regras de priorização, pode-se dizer que apesar de não se poder determinar precisamente qual a melhor regra de priorização a ser aplicada a cada processo decisório, verificou-se que as regras de priorização proporcionais apresentaram maior consistência no atendimento aos produtos operados no sistema e desempenho consideravelmente superior que as regras de priorização absolutas.

Isso permite concluir que o uso de regras de priorização proporcionais é mais adequado ao sistema estudado, devendo ser elas as preferidas quando da implementação em sistema de suporte à decisão a ser utilizado na operação real.

Conclusões

Esta pesquisa tratou da modelagem de um sistema ferroviário fechado de transporte de granéis agrícolas envolvendo múltiplos pontos de carregamento, um único porto de destino e duas ferrovias operando em regime de tráfego mútuo.

A primeira e mais importante conclusão que pode ser traçada a partir dos resultados obtidos nesse trabalho é que regras de priorização se mostraram substitutas adequadas às regras comumente utilizadas em modelos de simulação estocástica e baseadas em sorteios aleatórios.

Como resultado da introdução das regras de priorização no modelo estocástico, o modelo resultante passou a ser mais fiel à operação real, uma vez que o novo modelo representa melhor as estratégias operacionais utilizadas e que permite o estudo de estratégias operacionais alternativas.

Uma vez que a introdução das regras de priorização tornou possível o desenvolvimento de um modelo próximo à operação real e que diversas estratégias operacionais puderam ser testadas, determinaram-se as melhores estratégias de gerenciamento das filas de caminhões à espera de descarga, de navios à espera de atracação, e das filas de vagões vazios e carregados nas estações ferroviárias e no porto, bem como as melhores estratégias para distribuição de vagões vazios para as diversas estações de carregamento consideradas no modelo.

Embora tenha sido possível encontrar um conjunto de melhores estratégias para gerenciamento de filas e distribuição de vagões vazios, não foram obtidos resultados conclusivos em relação à melhor regra de priorização a ser aplicada a cada processo decisório.

É importante notar, entretanto, que não foi objetivo desse trabalho estudar todas as regras de priorização possíveis, tendo-se concentrado em um pequeno número de regras de priorização bastante intuitivas e de simples implementação.

A segunda conclusão desse trabalho é que a abordagem híbrida otimização-simulação mostrou-se bastante adequada, resultando em desempenhos do modelo simulado muito mais próximos ao desempenho do sistema real. Apesar disso, é necessário que futuras análises desse tipo de modelo explorem os demais resultados do modelo, como formação de filas, atendimento dos diversos produtos em intervalos de tempo menores, etc, para que se possa determinar exatamente os efeitos.

No modelo apresentado nesse trabalho os processos de chegada de navios e caminhões foram modelados como processos independentes, e apesar de apresentarem resultados compatíveis para cada um dos produtos operados e em cada um dos trimestres simulados, a possibilidade de perda de demanda resultou diferença entre as perdas de demanda entre esses dois elementos, presumivelmente reduzindo o desempenho do sistema.

Por conta desse resultado, futuros desenvolvimentos desse modelo devem, também, incluir a consideração de que existe uma relação entre chegada de caminhões às estações de carregamento e de navios ao porto, o que é explicitamente planejado pelos donos de carga transportada pelo sistema modelado.

Essa alteração, apesar de parecer razoavelmente complexa, pode ser alcançada com a introdução de um dispositivo de ajuste da distribuição de probabilidades para os diversos produtos à medida que a demanda for perdida (caminhões desistirem de descarregar) pelas estações de carregamento e que verificar-se que os grãos já carregados em silos das estações de carregamento ou do porto ou em vagões são um volume demasiado grande para os navios já nomeados para atracação, quando se deverá determinar que o próximo navio a ser nomeado destine-se a carregar tal produto que se encontra em “excesso” no sistema.

Referências bibliográficas

AHMED, M. A.; ALKHAMIS, T. M. (2006), A modified Hooke and Jeeves algorithm with likelihood ratio performance extrapolation for simulation optimization, *European Journal of Operational Research*, n. 174, p 1802-1815.

AHUJA, R. K., Cunha, C. B., Şahin, G. (2005), Network models in railroad planning scheduling. *Tutorials in Operations Research. INFORMS*. p54-101

ANTAQ – Anuário estatístico Portuário 2007 – Tabela. Movimentação total de cargas nos portos organizados e terminais de uso privativo e distribuição espacial, por natureza - 2007. Disponível em <<http://www.antaq.gov.br/>> Acesso em 5 Fev. 2009.

Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., Shetty, C. M. “Nonlinear programming: theory and algorithms”, EUA: John Wiley & Sons, Inc. 2006. 843p

BARNHART, C., JIN, H., VANCE, P. V. (2000), Railroad blocking: A network design application, *Operations Research*, vol 48, n 4, p603-614.

Botter, R. C., Fioroni, M. M., Franzese, L. G. A., (2003), Railroad simulator on closed loop, *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, p1602-1606.

CAMPOS, L. B. (2009), Modelo de otimização para o planejamento da rede de serviços no transporte ferroviário de cargas. 115p, Dissertação de mestrado, UFES, Vitória, ES

CECILIANO, W. R. A. (2007), Aplicação de um método simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro. 228p, Dissertação de Mestrado, POLI-USP, São Paulo, SP

CIA – The World Fact Book – Base de dados. Dados físico-econômico-populacionais sobre os países. <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>> Acesso em 6 Mar. 2009.

Cordeau, J., Toth, P., Vigo, D. (1998), A survey of optimization models for train routing and scheduling, Transportation Science, n. 4, p380-404.

EVERETT, J. (2001), E. Iron ore production scheduling to improve product quality. European Journal of Operational Research, n. 129, p 355-361.

FAST TRACK II, Users Manual, 2nd Edition, Multi Moldal Applied Systems, 2004.

Fioroni, M. M., (2007), Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: Avaliação de alternativas para direcionamento de composições. 216p, Tese de Doutorado, POLI-USP, São Paulo, SP

GORDON, G. (1969), System Simulation, EUA: Prentice Hall, 1969. 301 p.

GREENWOOD, A. G.; REES, L. P.; SIOCHI, F. C. (1998), An investigation of the behavior of simulation response surfaces. European Journal of Operational Research, n. 110, p 282-313.

GUERRA S.A. – Especificação técnica de rodotrem (bitrem) graneleiro. Disponível em <<http://www.aguerra.com.br/>>. Acesso em 4 Fev. 2009.

GUIMARÃES, R. C.; KINGSMAN, B. G. (1989), Simulation-Optimization: The method and its application in the analysis of grain terminal operations. European Journal of Operational Research, n. 41, p 44-53.

HAINES, H. S. (2007), Efficient railway operation, EUA: Elibron Classics, 2007, 669 p

Instituto brasileiro de geografia e estatística. Base de dados. Quantidade produzida, valor da produção, área plantada e área colhida da lavoura temporária. Disponível em <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 12 out. 2008.

JACOBSON, S. H.; SCHRUBEN, L. W. (1989), Techniques for simulation response optimization. Operation Research Letters, N. 8, p 1-9.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO – Secretaria de comércio exterior. Base de dados. Exportação de soja em Grão e Farelo de Soja. Disponível em <<http://alicesweb.desenvolvimento.gov.br>>. Acesso em 20 out. 2008.

OPTVAG/CVRD 1.0, Manual do usuário. Gapso, ciência para eficiência, 2005.

PACHL, J. (2002), Railway operation and control, EUA: VTD Rail Publishing, 2002, 239 p.

PFLUG, G. (2008), Optimization of Stochastic Models: The Interface between Simulation and Optimization. Massachusetts, EUA: Kluwer Academic Publishers, Norwell, 2008. 400p.

Promodel Corporation. Endereço de internet: <http://www.promodel.com/>

RAVARA, A., (2005), Transporte ferroviário de cargas: Método de custeio e determinação de fretes. 94p, Dissertação de Mestrado, POLI-USP, São Paulo, SP

Rockwell Automation Arena User Zone. Home Page, 2009, Endereço de internet: <http://www.arenauserzone.com>

United States Department of Agriculture. Base de dados. Table 07: Soybeans: World Supply and Distribution. Disponível em <<http://www.fas.usda.gov>>. Acesso em 12 out. 2008.

Xj Technologies – Simulation software and services. Endereço de internet: <http://www.xjtek.com/> (Anylogic)

ANEXOS

Anexo I – Pseudo-código

Anexo II – Resultados das simulações realizadas

Anexo I- Pseudo-Código

Enquanto o tempo não expirar

Retire caminhões e navios atrasados da fila

Para o próximo evento na fila:

Se for caminhão que chega à estação de carregamento

- Caminhão é colocado em fila
- É feita uma tentativa de descarga do caminhão, verificando status do servidor de descarga, dos silos e da fila
- Programa-se chegada de novo caminhão

Se for o final do processo de descarga de caminhão

- Atualiza-se estado dos silos
- Libera-se a moega
- É feita uma tentativa de descarga do caminhão, verificando status do servidor de descarga, dos silos e da fila
- Verifica-se se essa nova carga nos silos permite o início de carregamento de um lote de vagões

Chegada de composição de VAZIOS aos pontos de carregamento

- Coloca os vagões em fila
- Coloca a locomotiva em fila
- Verifica se a chegada desse conjunto de vagões permite o início de um carregamento
- Verifica a possibilidade de sair com um trem de carregados

Final do processo de carregamento de vagões

- Coloca os vagões em fila
- Libera Carregador
- Atualiza_Estado_Silos
- Verifica possibilidade de partida de um trem
- Verifica se a chegada desse conjunto de vagões permite o início de um carregamento
- É feita uma tentativa de descarga de caminhão, verificando\ status do servidor de descarga dos silos e da fila

Chegada de composição CARREGADA à estação intermediária

- Atualiza-se a fila de vagões carregados na estação intermediária
- Atualiza-se a fila de locomotivas FCA na estação intermediária
- Verifica-se se há possibilidade de sair um trem com destino a Tubarão
- Verifica se há vagões vazios carregados para sair rumo às estações de carregamento

Chegada de composição carregada ao PORTO

- Colocam-se vagões em fila
- Coloca-se a locomotiva em fila
- Verifica-se se podemos iniciar descarga de vagão
- Verifica se há vagões vazios carregados para sair rumo às estações de carregamento

Chegada de composição VAZIA à estação intermediária

- Atualiza-se a fila de vagões vazios na estação intermediária
- Atualiza-se a fila de locomotivas EFVM na estação intermediária
- Verifica se há possibilidade de sair um trem com destino a Tubarão
- Verifica se há vagões vazios carregados para sair rumo às estações de carregamento

Final do processo de descarga de vagão

- Atualiza-se estados de silos
- Libera-se a moega
- Atualiza-se a fila de vazios
- Verifica-se se é possível iniciar descarga de vagão
- Verifica-se se existe locomotiva à espera de vagões vazios para partir
- Verifica-se a possibilidade de carregar um navio

Final do processo de carregamento de navio

- Atualiza-se a função objetivo
- Atualiza-se estados dos silos
- Verifica-se possibilidade de iniciar descarga de vagão
- Libera-se os carregadores de navios
- Verifica-se a possibilidade de carregar um navio

Chegada de Navios

- Navio é colocado em fila
- É feita uma tentativa de carregamento de navio, verificando status do servidor de descarga dos silos e da fila

Nomeação de navios

- Atualiza-se fila de navios nomeados
- Programa-se chegada de navio ao porto
- Programa-se a nomeação de novo navio

Final de um trimestre simulado

- Atualiza-se a demanda para geração de caminhões e navios

Final dos tipos de eventos

LOOP

Anexo II - Resultado de combinação de regras de priorização a processos decisórios

Resultados para simulações para o cenário básico

Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)
0-9-9-2-9-1-0-0	4.526	0-9-9-2-8-1-0-0	4.524	0-9-9-5-9-1-0-0	4.522
0-1-9-2-8-1-6-0	4.520	0-9-9-2-10-1-0-0	4.520	0-1-9-9-8-1-6-0	4.520
0-9-9-2-9-10-0-0	4.519	0-9-9-2-2-10-0-0	4.518	0-9-9-9-9-1-0-0	4.518
0-8-9-2-9-1-0-0	4.517	0-1-9-2-2-1-6-0	4.516	0-1-9-2-8-1-0-0	4.516
0-1-9-2-9-1-0-0	4.515	0-9-9-2-9-7-0-0	4.515	0-1-9-2-8-9-6-0	4.514
0-1-9-2-8-7-6-0	4.514	0-1-9-1-8-1-6-0	4.514	0-9-9-2-9-0-0-0	4.514
0-1-9-2-8-2-6-0	4.514	0-9-9-10-9-1-0-0	4.514	0-9-9-2-9-1-6-0	4.513
0-2-9-2-9-1-0-0	4.512	0-9-9-2-7-1-0-0	4.512	0-9-9-2-8-10-0-0	4.512
0-2-9-5-9-9-0-0	4.512	0-9-9-0-9-1-0-0	4.512	0-9-9-10-9-10-0-0	4.512
0-9-9-1-9-10-0-0	4.511	0-9-9-2-9-9-0-0	4.511	0-9-9-2-2-1-0-0	4.510
0-9-9-2-9-2-0-0	4.510	0-9-9-1-9-1-0-0	4.510	0-9-9-9-9-10-0-0	4.509
0-9-8-9-9-10-0-0	4.509	0-10-9-2-9-1-0-0	4.509	0-2-9-8-6-0-0-0	4.508
0-1-9-2-8-10-6-0	4.508	0-7-9-2-9-1-0-0	4.508	0-1-9-5-8-1-6-0	4.508
0-1-9-10-8-1-6-0	4.508	0-1-9-2-8-0-6-0	4.508	0-2-9-2-8-1-6-0	4.507
0-1-9-0-8-1-6-0	4.507	0-9-9-5-9-10-0-0	4.506	0-1-9-2-10-1-6-0	4.505
0-1-9-2-6-1-6-0	4.505	0-9-9-2-6-10-0-0	4.505	0-1-9-2-9-1-6-0	4.505
0-2-8-9-9-10-0-0	4.504	0-9-9-2-10-10-0-0	4.502	0-7-9-2-8-1-6-0	4.502
0-9-9-2-0-1-0-0	4.501	0-8-9-2-8-1-6-0	4.501	0-1-9-2-7-1-6-0	4.500
0-9-9-2-6-1-0-0	4.500	0-10-8-9-9-10-0-0	4.500	0-9-9-2-8-1-6-0	4.498
0-9-9-2-7-10-0-0	4.498	0-10-9-2-8-1-6-0	4.497	0-9-9-0-9-10-0-0	4.496
0-1-9-2-0-1-6-0	4.496	0-1-8-9-9-10-0-0	4.495	0-9-8-2-9-1-0-0	4.494
0-8-8-9-9-10-0-0	4.493	0-9-9-2-0-10-0-0	4.493	0-7-8-9-9-10-0-0	4.492
0-9-2-2-9-1-0-0	4.489	0-1-2-2-8-1-6-0	4.488	0-1-1-2-8-1-6-0	4.482
0-1-8-2-8-1-6-0	4.478	0-9-1-2-9-1-0-0	4.476	0-9-7-2-9-1-0-0	4.476
0-9-7-9-9-10-0-0	4.476	0-1-7-2-8-1-6-0	4.473	0-9-10-2-9-1-0-0	4.473
0-9-2-9-9-10-0-0	4.469	0-9-1-9-9-10-0-0	4.467	0-9-10-9-9-10-0-0	4.466
0-1-10-2-8-1-6-0	4.462	0-0-9-2-9-1-0-0	4.451	0-0-9-2-8-1-6-0	4.447
0-0-8-9-9-10-0-0	4.425	0-2-9-9-9-9-0-9	4.363	0-1-1-1-1-1-0-1	4.356
0-7-9-9-9-9-0-9	4.355	0-10-9-2-8-1-6-8	4.347	0-2-2-2-2-2-0-2	4.347
0-2-9-5-10-9-0-9	4.345	0-2-9-5-6-9-0-9	4.345	0-2-9-1-9-9-0-9	4.344
0-2-9-8-6-0-0-8	4.344	0-2-9-8-8-0-0-8	4.344	0-2-9-0-9-9-0-9	4.343
0-2-9-5-9-0-0-9	4.343	0-2-9-5-9-9-0-1	4.342	0-2-9-5-9-9-6-9	4.341
0-10-9-9-9-9-0-9	4.340	0-1-9-5-9-9-0-9	4.339	0-2-9-5-8-9-0-9	4.338
0-2-1-8-8-0-0-8	4.338	0-2-2-8-8-0-0-8	4.338	0-2-9-8-6-0-0-1	4.337
0-10-9-5-9-9-0-9	4.337	0-2-9-8-7-0-0-8	4.337	0-2-9-5-9-9-0-2	4.336
0-2-8-8-8-0-0-8	4.336	0-10-9-2-6-1-6-8	4.334	0-9-9-9-9-9-0-9	4.334
0-2-9-5-8-0-0-8	4.334	0-2-9-5-9-2-0-9	4.333	0-2-9-5-9-10-0-9	4.333
0-10-9-2-2-1-6-8	4.333	0-2-9-2-9-9-0-9	4.332	0-7-9-5-9-9-0-9	4.332
0-8-8-8-8-0-0-8	4.331	0-2-9-9-8-0-0-8	4.330	0-2-9-10-9-9-0-9	4.330
0-1-8-8-8-0-0-8	4.330	0-2-9-8-6-2-0-8	4.330	0-2-2-5-9-9-0-9	4.330
0-2-9-8-9-0-0-8	4.330	0-2-9-5-9-9-0-8	4.329	0-2-9-8-6-1-0-8	4.328
0-2-9-1-8-0-0-8	4.328	0-2-9-5-7-9-0-9	4.328	0-2-9-5-2-9-0-9	4.328
0-2-9-8-6-0-6-8	4.328	0-9-9-2-2-1-6-8	4.326	0-2-8-9-9-9-0-9	4.326
0-10-9-2-8-1-0-8	4.325	0-9-9-2-9-1-0-8	4.325	0-2-9-8-6-0-0-7	4.325
0-10-8-8-8-0-0-8	4.324	0-2-9-8-6-7-0-8	4.324	0-2-1-9-9-9-0-9	4.324
0-2-9-5-9-7-0-9	4.324	0-2-1-5-9-9-0-9	4.324	0-9-9-5-9-9-0-9	4.324
0-2-8-5-9-9-0-9	4.323	0-9-9-2-9-1-0-2	4.323	0-10-9-2-8-10-6-8	4.323

Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)
0-10-9-2-8-9-6-8	4.322	0-2-9-8-6-0-0-2	4.322	0-2-7-8-8-0-0-8	4.321
0-2-9-8-6-9-0-8	4.321	0-2-8-9-9-10-0-2	4.321	0-2-9-2-2-1-6-8	4.321
0-8-9-9-9-9-0-9	4.321	0-9-8-8-8-0-0-8	4.320	0-1-9-2-2-1-6-8	4.320
0-7-8-8-8-0-0-8	4.319	0-2-9-8-6-0-0-6	4.319	0-10-9-2-9-1-6-8	4.319
0-10-1-2-2-1-6-8	4.318	0-2-9-5-9-9-0-7	4.318	0-7-7-7-7-7-0-7	4.318
0-10-9-10-2-1-6-8	4.317	0-2-10-9-9-9-0-9	4.317	0-10-9-2-8-2-6-8	4.317
0-2-8-9-9-10-0-8	4.317	0-10-9-2-8-1-6-2	4.317	0-1-9-9-9-9-0-9	4.316
0-2-2-9-9-9-0-9	4.316	0-2-8-9-9-10-0-1	4.316	0-10-9-1-2-1-6-8	4.315
0-1-9-2-8-1-6-8	4.315	0-10-10-2-2-1-6-8	4.314	0-2-9-8-2-0-0-8	4.313
0-9-9-2-9-1-0-7	4.313	0-10-9-2-8-1-6-1	4.313	0-10-2-2-2-1-6-8	4.313
0-8-9-5-9-9-0-9	4.312	0-2-9-8-6-10-0-8	4.312	0-2-9-5-0-9-0-9	4.312
0-10-9-2-10-1-6-8	4.312	0-2-8-9-9-10-0-10	4.311	0-2-8-9-10-10-0-10	4.311
0-2-9-10-8-0-0-8	4.311	0-2-9-0-8-0-0-8	4.310	0-10-9-5-2-1-6-8	4.310
0-10-9-2-8-1-6-7	4.309	0-7-9-2-2-1-6-8	4.309	0-2-9-8-10-0-0-8	4.309
0-9-9-2-9-1-0-1	4.308	0-9-9-2-9-1-0-6	4.308	0-2-8-9-9-7-0-10	4.308
0-2-9-8-0-0-0-8	4.307	0-10-9-2-8-7-6-8	4.307	0-2-8-9-9-10-0-7	4.307
0-2-9-5-9-1-0-9	4.307	0-2-9-5-9-9-0-6	4.306	0-1-9-2-8-1-6-7	4.305
0-1-9-2-8-1-6-1	4.305	0-2-7-9-9-9-0-9	4.305	0-2-9-2-8-0-0-8	4.303
0-1-9-2-8-1-6-6	4.302	0-2-8-9-6-10-0-10	4.302	0-1-9-2-8-1-6-2	4.302
0-10-9-2-7-1-6-8	4.302	0-2-10-8-8-0-0-8	4.300	0-2-9-8-6-0-0-10	4.300
0-2-8-10-10-10-0-10	4.299	0-10-8-2-2-1-6-8	4.298	0-2-7-5-9-9-0-9	4.298
0-10-9-0-2-1-6-8	4.296	0-2-9-10-10-10-0-10	4.296	0-2-8-9-7-10-0-10	4.296
0-2-8-9-9-10-6-10	4.296	0-2-8-9-9-10-0-6	4.295	0-2-8-9-2-10-0-10	4.295
0-8-9-2-2-1-6-8	4.295	0-2-10-10-10-10-0-10	4.294	0-2-8-9-9-2-0-10	4.293
0-2-8-9-9-1-0-10	4.293	0-10-9-9-2-1-6-8	4.292	0-10-10-10-10-10-0-10	4.291
0-2-8-5-10-10-0-10	4.290	0-9-10-10-10-10-0-10	4.288	0-8-10-10-10-10-0-10	4.287
0-10-9-2-0-1-6-8	4.287	0-2-8-0-10-10-0-10	4.286	0-2-7-10-10-10-0-10	4.285
0-2-8-9-9-9-0-10	4.285	0-2-9-5-9-9-0-10	4.284	0-2-8-2-10-10-0-10	4.284
0-2-1-10-10-10-0-10	4.284	0-2-8-9-9-0-0-10	4.284	0-2-8-1-10-10-0-10	4.283
0-2-10-5-9-9-0-9	4.283	0-10-9-2-8-1-6-6	4.283	0-2-2-10-10-10-0-10	4.282
0-10-9-2-8-1-6-10	4.281	0-1-9-2-8-1-6-10	4.279	0-0-9-5-9-9-0-9	4.278
0-10-9-2-8-0-6-8	4.277	0-10-7-2-2-1-6-8	4.276	0-2-8-9-8-10-0-10	4.276
0-0-9-9-9-9-0-9	4.273	0-1-10-10-10-10-0-10	4.271	0-9-9-2-9-1-0-10	4.267
0-0-9-2-2-1-6-8	4.263	0-2-8-9-0-10-0-10	4.262	0-7-10-10-10-10-0-10	4.258
0-0-8-8-8-0-0-8	4.240	0-0-10-10-10-10-0-10	4.239	0-2-0-8-8-0-0-8	4.171
0-2-0-10-10-10-0-10	4.159	0-9-0-9-9-10-0-0	4.159	0-1-0-2-8-1-6-0	4.155
0-10-0-2-2-1-6-8	4.153	0-2-0-5-9-9-0-9	4.152	0-2-0-9-9-9-0-9	4.150
0-9-0-2-9-1-0-0	4.150				

Resultados para simulações para o cenário alternativo

Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)
0-9-9-2-2-10-0-0	4.569	0-9-9-2-9-7-0-0	4.567	0-9-8-9-9-10-0-0	4.565
0-9-9-5-9-1-0-0	4.564	0-9-9-2-0-1-0-0	4.563	0-9-9-2-9-2-0-0	4.562
0-1-9-2-8-1-0-0	4.562	0-9-9-2-8-10-0-0	4.562	0-9-9-2-9-9-0-0	4.562
0-9-9-0-9-10-0-0	4.562	0-9-9-2-0-10-0-0	4.561	0-9-9-2-2-1-0-0	4.561
0-9-9-2-10-10-0-0	4.561	0-9-9-10-9-10-0-0	4.560	0-9-9-2-7-10-0-0	4.560
0-1-9-10-8-1-6-0	4.560	0-9-9-0-9-1-0-0	4.560	0-2-9-5-9-9-0-0	4.559
0-9-9-2-10-1-0-0	4.559	0-1-8-9-9-10-0-0	4.558	0-9-9-10-9-1-0-0	4.557
0-9-9-2-7-1-0-0	4.557	0-9-9-2-8-1-0-0	4.557	0-1-9-9-8-1-6-0	4.557
0-1-9-2-10-1-6-0	4.556	0-9-9-2-6-10-0-0	4.556	0-9-9-1-9-1-0-0	4.556
0-2-8-9-9-10-0-0	4.555	0-1-9-2-8-1-6-0	4.555	0-9-9-9-9-1-0-0	4.555
0-1-9-2-9-1-6-0	4.555	0-8-9-2-9-1-0-0	4.555	0-1-9-2-9-1-0-0	4.555
0-2-9-2-9-1-0-0	4.554	0-9-9-2-8-1-6-0	4.554	0-1-9-2-8-9-6-0	4.554
0-8-8-9-9-10-0-0	4.554	0-9-9-2-9-10-0-0	4.553	0-9-9-1-9-10-0-0	4.552
0-7-9-2-8-1-6-0	4.552	0-2-9-2-8-1-6-0	4.552	0-9-9-2-9-0-0-0	4.552
0-1-9-2-6-1-6-0	4.552	0-7-8-9-9-10-0-0	4.552	0-9-9-5-9-10-0-0	4.552
0-9-9-2-9-1-0-0	4.552	0-9-8-2-9-1-0-0	4.551	0-10-9-2-8-1-6-0	4.551
0-1-9-2-8-2-6-0	4.551	0-1-9-0-8-1-6-0	4.551	0-9-2-9-9-10-0-0	4.551
0-9-9-2-9-1-6-0	4.551	0-1-9-2-8-7-6-0	4.550	0-1-9-2-0-1-6-0	4.550
0-10-9-2-9-1-0-0	4.550	0-9-9-2-6-1-0-0	4.549	0-1-8-2-8-1-6-0	4.549
0-1-9-2-8-10-6-0	4.548	0-1-9-1-8-1-6-0	4.548	0-8-9-2-8-1-6-0	4.547
0-1-9-2-7-1-6-0	4.547	0-2-9-8-6-0-0-0	4.545	0-9-9-9-9-10-0-0	4.544
0-9-1-9-9-10-0-0	4.544	0-7-9-2-9-1-0-0	4.543	0-1-9-2-8-0-6-0	4.542
0-1-9-2-2-1-6-0	4.542	0-1-9-5-8-1-6-0	4.542	0-9-7-2-9-1-0-0	4.541
0-1-2-2-8-1-6-0	4.541	0-10-8-9-9-10-0-0	4.541	0-9-10-9-9-10-0-0	4.539
0-1-7-2-8-1-6-0	4.536	0-9-2-2-9-1-0-0	4.535	0-9-10-2-9-1-0-0	4.532
0-9-7-9-9-10-0-0	4.532	0-1-1-2-8-1-6-0	4.528	0-9-1-2-9-1-0-0	4.527
0-1-10-2-8-1-6-0	4.517	0-9-9-5-9-9-0-9	4.505	0-8-9-9-9-9-0-9	4.504
0-1-9-5-9-9-0-9	4.503	0-10-9-2-8-1-0-8	4.499	0-0-9-2-8-1-6-0	4.498
0-2-9-1-9-9-0-9	4.498	0-2-9-9-9-9-0-9	4.497	0-2-9-5-10-9-0-9	4.494
0-2-9-5-7-9-0-9	4.493	0-9-8-8-8-0-0-8	4.492	0-2-9-2-9-9-0-9	4.491
0-2-9-5-2-9-0-9	4.491	0-10-8-8-8-0-0-8	4.490	0-1-9-2-8-1-6-1	4.489
0-2-9-5-0-9-0-9	4.489	0-2-9-10-9-9-0-9	4.489	0-9-9-9-9-9-0-9	4.488
0-2-9-5-9-1-0-9	4.488	0-2-8-9-9-10-0-2	4.487	0-2-9-5-9-9-6-9	4.487
0-2-9-5-9-9-0-7	4.486	0-2-9-5-8-9-0-9	4.484	0-2-8-9-8-10-0-10	4.483
0-10-9-2-8-9-6-8	4.482	0-2-8-9-9-10-0-8	4.482	0-10-2-2-2-1-6-8	4.482
0-2-9-5-8-0-0-8	4.482	0-2-9-2-8-0-0-8	4.481	0-2-2-9-9-9-0-9	4.481
0-2-9-8-6-2-0-8	4.481	0-2-9-1-8-0-0-8	4.480	0-1-9-2-8-1-6-2	4.480
0-10-9-2-8-1-6-8	4.480	0-2-9-5-9-9-0-8	4.480	0-2-9-8-6-0-6-8	4.479
0-1-8-8-8-0-0-8	4.479	0-10-9-5-9-9-0-9	4.479	0-2-8-9-9-9-0-9	4.479
0-2-9-9-8-0-0-8	4.478	0-2-9-8-8-0-0-8	4.478	0-2-2-5-9-9-0-9	4.478
0-2-9-0-9-9-0-9	4.476	0-10-9-2-8-1-6-7	4.476	0-2-9-8-6-7-0-8	4.476
0-9-9-2-9-1-0-1	4.476	0-2-9-8-6-9-0-8	4.476	0-10-9-2-8-2-6-8	4.476
0-2-1-5-9-9-0-9	4.476	0-0-9-2-9-1-0-0	4.476	0-7-9-5-9-9-0-9	4.476
0-10-9-2-7-1-6-8	4.475	0-2-9-5-9-10-0-9	4.475	0-2-9-5-6-9-0-9	4.475
0-2-9-8-6-1-0-8	4.475	0-2-8-9-2-10-0-10	4.475	0-2-2-8-8-0-0-8	4.475
0-2-9-8-9-0-0-8	4.474	0-9-9-2-9-1-0-2	4.474	0-1-10-10-10-10-0-10	4.474
0-8-9-2-2-1-6-8	4.474	0-2-7-9-9-9-0-9	4.473	0-2-9-8-6-0-0-1	4.473
0-10-10-2-2-1-6-8	4.473	0-2-8-9-9-9-0-10	4.473	0-2-9-5-9-9-0-2	4.473
0-10-9-9-9-9-0-9	4.473	0-2-2-2-2-2-0-2	4.473	0-2-8-8-8-0-0-8	4.473
0-0-8-9-9-10-0-0	4.473	0-2-9-0-8-0-0-8	4.473	0-2-8-0-10-10-0-10	4.472
0-10-9-2-8-7-6-8	4.472	0-2-9-5-9-0-0-9	4.472	0-2-1-8-8-0-0-8	4.472

Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)	Configuração	Resultado (MM ton)
0-9-9-2-9-1-0-8	4.471	0-2-8-9-9-2-0-10	4.471	0-10-1-2-2-1-6-8	4.471
0-2-9-2-2-1-6-8	4.470	0-8-9-5-9-9-0-9	4.470	0-2-8-9-9-10-0-1	4.470
0-7-9-2-2-1-6-8	4.470	0-2-9-5-9-9-0-1	4.470	0-7-8-8-8-0-0-8	4.470
0-2-9-10-8-0-0-8	4.470	0-10-9-2-0-1-6-8	4.469	0-9-9-2-9-1-0-7	4.468
0-1-1-1-1-1-0-1	4.468	0-9-9-2-9-1-0-6	4.468	0-7-9-9-9-9-0-9	4.468
0-10-9-2-8-1-6-2	4.467	0-2-9-10-10-10-0-10	4.467	0-2-9-8-0-0-0-8	4.466
0-9-9-2-2-1-6-8	4.466	0-2-8-5-9-9-0-9	4.466	0-2-1-9-9-9-0-9	4.466
0-2-9-5-9-7-0-9	4.466	0-2-7-5-9-9-0-9	4.466	0-2-9-8-6-0-0-8	4.466
0-2-9-5-9-2-0-9	4.466	0-2-9-8-10-0-0-8	4.465	0-2-8-9-10-10-0-10	4.465
0-2-8-9-9-7-0-10	4.465	0-10-9-1-2-1-6-8	4.465	0-10-7-2-2-1-6-8	4.465
0-8-8-8-8-0-0-8	4.465	0-2-8-9-9-10-0-7	4.465	0-2-9-8-6-10-0-8	4.465
0-10-9-2-8-1-6-1	4.464	0-2-9-8-7-0-0-8	4.464	0-10-9-0-2-1-6-8	4.464
0-2-9-8-2-0-0-8	4.463	0-2-8-9-9-10-6-10	4.463	0-10-9-9-2-1-6-8	4.463
0-1-9-2-2-1-6-8	4.462	0-9-10-10-10-10-0-10	4.462	0-1-9-2-8-1-6-8	4.462
0-10-9-2-6-1-6-8	4.462	0-2-8-9-9-10-0-10	4.462	0-10-9-2-8-1-6-10	4.462
0-2-8-9-9-10-0-6	4.461	0-10-9-2-8-0-6-8	4.461	0-10-9-2-9-1-6-8	4.461
0-2-8-9-9-1-0-10	4.461	0-1-9-9-9-9-0-9	4.461	0-10-9-2-8-10-6-8	4.461
0-7-7-7-7-7-0-7	4.460	0-10-9-2-10-1-6-8	4.460	0-2-9-8-6-0-0-2	4.460
0-10-8-2-2-1-6-8	4.460	0-10-9-5-2-1-6-8	4.459	0-2-10-5-9-9-0-9	4.459
0-2-9-8-6-0-0-10	4.459	0-2-1-10-10-10-0-10	4.458	0-2-8-9-6-10-0-10	4.457
0-10-9-2-2-1-6-8	4.457	0-2-8-2-10-10-0-10	4.456	0-10-9-10-2-1-6-8	4.456
0-1-9-2-8-1-6-7	4.454	0-2-10-10-10-10-0-10	4.454	0-2-9-5-9-9-0-10	4.453
0-2-9-8-6-0-0-7	4.452	0-2-7-8-8-0-0-8	4.452	0-2-2-10-10-10-0-10	4.452
0-2-8-9-9-0-0-10	4.450	0-1-9-2-8-1-6-6	4.449	0-2-8-5-10-10-0-10	4.449
0-1-9-2-8-1-6-10	4.448	0-2-10-8-8-0-0-8	4.448	0-2-8-9-0-10-0-10	4.447
0-2-7-10-10-10-0-10	4.447	0-10-9-2-8-1-6-6	4.446	0-2-9-8-6-0-0-6	4.443
0-2-8-10-10-10-0-10	4.443	0-7-10-10-10-10-0-10	4.443	0-8-10-10-10-10-0-10	4.440
0-2-10-9-9-9-0-9	4.438	0-2-8-9-7-10-0-10	4.437	0-9-9-2-9-1-0-10	4.437
0-2-8-1-10-10-0-10	4.436	0-2-9-5-9-9-0-6	4.435	0-10-10-10-10-10-0-10	4.431
0-0-8-8-8-0-0-8	4.413	0-0-9-5-9-9-0-9	4.409	0-0-9-2-2-1-6-8	4.406
0-0-9-9-9-9-0-9	4.397	0-0-10-10-10-10-0-10	4.374	0-2-0-9-9-9-0-9	4.369
0-2-0-5-9-9-0-9	4.362	0-2-0-8-8-0-0-8	4.350	0-10-0-2-2-1-6-8	4.340
0-2-0-10-10-10-0-10	4.338	0-9-0-2-9-1-0-0	4.309	0-9-0-9-9-10-0-0	4.302
0-1-0-2-8-1-6-0	4.293				