

MARCELO MORETTI FIORONI

**SIMULAÇÃO EM CICLO FECHADO DE MALHAS FERROVIÁRIAS
E SUAS APLICAÇÕES NO BRASIL: AVALIAÇÃO DE
ALTERNATIVAS PARA O DIRECIONAMENTO DE
COMPOSIÇÕES**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

São Paulo

Edição Original: 2007

Edição Revisada: 2008

MARCELO MORETTI FIORONI

**SIMULAÇÃO EM CICLO FECHADO DE MALHAS FERROVIÁRIAS
E SUAS APLICAÇÕES NO BRASIL: AVALIAÇÃO DE
ALTERNATIVAS PARA O DIRECIONAMENTO DE
COMPOSIÇÕES**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração:

Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:

Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo

Edição Original: 2007

Edição Revisada: 2008

RESUMO

Modelos de simulação usados para representar uma malha ferroviária com a circulação de trens percorrendo nela um ciclo fechado, estão sujeitos a diversas interferências. Essas interferências são representadas pela circulação de outros trens, bem como pelas filas que são formadas junto aos terminais de carga e descarga, que alteram a programação inicialmente idealizada. A validação desses modelos de simulação é prejudicada por essas interferências, e a busca por um correto procedimento de validação deve ter como base o adequado direcionamento e alocação dos trens. A carência de estudos sobre a validação de simulações aplicadas a sistemas ferroviários, que considerem a característica específica de trens de ciclo e as interferências citadas, possibilitou a elaboração desta tese, a qual sinaliza que o desenvolvimento de algoritmos que representam o processo de movimentação dos trens em nível de detalhe suficiente, e a adoção de um método de direcionamento adequado, permitem a validação do modelo para esse tipo de sistema. Das três alternativas avaliadas para representar o direcionamento: escolha aleatória entre diversos pontos de carregamento para atender um destino final ou realizado por rotina com a mesma finalidade inserida no próprio simulador, e por modelo otimizador acessado externamente pelo simulador, foi selecionada a segunda opção por permitir uma validação do modelo mais próxima da realidade e realizar experimentos com menor tempo computacional. Uma vez programado o modelo de simulação com o direcionamento de trens escolhido, foi possível conduzir experimentos para medir a sensibilidade com relação as principais variáveis que permitem o dimensionamento de sistemas ferroviários brasileiros.

Palavras chave: Simulação computacional. Simulação de Eventos Discretos. Ferrovias. Heurística de decisão, Otimização.

ABSTRACT

The rail network simulation models considering trains on closed loop may have many disturbances. These disturbances are caused by the railnet traffic, or queues at the load/unload stations, that changes the movement previously planned. The validation of these simulation models can be problematic because of these disturbances, and the search for the right validation procedure must count with a good train destination choosing process. The lack of studies about the validation of simulations applied to rail networks, considering the specific features of the closed loop trains and the disturbances, have led to this thesis development, which proves that the development of algorithms that represent the movement process of the trains under sufficient detailing level, and the adoption of a correct destination choosing process, reaches the model validation. From the three options evaluated to represent this destination choosing procedure: random choosing between many loading points to one unloading point, or an internal model routine to do this same task, or an external optimization model called from the simulation model, was chosen the second option, because it validates the model and runs the simulation experiment faster. Once prepared the model with the destination choosing process selected, was possible to conduct experiments to measure the model sensitivity to the main parameters at the design of Brazilian rail networks.

Keywords: Computational simulation. Discrete Event Simulation. Railroads. Decision heuristics, Optimization.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Rui Carlos Botter, pela valiosa orientação e incentivo.

Aos Professores Marcos Brinatti, Débora Ronconi e Cláudio Barbieri da Cunha, pelos inestimáveis conhecimentos transmitidos nas disciplinas cursadas.

Ao Professor Paulo José de Freitas Filho, pelas dicas oferecidas e pelo contínuo estímulo ao longo dos anos.

Aos meus pais Laércio José Fioroni e Nilda Moretti Fioroni pelos princípios de vida, incentivo e apoio dedicados a mim.

À minha esposa Sandra Vicente Veríssimo, por “ceder” o marido temporariamente a este empreendimento e pelo valioso apoio nos momentos mais difíceis.

À Paragon e seu diretor Luiz Augusto G. Franzese, pela ajuda e apoio, sem os quais este trabalho nem sequer começaria.

À MRS e seus colaboradores à época deste estudo, Náguissa Yuri e Marcelo Neder Machado, pela ajuda no entendimento dos processos envolvidos na circulação dos trens, e pela extensa coleta de dados empreendida.

Ao Professor Antônio Batocchio, meu orientador de mestrado, por me iniciar na área acadêmica.

Aos amigos que, de diversas maneiras, auxiliaram este estudo: Luiz Otávio Abdenur, Mário Tonizza, João Umbiruçu Campos Mundim, Giselle de Moraes Ramos, Sérgio Nazar, Caio Eduardo Zanin, Daniel Mota e Gustavo Dezem Telles.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 – Motivação para a Pesquisa..... | 16 |
| 1.2 – Objetivo | 20 |
| 1.3 – Organização do Texto..... | 22 |
| CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA..... | 24 |
| 2.1 – Desafios na Modelagem de Malhas Ferroviárias | 25 |
| 2.2 – Elementos do Sistema Ferroviário..... | 27 |
| 2.3 – Representação Adequada dos Trens de Ciclo | 33 |
| 2.4 – Representação do Direcionamento dos Trens | 36 |
| CAPÍTULO 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 40 |
| 3.1 – Estudos usando modelos analíticos..... | 42 |
| 3.2 – Estudos usando modelos de simulação..... | 45 |
| 3.3 – Estudos de otimização..... | 52 |
| 3.4 – Trabalhos mais relevantes..... | 57 |
| 3.5 – Ferramentas comerciais de simulação ferroviária..... | 60 |
| 3.6 – Discussão da Revisão Bibliográfica | 68 |
| CAPÍTULO 4 – MÉTODO..... | 71 |
| 4.1 – Método | 72 |
| 4.2 – Simulação de Eventos Discretos e Ferramenta computacional de Simulação adotada: Arena | 77 |
| 4.3 – Ferramentas de Otimização | 79 |
| 4.4 – O Procedimento de Validação Inicial por Otimização | 84 |
| CAPÍTULO 5 – MODELO CONCEITUAL DA SIMULAÇÃO | 92 |

| | |
|---|------------|
| 5.1 – Representação da malha..... | 95 |
| 5.2 – Representação dos Trens Diretos | 100 |
| 5.3 – Representação dos Trens de Ciclo..... | 102 |
| 5.4 – Algoritmo de Inserção de Trens na Malha | 105 |
| 5.5 – Algoritmo de Movimentação..... | 107 |
| 5.6 – Algoritmo de Atividades..... | 118 |
| 5.7 – Algoritmo de Locomotivas Auxiliares..... | 119 |
| 5.8 – Algoritmo de Contingências..... | 121 |
| 5.9 – Medição dos Indicadores de Desempenho | 129 |
| 5.10 – Indicadores Gráficos..... | 135 |
| 5.11 – Comportamentos específicos..... | 138 |
| CAPÍTULO 6 – APLICAÇÃO DE SIMULAÇÃO A UMA MALHA FERROVIÁRIA BRASILEIRA | 141 |
| 6.1 – Descrição da Malha da MRS Logística | 143 |
| 6.2 – Tipos de Trem em Circulação..... | 147 |
| 6.3 – Elaboração Parcial da Equação de Direcionamento..... | 158 |
| 6.4 – O Modelo Computacional | 160 |
| 6.5 – Procedimentos para Validação do Modelo Computacional | 164 |
| 6.6 – Cenário de Validação..... | 167 |
| 6.7 – Plano de Experimentos para a Escolha da Melhor Opção de Direcionamento | 175 |
| 6.8 – Experimento de Validação para Direcionamento Realizado pelo Próprio Simulador (Código Interno)..... | 176 |
| 6.9 – Experimento de Validação para Direcionamento com Escolha Aleatória | 181 |
| 6.9 – Experimento de Validação para Direcionamento com Decisão Realizada Externamente por Otimizador..... | 182 |
| 6.10 – Escolha da Melhor Opção para Representação do Direcionamento e Discussão dos Resultados..... | 185 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA FERROVIÁRIO BRASILEIRO..... | 188 |
| 7.1 – Plano de Experimentos para Medição de Desempenho do Sistema..... | 189 |
| 7.2 – Experimentos de Medição do Desempenho do Sistema | 190 |
| 7.3 – Representação de outras Malhas Ferroviárias Brasileiras..... | 200 |
| CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 204 |
| 8.1. Recomendações | 209 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 211 |
| ANEXO I – AUTORIZAÇÃO DA MRS LOGÍSTICA | 217 |
| ANEXO II – MAPA DE PÁTIOS DA MRS | 219 |
| ANEXO III – TRAÇADO DA MALHA DA MRS | 222 |
| ANEXO IV – DIAGRAMA DE PÁTIOS DA MRS | 224 |
| ANEXO V – GRÁFICOS DE PASSAGEM DOS TRENS MRS DE 20/10/2004, NA LINHA DE SÃO PAULO | 227 |
| ANEXO VI – MAPA DA LOCALIZAÇÃO DOS AUXÍLIOS | 228 |
| ANEXO VII – ATRIBUTOS USADOS PELAS ENTIDADES DO MODELO | 230 |
| ANEXO VIII – VARIÁVEIS USADAS NO MODELO | 234 |
| ANEXO IX – CÓDIGO DO MODELO DE SIMULAÇÃO EM SIMAN..... | 267 |
| ANEXO X – TRENS GRADE USADOS NO ESTUDO DE CASO | 408 |
| ANEXO XI – GRADE DE TRENS EXPRESSO | 410 |
| ANEXO XII – TEMPOS DE TRÂNSITO EM SITUAÇÃO NORMAL..... | 412 |

| | |
|---|------------|
| ANEXO XIII – TEMPOS DE TRÂNSITO SOB CONTINGÊNCIA | 418 |
| ANEXO XIV – CÓDIGO DO MODELO EM GAMS | 424 |
| ANEXO XV – CONTINGÊNCIAS DE PÁTIO | 426 |
| ANEXO XVI – INFORMAÇÕES SOBRE OS SEGMENTOS..... | 432 |
| ANEXO XVII – INFORMAÇÕES SOBRE OS PÁTIOS | 438 |
| ANEXO XVIII – ROTEIROS DOS PONTOS ZERO AOS TERMINAIS DE CARGA | 444 |
| ANEXO XIX – ROTEIROS DOS TERMINAIS DE CARGA AOS TERMINAIS DE CLIENTES (DESCARGA) | 446 |
| ANEXO XX – ROTEIROS DE TERMINAIS DE CLIENTES A PONTOS ZERO.. | 448 |
| ANEXO XXI – GRUPOS DE DIRECIONAMENTO..... | 450 |
| ANEXO XXII – TABELA DE ROTEIROS | 454 |
| ANEXO XXIII – ATIVIDADES DOS TRENS UNITÁRIOS | 457 |
| ANEXO XXIV – TRENS UNITÁRIOS (DE CICLO)..... | 459 |
| ANEXO XXV – TONELADA ÚTIL GERADA PELA MRS DURANTE O MÊS DE OUTUBRO DE 2004..... | 461 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Investimentos no Modal Ferroviário (Pesquisa Ferroviária CNT – 2002). | 16 |
| Figura 1.2 – Aspectos envolvidos na escolha da ferramenta utilizada na modelagem... | 18 |
| Figura 2.1 – Vista parcial da sala de controle da MRS Logística | 26 |
| Figura 2.2 – Linha singela e linha dupla..... | 28 |
| Figura 2.3 – Pátio de Cruzamento..... | 28 |
| Figura 2.4 – Seções de Bloqueio | 29 |
| Figura 2.5 – Pátios de Carga/Descarga ou Atividade | 30 |
| Figura 2.6 – Linha de pátio sem ligação em uma das pontas | 31 |
| Figura 2.7 – Ilustração da operação de um trem de ciclo | 34 |
| Figura 2.8 – Alternativas de direcionamento podem alterar o ciclo do trem | 36 |
| Figura 3.1 – Interface do SIMSIG | 61 |
| Figura 3.2 – Uma das janelas do Multirail | 63 |
| Figura 3.3 – Uma das janelas do Fast Track II | 64 |
| Figura 3.4 – Janela do Train Dispatcher 3 | 65 |
| Figura 3.5 – Janela do Track Builder | 66 |
| Figura 3.6 – Interface do PC Rail | 67 |
| Figura 4.1 – Fluxograma de aplicação do método | 76 |
| Figura 4.2 – Comportamento geral de um modelo de simulação em Arena | 79 |
| Figura 4.3 – Otimizador buscando os pesos dos fatores para a equação do direcionamento de trens | 81 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.4 – Otimizador atuando como motor de decisão para o direcionamento | 81 |
| Figura 5.1 – Estrutura do modelo conceitual | 93 |
| Figura 5.2 – Ilustração de um pátio ferroviário | 95 |
| Figura 5.3 – Ilustração de segmentos da malha..... | 98 |
| Figura 5.4 – Entroncamentos da malha ferroviária | 99 |
| Figura 5.5 – Trechos da malha ferroviária | 100 |
| Figura 5.7 – Algoritmo de Inserção dos Trens na malha | 107 |
| Figura 5.8 – Situação de travamento..... | 110 |
| Figura 5.9 – Linha experimental..... | 115 |
| Figura 5.10 – Resolução do conflito 1..... | 116 |
| Figura 5.11 – Resolução do conflito 2..... | 117 |
| Figura 5.12 – Resolução do conflito 3 | 118 |
| Figura 5.13 – Passo 1 e início do passo 2 do algoritmo de movimentação | 123 |
| Figura 5.14 – Procedimento para linha dupla | 124 |
| Figura 5.15 – Procedimento para vencer um único trecho em linha singela | 125 |
| Figura 5.16 – Procedimento para vencer seqüência de trechos em linha singela | 126 |
| Figura 5.17 – Passo3, que reserva o caminho a ser percorrido | 127 |
| Figura 5.18 – Passo 4, que executa o movimento do trem | 128 |
| Figura 5.19 – Passo 5, que encerra o movimento | 129 |
| Figura 5.20 – Gráfico de Cruzamento real | 136 |
| Figura 5.21 – Solução de Conflito entre Trens | 137 |
| Figura 6.1 –Localização da Malha da MRS Logística | 144 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.2 – Mapa da Malha da MRS Logística | 145 |
| Figura 6.3 – Etapas do percurso dos trens de ciclo | 150 |
| Figura 6.4 – Trechos da malha que requerem auxílio | 153 |
| Figura 6.5 – Locomotivas descendo a Cremalheira | 155 |
| Figura 6.6 – Início da subida na Cremalheira | 156 |
| Figura 6.7 – Elementos de animação de um segmento da malha | 162 |
| Figura 6.8 – Animação do modelo: Entroncamento de FQS | 163 |
| Figura 6.9 – Animação geral da malha | 164 |
| Figura 6.10 – Ciclo do transporte de minério para exportação | 170 |
| Figura 6.11 – Ciclo do transporte de minério diretamente para Cosipa | 171 |
| Figura 6.12 – Ciclo do transporte de minério para Cosipa via terminal intermodal ... | 171 |
| Figura 6.13 – Ciclo do transporte de minério para CSN | 171 |
| Figura 6.14 – Ciclo do transporte de minério para Patrag | 172 |
| Figura 6.15 – Ciclo do transporte de minério para Açominas | 172 |
| Figura 6.16 – Ciclo do transporte de Carvão/Coque | 172 |
| Figura 6.17 – Ciclo do transporte de Bauxita | 173 |
| Figura 6.18 – Controles Inseridos no Optquest | 178 |
| Figura 6.19 – Resposta a ser monitorada pelo Optquest | 178 |
| Figura 6.20 – Função objetivo inserida no OptQuest | 178 |
| Figura 6.21 – Resultados do OptQuest | 178 |
| Figura 6.22 – Gráfico de evolução dos resultados | 178 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.1 – Histórico de tonelada útil com deficiência de atendimento nos portos .. | 193 |
| Figura 7.2 – Evolução da tonelada útil total e do minério exportação | 195 |
| Figura 7.3 – Evolução dos demais ciclos | 196 |
| Figura 7.4 – Evolução da tonelada útil total e do minério exportação | 198 |
| Figura 7.5 – Evolução dos demais ciclos | 198 |

Capítulo 1 – Introdução

É inegável a importância da logística para as empresas, para a economia e para o país no momento atual. Sua relevância vem crescendo nos últimos anos, período em que as companhias adotaram inúmeras técnicas para aperfeiçoar suas plantas produtivas, até perceberem que havia um grande potencial de melhoria nos seus sistemas de distribuição.

Diante de um cenário em que a rapidez do atendimento, a disponibilidade permanente, e o baixo custo deixaram de ser vantagens competitivas para se tornarem a regra, houve um surgimento repentino e em grande quantidade de operadores logísticos e da sua contratação por grande parte das companhias.

Dentro deste contexto, todos os modais de transporte passaram a receber maior atenção por parte da comunidade empresarial, e cada vez mais estudos e investimentos são realizados no setor.

Acompanhando a história do transporte ferroviário no Brasil, é possível constatar que, após seu início com a implantação da primeira ferrovia em 1854, ligando a Baía da Guanabara a Petrópolis, houve um grande crescimento deste

modal, impulsionado principalmente pela economia cafeeira (Porto, T. G. – 1992). Nos anos que se seguiram, os investimentos na malha ferroviária brasileira foram paulatinamente se escasseando, ao mesmo tempo em que eram priorizados outros modais, especialmente o rodoviário, atingindo níveis tão baixos que levaram ao seu sucateamento.

Em seu Relatório Analítico “Pesquisa Ferroviária CNT – 2002”, a Confederação Nacional do Transporte apurou que: “O cenário pré-privatização, dos anos 80 até meados de 90, representou o menor nível de desempenho operacional do setor em toda a sua história, resultado de um longo período de baixos investimentos e de pouca conservação do parque instalado”. A situação começou a mudar com a privatização do setor em meados dos anos 90, quando se observa uma lenta, mas firme, retomada dos investimentos, como pode ser constatado na Tabela 1.1 e no gráfico da Figura 1.1.

Tabela 1.1 – Investimentos no Modal Ferroviário (CNT, 2002)

| Ano | 83 | 84 | 85 | 87 | 88 | 90 | 91 | 92 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 |
|--|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|-----|
| Investimento (em US\$ 10³) | 383 | 214 | 99 | 213 | 278 | 180 | 147 | 96 | 109 | 11 | 44 | 61 | 104 |

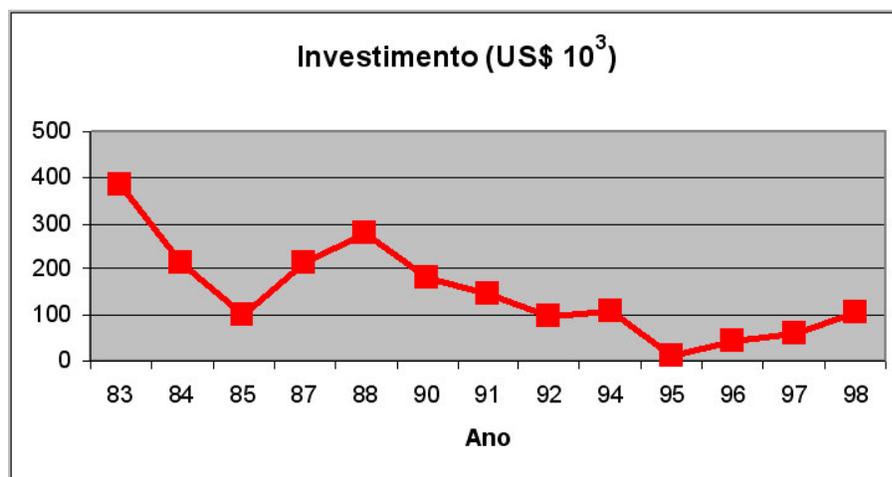


Figura 1.1 – Investimentos no Modal Ferroviário (CNT, 2002)

Constata-se que o modal ferroviário novamente começa a ter a merecida relevância dentro do cenário nacional, com programas de investimento do governo e gestão profissional de concessionárias extremamente eficientes. Este cenário torna os estudos sobre o modal ferroviário cada vez mais relevantes também.

1.1 – Motivação para a Pesquisa

Murgel (1998) afirma que a ferrovia caracteriza-se como um modo de transporte capaz de movimentar grandes volumes de carga ou passageiros. Os altos investimentos necessários no que tange à infra-estrutura, equipamentos e mão-de-obra são compensatórios quando as economias de escala, advindas de sua capacidade de movimentação, são aproveitadas.

Segundo Rosseto (1997), as ferrovias constituem-se num meio de transporte de custo relativamente baixo (principalmente quando comparado com o modo de transporte rodoviário) e muito utilizado para o deslocamento dos mais variados produtos e passageiros. Principalmente no caso do Brasil, em que as distâncias atingem dimensões continentais, a ferrovia apresenta-se como um meio econômico de transporte, embora relativamente pouco utilizado no país. Para

Porto (1992) o transporte geral de cargas pelo modal ferroviário se apresenta como sendo o ideal para países de grande extensão territorial.

Segundo Ahuja et. al. (2005), houve grande quantidade de aplicações de Pesquisa Operacional para logística nas últimas décadas, porém o modal ferroviário ainda não foi totalmente beneficiado por estes avanços.

O contexto do transporte ferroviário no Brasil apresentado anteriormente demonstra que a busca pela melhor forma de transporte é crítica para as empresas e para o país, e que o transporte ferroviário é uma alternativa valiosa que poderia ser aplicada em escala maior do que atualmente se faz.

Outro aspecto do contexto atual é o extraordinário avanço das tecnologias de informática ocorridas nos últimos anos, e em constante crescimento. Este aspecto forneceu novas possibilidades de estudo em várias áreas da ciência, como a Pesquisa Operacional. Nesta área, foi especialmente favorecida a técnica de Simulação de Eventos Discretos, que passou a contar com ferramentas computacionais poderosas, capazes de estudar sistemas de maior complexidade, envolvendo grande quantidade de variáveis.

A técnica de simulação também foi favorecida por avanços notáveis na facilidade de modelagem. Algumas linguagens de simulação oferecem estruturas modulares que podem representar porções complexas de um sistema, e que podem ser facilmente configuradas pelo programador durante a montagem do modelo. Tais estruturas funcionam como sub-rotinas ou bibliotecas de comandos em uma linguagem de programação tradicional, contendo grande parte do código necessário à representação de determinada estrutura do processo. Em algumas ferramentas específicas de simulação de eventos discretos, esta estrutura recebe o nome de “Template”. Tais estruturas oferecem ainda mais facilidade aos estudos com simulação de eventos discretos, mas há uma contrapartida: a facilidade e rapidez na modelagem de determinados sistemas leva à perda de flexibilidade da ferramenta, ou seja, um template desenvolvido para representar certo tipo de

sistema, por exemplo, um sistema de manufatura, dificilmente poderá ser usado para representar outros tipos de sistemas, como um sistema logístico. A Figura 1.2 ilustra como a flexibilidade e a facilidade de uso variam conforme a ferramenta utilizada.

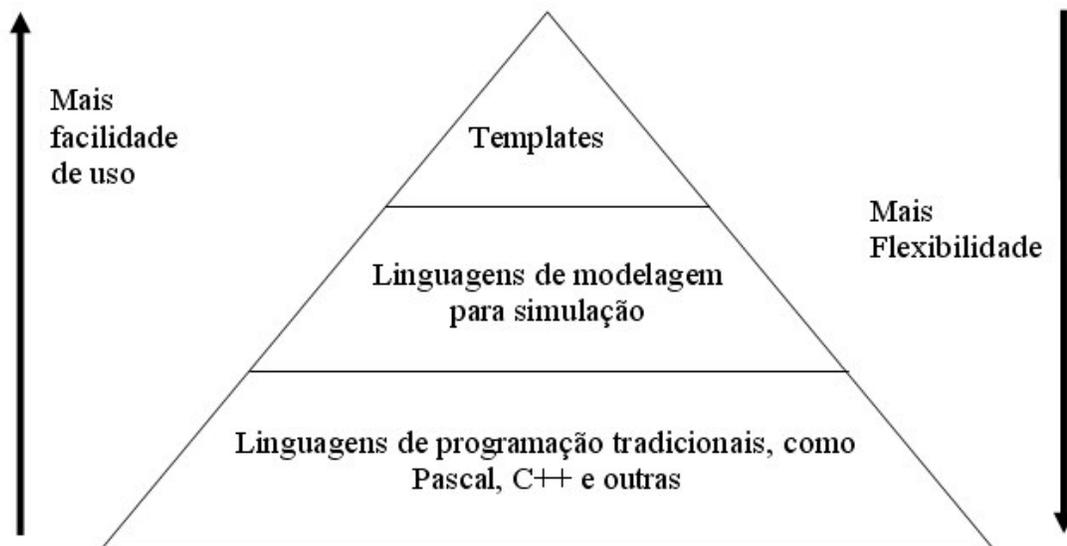


Figura 1.2 – Aspectos envolvidos na escolha da ferramenta utilizada na modelagem

Como se pode ver na figura, os templates têm sua facilidade de uso inversamente proporcional à sua flexibilidade.

Sabe-se que os templates podem ser aplicados em simulação de sistemas ferroviários, como no caso apresentado por Pater & Teunisse (1997). Entre as vantagens do uso deste tipo de estrutura, estão a facilidade e rapidez de modelagem, e a minimização dos erros de lógica, entre outras relacionadas por Hooghiemstra & Teunisse (1998).

Outra das características da técnica de simulação de eventos discretos é que o modelo, uma vez construído para o primeiro estudo, pode ser reaproveitado

para atender a novas mudanças no sistema original, ou reproduzir um sistema semelhante, poupando o esforço de uma nova modelagem.

Especificamente no caso da modelagem de malhas ferroviárias, o controle de movimentação dos trens pode ser bastante complexo. Isto representa um desafio quando se pretende reproduzir esse tipo de sistema computacionalmente. E quando, em um modelo de malha ferroviária, se necessita representar trens que circulam ciclicamente entre origem-destino, conservando suas composições, essa complexidade ainda é adicionada dos seguintes fatores:

- Os trens que percorrem um ciclo podem ter procedimentos decisórios para escolher a melhor opção de terminal para carregar ou descarregar. Esse procedimento pode ser bastante sofisticado no sistema real, envolvendo até o uso de ferramentas computacionais de apoio, o que dificulta a construção do modelo;
- Por tornar o sistema mais sensível a interferências, os modelos que buscam retratar os trens de ciclo são de difícil validação, sendo necessário um ajuste bastante preciso para que o comportamento real se reproduza adequadamente.

Constatou-se que há uma carência de estudos de malhas ferroviárias que considerem a circulação de trens cíclicos. Tal fato converteu-se em grande motivador deste estudo, pois esse tipo de trem responde pelo maior volume de transporte das empresas que fazem uso dele. Alguns exemplos no Brasil são CVRD (Companhia Vale do Rio Doce) e MRS.

Portanto, são relacionados abaixo os principais motivadores para a realização do estudo:

- Convicção da importância que tem o modal ferroviário para um país de proporções continentais como o Brasil;

- Retomada de investimentos neste modal no passado recente, com correspondente crescimento na demanda por estudos para a área;
- Disponibilidade de ferramentas computacionais que favorecem a elaboração de estudos mais complexos e precisos sobre sistemas ferroviários, permitindo ainda a sua reusabilidade em estudos futuros;
- Dificuldade em se representar e validar modelos de simulação de malhas ferroviárias que considerem trens de ciclo, e carência de estudos com este foco;
- Experiência anterior do pesquisador com estudos de simulação de sistemas ferroviários;

1.2 – Objetivo

Esta Tese pretende desenvolver algoritmos e avaliar técnicas que permitam modelar detalhadamente malhas ferroviárias com trens em ciclo fechado, e validar estes modelos de simulação de forma adequada.

A necessidade de se representar detalhes relevantes do comportamento dos trens de ciclo será atendida com o desenvolvimento de algoritmos apropriados, a serem usados pelo modelo de simulação. E a dificuldade em se representar o procedimento de decisão para direcionamento do trem receberá três soluções propostas, das quais será selecionada a mais adequada.

Assim, o objetivo principal deste estudo é confirmar a hipótese de que os algoritmos propostos para o detalhamento de malhas ferroviárias, juntamente com o método de direcionamento de trens escolhido, são capazes de validar um modelo de simulação de malha ferroviária com trens em ciclo fechado. Esta

hipótese será confirmada por meio da modelagem e comparação com uma malha ferroviária brasileira.

Para alcançar o objetivo principal proposto, este estudo deverá alcançar objetivos intermediários, que são:

- Desenvolver um conjunto de algoritmos que sejam capazes de retratar a complexidade de circulação de trens de ciclo fechado em uma malha ferroviária para estudos em nível estratégico;
- Desenvolver algoritmos de direcionamento de trens para escolha aleatória, escolha realizada pelo próprio modelo, e escolha realizada por ferramenta externa;
- Descrever como os algoritmos desenvolvidos podem ser aplicados em outras malhas ferroviárias brasileiras;
- Implementação dos algoritmos desenvolvidos em um modelo de simulação, representando uma malha ferroviária brasileira real.

O modelo de simulação desenvolvido deve ser capaz de representar a complexidade existente nas malhas ferroviárias de grandes extensões, como as brasileiras, nos aspectos de infra-estrutura física e interação dos trens durante a circulação pela malha, possibilitando especificamente o estudo destas interferências nos trens de ciclo fechado.

Essa estrutura deve ser capaz de representar as características da malha ferroviária descritas anteriormente, considerando os trens que circulam sobre a malha e suas características em nível de detalhe suficiente para que se possa estudar o impacto no desempenho do sistema no caso de:

- Ampliação de pátios de cruzamento, ou reativação de pátio inativo;
- Duplicação de linhas;
- Desativação de setores da malha;

- Ampliação de terminais de carga ou descarga e linhas de estacionamento;
- Aumento de trens em circulação;
- Aquisição de novas locomotivas;
- Avaliação de novos percursos a serem usados pelos trens;

1.3 – Organização do Texto

A apresentação do conteúdo deste estudo segue a seguinte estrutura de capítulos:

- Capítulo 1 - Introdução: Apresentam-se as motivações do estudo, e o contexto atual do modal ferroviário no Brasil. Também são apresentados o objetivo e a organização do conteúdo da Tese.
- Capítulo 2 – Caracterização do Problema: Apresenta os desafios a serem superados para representar uma malha ferroviária em grande nível de detalhe através de Simulação.
- Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica: Apresenta os conceitos fundamentais a serem utilizados neste estudo e os resultados de uma busca por trabalhos semelhantes ou relacionados, evidenciando a contribuição desta Tese.
- Capítulo 4 – Método: Apresenta o método aplicado no desenvolvimento do estudo.
- Capítulo 5 – Modelo Conceitual da Simulação: Reúne as regras que deverão ser seguidas pelo modelo e os algoritmos que representam as características do sistema;
- Capítulo 6 – Aplicação de Simulação a uma Malha Ferroviária Brasileira: Apresenta a aplicação dos algoritmos propostos, com a

construção de um modelo de simulação de uma malha ferroviária brasileira (MRS Logística). Neste capítulo também são apresentados os experimentos de validação que determinam o melhor procedimento de direcionamento dos trens de ciclo;

- Capítulo 7 – Análise de Desempenho de um Sistema Ferroviário Brasileiro: Descreve os experimentos de desempenho realizados com o modelo validado no capítulo anterior, bem como os resultados obtidos. Apresenta também análise de aplicação da técnica apresentada em outras malhas ferroviárias brasileiras;
- Capítulo 8 – Conclusões e Recomendações: Reapresenta de forma sumária o conteúdo da Tese, fazendo uma análise dos resultados obtidos e as conclusões do estudo como um todo.

Capítulo 2 – Caracterização do Problema

O modal ferroviário apresenta várias restrições, como:

- Baixa flexibilidade de tráfego, ou seja, procedimentos de ultrapassagem e cruzamento entre trens são muito mais complexos do que nos modais rodoviários ou fluviais, por exemplo. Isto exige razoável esforço de planejamento das rotas a serem seguidas pelos trens;
- Limitações de capilaridade. O modal ferroviário está limitado ao atendimento de clientes que se encontrem próximos à linha férrea, dependendo do transbordo para outros modais caso o cliente se encontre distante da linha;
- O procedimento para deixar os blocos de vagões carregados com o cliente envolve certa complexidade, exigindo manobras de formação e desmembramento do trem;
- Alto custo de material rodante (locomotivas e vagões);
- Alto custo de manutenção de infra-estrutura e material rodante;

- Carência de mão de obra especializada. Devido ao anterior sucateamento deste modal, e a sua recente retomada, o mercado de trabalho e educacional não estava preparado para as novas demandas e ainda está em processo de adaptação.

Em vista destes aspectos, é relevante realizar estudos que contribuam para o aproveitamento máximo da infra-estrutura existente, e avaliar com segurança os investimentos ou mudanças estratégicas pretendidas.

Este capítulo apresenta os desafios envolvidos na representação computacional das restrições ferroviárias, e também detalha os objetivos da Tese.

2.1 – Desafios na Modelagem de Malhas Ferroviárias

Entre as restrições listadas, uma em especial afeta os estudos sobre este modal: Trata-se da baixa flexibilidade no tráfego dos trens sobre a malha ferroviária, o que leva a situações de decisão bastante complexas no sistema real, e que precisam ser consideradas de alguma forma nos modelos matemáticos ou computacionais para estudos sobre o sistema.

Em uma rede ferroviária, grande atenção é dada para a organização da circulação de trens. Sua elevada capacidade de transporte envolve o uso de equipamentos de grande porte e alto custo. Uma composição ferroviária carregada pode pesar milhares de toneladas, o que significa que acidentes ferroviários podem ser facilmente classificados como gravíssimos, resultando em perda de carga, material rodante, linhas férreas e, na pior das hipóteses, de vidas humanas.

Erros de movimentação, quando não provocam acidentes, geram grande distúrbio na operação da malha como um todo. Por exemplo, caso dois trens entrem em uma mesma linha singela em sentidos opostos, deverá ser comandada a sua parada total, e o recuo de uma das composições para o pátio anterior. Esta operação atrasa não só os trens envolvidos, mas todos os anteriores, prejudicando

toda a programação de partidas daquele setor da malha, ou até mesmo da malha toda.

Para evitar situações como esta, uma grande estrutura de controle de tráfego é adotada pelas empresas que administram as ferrovias. Em salas com grandes painéis que informam o estado de cada trecho da malha, uma equipe de profissionais acompanha o movimento de todos os trens e orienta o seu avanço, parada ou desvio. A Figura 2.1 mostra a sala de controle da MRS Logística, onde se pode notar ao fundo o referido painel, e parte da equipe que monitora e orienta os maquinistas.

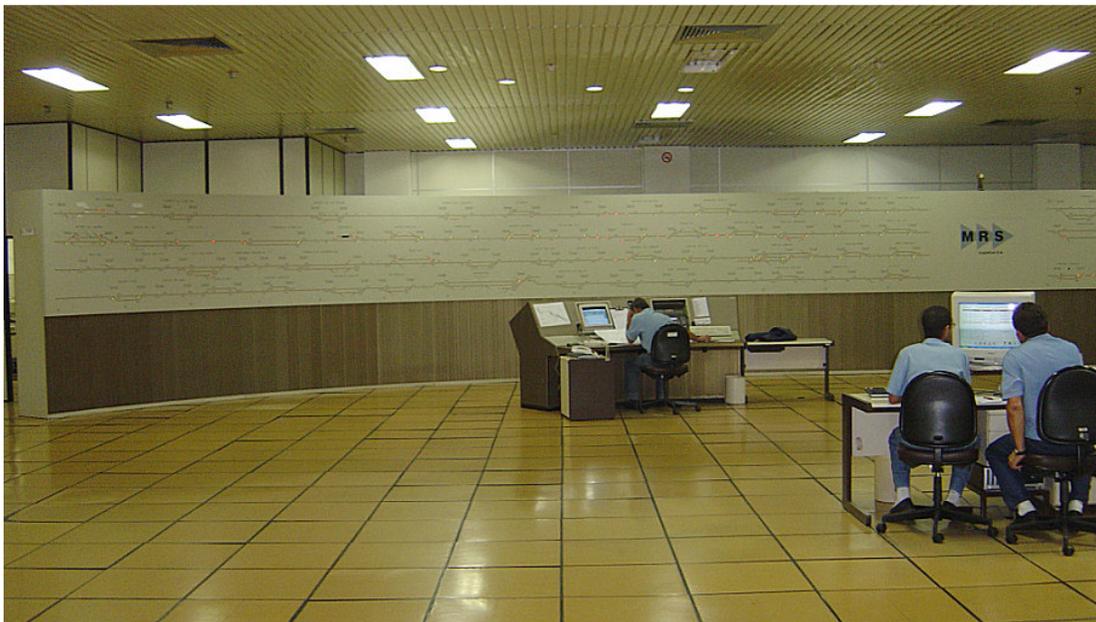


Figura 2.1 – Vista parcial da sala de controle da MRS Logística

A estrutura empregada pelas empresas sinaliza o grau de complexidade envolvido na movimentação adequada dos trens. Conseqüentemente, a modelagem que alcance um nível de detalhe semelhante ao da realidade, se defrontará com a mesma complexidade.

A capacidade humana de tomar decisões é de difícil representação em um sistema computacional, o qual exige regras claras e orientação completa quanto aos procedimentos a serem adotados em cada situação. Desta forma, é necessário identificar os procedimentos humanos usados para realizar as tomadas de decisão (se houverem), ou adotar simplificações no modelo que tornem possível a sua implementação.

Entretanto, segundo Pidd (1998), um modelo não deve ser necessariamente tão complicado quanto a realidade que está sendo representada, pois ele faz parte de um sistema usuário-modelo. Segundo Pidd, os modelos não carregam sozinhos toda a responsabilidade em gerar os resultados corretos para a análise do sistema. Grande parte desta responsabilidade é papel do usuário, que deve usar o modelo adequadamente. Este conceito é resumido por Pidd com a frase “Modele Simples, Pense Complicado”.

Depreende-se desta orientação, que o modelo deve ter a complexidade apenas suficiente para que se realizem os estudos / experimentos pretendidos.

A seguir, são relacionadas as estruturas existentes em um sistema ferroviário, que devem ser consideradas no modelo para sua adequada representação.

2.2 – Elementos do Sistema Ferroviário

2.2.1 – Infra-Estrutura física

A infra-estrutura física de uma malha ferroviária consiste geralmente nos seguintes elementos:

- Linha Singela: linha férrea que permite a circulação de trens em um único sentido de cada vez;
- Linha Dupla: linha férrea duplicada (duas linhas singelas paralelas), que permite a circulação de trens nos dois sentidos simultaneamente

ou a ultrapassagem de trens no mesmo sentido com velocidades diferentes. A Figura 2.2 ilustra representativamente a estrutura das linhas singelas e duplas;

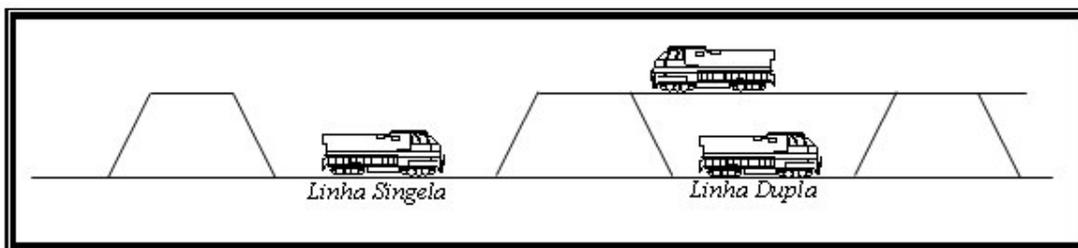


Figura 2.2 – Linha singela e linha dupla

- Pátios de Cruzamento: Trechos da malha com duas ou mais linhas de tamanho fixo, permitindo que, em linhas singelas, os trens estacionem em uma das linhas, liberando a passagem para trens que estão circulando no sentido oposto, desde que o trem que estaciona tenha comprimento menor que o do pátio. A Figura 2.3 ilustra o funcionamento de um pátio de cruzamento. A estrutura da linha física pode variar em relação ao desenho apresentado, mas seu propósito e funcionamento seguirão os mesmos princípios, podendo mudar apenas a quantidade de trens aguardando liberação, ou o caminho de acesso à linha de trânsito;

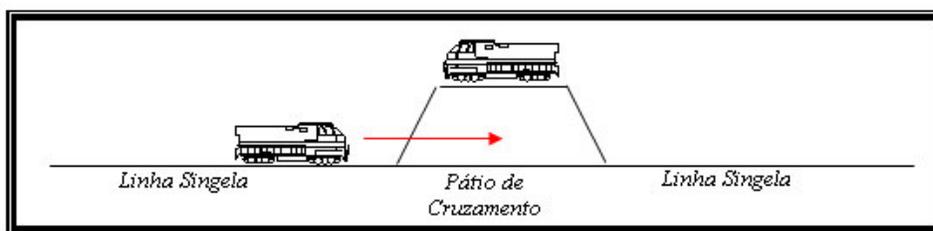


Figura 2.3 – Pátio de Cruzamento

- Linhas não Sinalizadas: Trecho entre pátios que não conta com qualquer controle eletrônico sobre o posicionamento do trem. O

tráfego nestes trechos é feito mediante autorização da sala de controle, e apenas um trem pode circular a cada vez. O trem não pode parar nesta linha devido a ocupação de trechos ou pátios adiante. Devido a isto, ele só entra na linha se houver disponibilidade do pátio de cruzamento seguinte;

- Seções de Bloqueio (linhas sinalizadas): Estrutura de controle usando sensores na linha ou localização por satélite, permitindo que a sala de controle saiba em tempo real a posição dos trens. Em linhas que dispõem desta estrutura, os trens podem parar e formar filas entre os pátios de cruzamento (desde que estejam se movendo para o mesmo sentido). A quantidade de trens que podem parar é igual ao número de seções de bloqueio, cuja operação é ilustrada na Figura 2.4;

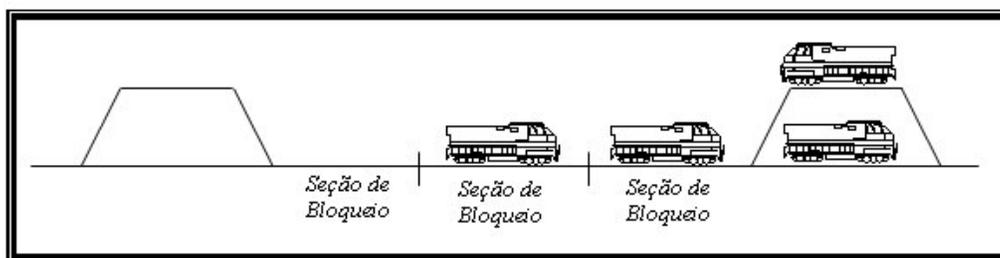


Figura 2.4 – Seções de Bloqueio

- Entroncamentos: Convergência de três ou mais linhas da malha, com características de trânsito específicas;
- Pátios de carga / descarga: Pátios onde estão disponíveis linhas adicionais de carga ou descarga, onde o trem interrompe o seu movimento para realizar a operação. Estas atividades são feitas fora das linhas de trânsito, ou seja, os outros trens que circulam pela linha não sofrem interferência desta atividade;

- Pátios de Atividade: Pátios que possuem linhas adicionais de estacionamento, onde o trem pára com o objetivo de realizar troca de equipagem, abastecimento ou inspeções de rotina. Tem característica semelhante à dos pátios de carga / descarga, ou seja, o trem realiza a atividade sem interferir no movimento dos outros. A Figura 2.5 ilustra um pátio que tem disponíveis linhas de carga/descarga, e também linha de atividade, que podem coexistir normalmente;

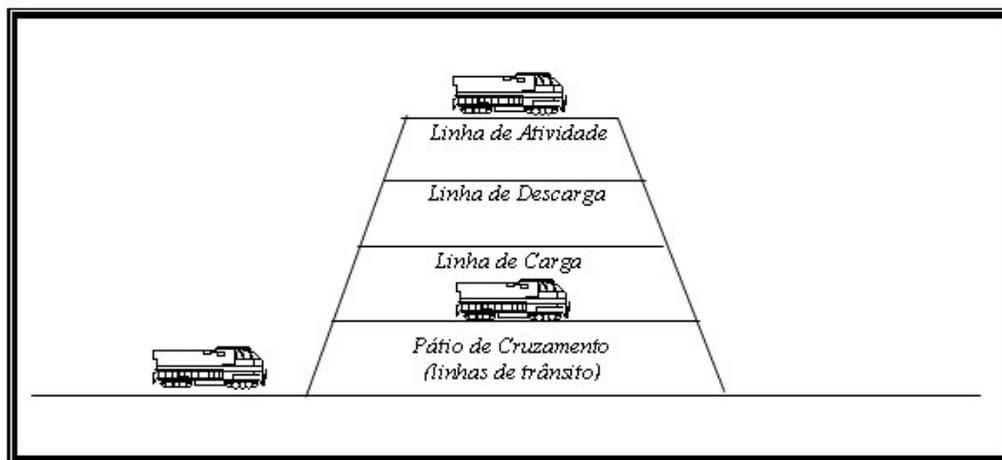


Figura 2.5 – Pátios de Carga/Descarga ou Atividade

O desenho dos pátios pode variar. O apresentado na Figura 2.5 permite que o trem entre para a linha desejada saindo diretamente da linha de trânsito. Em alguns pátios isso não é possível, pois há apenas uma linha de acesso, o que força o trem a passar por uma das outras linhas antes para manobrar. Uma linha com este desenho está apresentada na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Linha de pátio sem ligação em uma das pontas

2.2.2 – Elementos em Circulação

Os trens que circulam pela malha podem ser de diversos tipos, dependendo de sua finalidade ou tipo de serviço sendo prestado. Os tipos mais relevantes são os seguintes:

- Trem direto: Trem de carga com origem-destino, que é formado periodicamente em um terminal (pátio) de origem, parte para a linha em um horário pré-determinado e segue um caminho fixo pela malha até chegar ao terminal de destino, onde é desmembrado. Este tipo de trem leva diversos tipos de carga e pode ou não estar vinculado a um cliente específico da empresa administradora da ferrovia. Os trens diretos podem ser considerados do tipo “expresso” caso tenham prioridade sobre os outros;
- Trem de ciclo: Trem de carga dedicado ao transporte de uma carga específica entre terminais de carga e descarga. Este tipo de trem é formado uma única vez na malha, tem tamanho fixo (varia apenas em caso de reparo de vagões), e segue um ciclo fechado carregando no terminal de carga, partindo e seguindo um caminho fixo até o

terminal de descarga, descarregando, retornando ao terminal de carga por um caminho fixo, e repetindo continuamente este ciclo. Este trem não é desmembrado;

- Locomotivas escoteiras: O termo “escoteira” é usado para denominar uma locomotiva circulando sem vagões. Este movimento ocorre quando um trem é desmembrado em um pátio e suas locomotivas são necessárias em outro, onde está sendo formado um novo trem;
- Trem de auxílio: Locomotiva auxiliar que fica posicionada em determinados pátios, anteriores a trechos da malha onde o aclave é muito acentuado. Seu propósito é ser acoplado a um trem que necessita vencer o aclave. Uma vez percorrido o trecho acentuado, a locomotiva auxiliar é desacoplada do trem e deve retornar ao pátio inicial. Ela pode retornar “escoteira” ou acoplada a uma outra composição que esteja circulando na mesma direção. Dependendo da intensidade de circulação no trecho, ou sua extensão, podem haver várias locomotivas auxiliares, e seu retorno pode ser feito em comboio (várias locomotivas auxiliares juntas);
- Trens de passageiros: Trens que possuem característica semelhante à dos trens de ciclo, ou seja, ficam circulando entre dois pátios. Estes trens geralmente tem velocidade superior a dos outros trens e, segundo as regras de concessão brasileiras, deve ter prioridade em relação aos trens de carga;
- Outros trens e equipamentos: Outros trens podem circular pela malha para realização de testes na linha férrea ou reparos. Geralmente estes movimentos ocorrem nos intervalos de passagem dos outros trens, evitando provocar interferências.

2.2.3 – Ocorrências

Durante a circulação, podem ocorrer eventos que interferem no caminho dos trens. Alguns destes eventos são:

- Interrupção de via: Problemas físicos com a linha podem impedir a passagem do trem. Nestes casos, o trem interrompe o seu movimento (independente do tipo de linha) e aguarda até que o reparo nos trilhos seja realizado, continuando o percurso em seguida;
- Defeito grave do trem durante o movimento: Durante o percurso, o trem pode sofrer uma falha grave que o obrigue a parar, interrompendo a linha. Nestes casos, o reparo mecânico é acionado e vem ao local para atendimento emergencial. Após isso, o trem continua o seu caminho;
- Defeito do trem no pátio: O trem pode sofrer problemas mecânicos durante o seu movimento, que não requerem sua parada imediata. Nestes casos, a parada é realizada no próximo pátio de cruzamento. Ele aguarda no local a chegada da equipe de manutenção que realiza o reparo. Depois disso o trem segue em frente;

2.3 – Representação Adequada dos Trens de Ciclo

Em países com proporções continentais como Brasil, Estados Unidos, Canadá e outros, as malhas ferroviárias são principalmente dedicadas ao transporte de carga, tendo grandes extensões e com pequena quantidade de intersecções, se comparadas a malhas ferroviárias de países pequenos como a Holanda, cujo foco é principalmente o transporte de passageiros.

O transporte ferroviário de granéis por grandes extensões frequentemente faz uso de composições de tamanho fixo e operação constante, carregando em um ponto de origem de carga (geralmente uma mina ou ponto de

escoamento agrícola), se deslocando a seguir para um ponto de descarga (geralmente um porto ou ponto de distribuição/consumo do produto), retornando vazio ao ponto de carga.

Este movimento caracteriza um ciclo carrega / movimenta / descarrega / movimenta. A presença de diversas composições semelhantes realizando operações nos mesmos pontos de carga/descarga caracteriza uma operação cíclica que pode sofrer interferências diversas do sistema, requerendo estudo específico. Por exemplo, caso haja atraso no carregamento de uma composição, haverá formação de fila no ponto de carga. Em um segundo momento, ao se carregarem seguidamente essas composições, poderá haver fila logo depois no ponto de descarga. Ou seja, as interferências se propagam dentro do ciclo.

Dentre os tipos de trens em circulação na malha, os denominados trens de ciclo receberão maior atenção neste estudo. Estes trens permanecem com a mesma formação durante longos períodos de operação, diferente dos trens diretos que se formam na origem e depois desagregam no destino.

Além de manter suas características originais como composição, este tipo de trem geralmente opera com um único tipo de produto, que é transportado a partir de poucos pontos de carga (às vezes apenas um) para também poucos destinos de descarga, caracterizando assim um ciclo de movimentação que se repete. Uma representação deste sistema está apresentada na Figura 2.7.

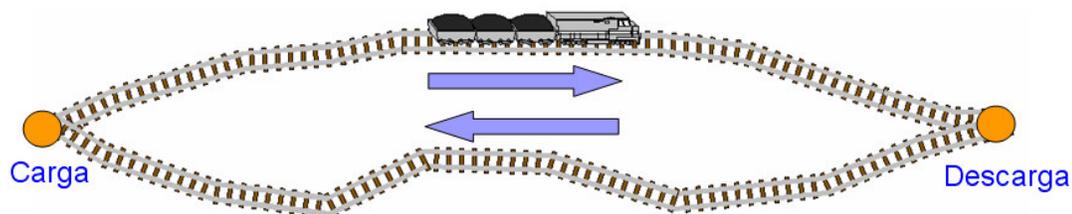


Figura 2.7 – Ilustração da operação de um trem de ciclo

Este tipo de operação traz muitas vantagens para o desempenho do sistema, como padronização dos equipamentos de carga e descarga e pouca ou nenhuma necessidade de manobras de formação, aliada a alta capacidade de transporte. Entretanto, os trens que operam de forma cíclica tem determinadas características que tornam sua operação peculiar:

2.3.1 – Interferências no Ciclo

Apesar das vantagens, a operação cíclica torna o sistema sensível a interferências, uma vez que problemas ocorridos em alguma parte do ciclo afetam o ciclo inteiro.

Por exemplo: se um equipamento de carga quebrar, haverá formação de fila de trens vazios aguardando o carregamento. Isso causará desabastecimento temporário no ponto de destino da carga. Quando esse equipamento for consertado, os trens voltarão a circular carregados e logo a seguir poderá haver fila na descarga, pois todos os trens chegarão em intervalos de tempo menores no destino. Este efeito irá se repetir durante algum tempo até que o espaçamento dos trens se torne maior e a cadência de transporte recupere seu estado normal.

O estudo deste comportamento requer uma ferramenta capaz de representar a formação de filas e medir o seu impacto no restante do sistema. Estudos que desprezem esse efeito podem incorrer em grandes imprecisões.

A complexidade do problema aumenta quando estes trens de ciclo circulam em uma malha onde há circulação de outros tipos de trens ou mesmo de outros trens de ciclo, provocando interferências entre si e alterando significativamente seu comportamento.

2.3.2 – Decisões de Direcionamento dentro do Ciclo

Em malhas maiores, o trem pode ter várias alternativas de terminais para carregar ou descarregar. Este fato torna necessário que o trem seja direcionado para o terminal mais adequado, segundo os critérios da empresa que

opera a malha (geralmente visando o melhor desempenho financeiro). Esta situação é ilustrada na Figura 2.8.

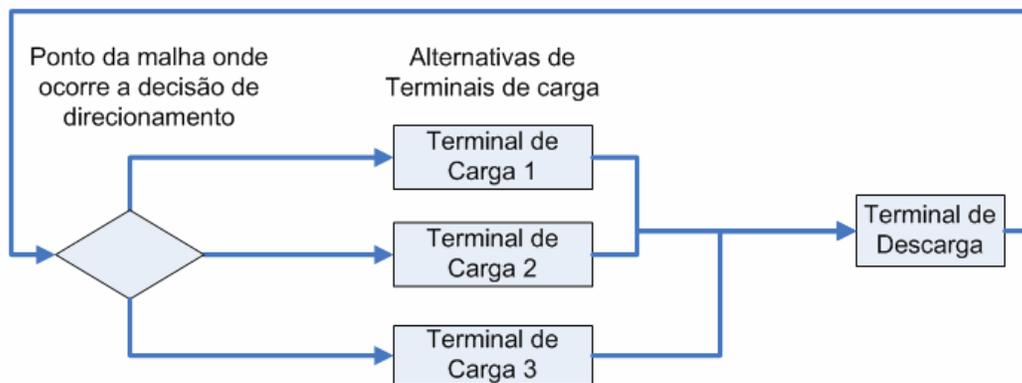


Figura 2.8 – Alternativas de direcionamento podem alterar o ciclo do trem

Tendo várias alternativas de caminho para completar o ciclo, este processo de decisão também interfere no ciclo como um todo.

Como agravante, o processo de decisão de direcionamento pode ser extremamente complexo. Geralmente é uma tarefa realizada por profissionais experientes na operação da malha, algumas vezes até se valendo de ferramentas computacionais capazes de sugerir a melhor opção de escolha de terminal. Estes casos dificultam a representação computacional do sistema em um modelo de simulação, visto que o modelo deve ser capaz de replicar esse processo de decisão adequadamente, sob pena de não apresentar um desempenho próximo do real.

As alternativas para a representação deste comportamento em um modelo computacional são discutidas a seguir.

2.4 – Representação do Direcionamento dos Trens

Conforme exposto anteriormente, a complexidade das decisões de direcionamento pode variar de uma malha para outra de acordo com a complexidade da própria malha. Malhas que possuem mais alternativas de

direcionamento tendem a necessitar de decisões mais complexas, em oposição a malhas mais simples que podem ter pouca ou nenhuma decisão envolvendo direcionamento. As alternativas que podem ser adotadas para representar o direcionamento dos trens na malha estão apresentadas a seguir, onde se discute também onde é mais adequada a sua implementação:

2.4.1 – Escolha Aleatória

Na escolha aleatória, é realizado um sorteio simples e sem tendência entre as alternativas de destino apresentadas.

Tem como principal vantagem a facilidade de implementação e também a velocidade de apresentação da resposta, já que a maioria das ferramentas de simulação de eventos discretos ou mesmo outras linguagens já possuem comandos específicos para a realização deste tipo de sorteio, e o tempo de resposta não difere do da execução de outros comandos presentes na linguagem.

A grande desvantagem da adoção da escolha aleatória é que ela tende a apresentar resultados muito diferentes dos reais quando a decisão envolve maior complexidade e depende de informações do sistema, como situações específicas da malha, tipo do trem, etc. Assim, ela é mais adequada para a representação da decisão em malhas mais simples, ou modeladas sem grande detalhamento.

2.4.2 – Lógica de Decisão Implementada dentro do Código do Modelo

Nesta opção, os fatores que levam à tomada de decisão são considerados pela programação do próprio modelo, resultando em uma escolha semelhante à que seria feita pelo sistema real.

O código de programação que cumpre esta tarefa é de complexidade variável, conforme a complexidade do próprio sistema. Algumas decisões podem ser bastante simples, como: “Vá sempre para o terminal A, mas se o terminal A está em manutenção, escolha o B”.

Em casos mais complexos que esse, em que vários fatores devem ser levados em consideração, propõe-se a elaboração de uma equação representativa contendo todos os fatores envolvidos na decisão (desde que sejam considerados na programação do modelo). O modelo de simulação então deve calcular esta equação para cada uma das alternativas e escolher a que resultar no maior valor.

As vantagens deste tipo de implementação são:

- Apresentar resultados muito melhores que a decisão simplesmente aleatória, em situações de maior complexidade;
- Pode ser implementada pelo próprio especialista em modelagem que está construindo o modelo, visto que este já domina a ferramenta sendo usada;

A principal desvantagem deste tipo de implementação é a dificuldade na elaboração da equação representativa. Normalmente é difícil determinar empiricamente o peso que cada fator tem na equação. Se os fatores receberem pesos incorretos, o modelo pode apresentar um desempenho pior, ou mesmo melhor que o sistema real. Ambas as situações são indesejáveis.

Outra desvantagem desta alternativa é que sua aplicação se torna inviável quando a quantidade de alternativas e fatores envolvidos torna o problema muito complexo. Nestes casos, sua implementação pode nem ser possível, ou ter um tempo de resposta excessivamente alto, visto que ferramentas de simulação de eventos discretos não são projetadas para resolver problemas de alta complexidade. Este tipo de situação pode ocorrer quando se deseja simular um sistema em nível operacional, quando muitos detalhes devem ser levados em consideração, elevando a quantidade de informação a ser avaliada para a tomada de decisão.

2.4.3 – Ferramenta Externa Acionada pelo Modelo de Simulação

Caso a complexidade do processo de decisão seja muito grande, pode-se desenvolver um modelo de otimização, usando-se ferramenta projetada para este fim. Neste caso, sempre que o modelo de simulação se deparasse com uma decisão, comunicaria todas as informações necessárias para o modelo de otimização, que executaria o processamento e informaria ao modelo de simulação qual a decisão tomada.

A vantagem desta alternativa é a capacidade de resolver praticamente qualquer problema de decisão que se apresente em um modelo, desde que seja possível representá-lo na ferramenta de otimização.

As desvantagens, porém, são as seguintes:

- Requer o uso de uma ferramenta externa de otimização, implicando em aquisição de outra ferramenta computacional e o investimento no seu aprendizado, ou na busca por um especialista já habilitado na mesma;
- Continua sendo necessário equacionar o problema e identificar a importância relativa que cada fator possui para a tomada de decisão;
- Necessidade de se desenvolver rotinas de troca de dados entre aplicações, que além do esforço de programação adicional, geralmente torna mais lenta a execução do experimento;
- Sua adoção em modelos de simulação que representem o sistema em nível estratégico e tático geralmente não apresenta vantagens em relação à alternativa anterior, visto que o nível de abstração dos modelos geralmente não comporta decisões muito complexas.

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo realiza um levantamento bibliográfico de estudos na área ferroviária, que tenham foco no estudo de seu desempenho, ou apoio a decisão em nível principalmente estratégico. Segundo Crainic & Laporte (1997), um estudo estratégico, ou de longo prazo, engloba toda a empresa e normalmente envolve o mais alto escalão da administração. As decisões estratégicas determinam o desenvolvimento geral da empresa e norteiam os planejamentos mais operacionais. Os autores ainda apresentam exemplos importantes deste tipo de planejamento em uma empresa ferroviária:

- Planejamento de implementação, expansão ou redimensionamento da malha física;
- Localização de instalações, como pátios ferroviários, terminais intermodais, etc;
- Aquisição de equipamentos, como locomotivas;
- Definição do frete a ser cobrado.

Neste mesmo estudo, os autores definem planejamento tático, ou de médio prazo, como aquele em que se distribui ou aplica mais racionalmente os

recursos já disponíveis na empresa. O planejamento operacional, ou de curto prazo, é descrito como sendo aquele realizado pelos administradores locais no dia a dia de cada instalação em um ambiente extremamente dinâmico e onde o tempo é um fator de grande peso nas decisões.

Na definição de Homer et al (1999), um estudo de nível estratégico é aquele que trata de problemas que ultrapassam os limites entre os departamentos da empresa e as variáveis em análise tem um alto nível de agregação, ou seja, são vistas de forma global, diferentemente de estudos mais operacionais onde o foco é a melhoria do processo de determinado trem ou certo trecho da malha ferroviária.

Segundo Camargo Júnior et al (1996), o planejamento de longo prazo, ou *Planejamento Estratégico* para uma rede ferroviária, envolve “a aquisição de equipamentos a longo prazo, alterações nas linhas da rede, expansão de pátios e escalonamento global, entre outras atividades”. Em distinção a este tipo de planejamento, os autores também descrevem o *Planejamento Tático* como sendo, entre outras coisas, a alocação de recursos já existentes e o escalonamento por composição, baseando-se na demanda de rotas e na capacidade da rede ferroviária. Já o *Planejamento Operacional* em uma rede ferroviária, segundo os autores, reflete o dia a dia da rede, abrangendo tabelas horárias, políticas de despacho, distribuição de carros vazios ao longo da via, escalonamento físico, entre outros.

A busca realizada mostrou que poucos trabalhos de foco estratégico para a área ferroviária foram desenvolvidos no Brasil recentemente, provavelmente reflexo do período de sucateamento ocorrido com este modal. Por outro lado, internacionalmente existem diversos trabalhos neste sentido. Os estudos encontrados foram classificados segundo o proposto por Petersen e Taylor (1982), que classifica modelos de análise de linhas ferroviárias em três categorias: descritivos (analíticos), simulação e otimização.

Foram procuradas especialmente referências sobre a aplicação de técnicas da simulação de eventos discretos em estudos de malhas ou linhas

ferroviárias. Também se buscou referências sobre a operação ferroviária em si e estudos que buscam seu aprimoramento através de outras técnicas diferentes de simulação, inclusive ferramentas comerciais específicas. Esta busca foi bastante favorecida pelo trabalho de Cordeau et al (1998) e Crainic & Laporte (1997), que realizam uma revisão dos principais trabalhos em otimização, sequenciamento e planejamento com foco em ferrovias.

A pesquisa permitiu constatar que os estudos de simulação de eventos discretos focando o modal ferroviário são bastante reduzidos em comparação a outros modais ou sistemas. Também foram encontradas poucas iniciativas dedicadas ao desenvolvimento de algoritmos com aplicabilidade geral na simulação de malhas ferroviárias. As soluções apresentadas são, em sua maioria, específicas para a linha ou malha em referencia no trabalho e a grande maioria dos estudos tem foco em uma única linha ou malha. O levantamento se estendeu às principais ferramentas de simulação no mercado ou acadêmicas, com foco em estudos ferroviários.

Os tópicos a seguir apresentam o resultado deste levantamento, e posteriormente analisam com maior detalhe aqueles mais relevantes para o presente estudo.

3.1 – Estudos usando modelos analíticos

Segundo Saad (1999), os modelos analíticos desenvolvem uma estrutura fechada ou expressões algébricas, e os resultados são encontrados resolvendo-se um conjunto de equações lineares. Tem como vantagem o fato de não exigirem grandes recursos técnicos ou computacionais. Sua aplicação é feita principalmente em estudos que buscam resultados operacionais.

Os trabalhos levantados nesta categoria são os seguintes:

- Artigo de Leal & Medeiros (1988). **Uma Abordagem para a Análise de Sequenciamento de Trens**. Mostram como a abordagem de Potthoff pode

ser usada para a análise do sequenciamento de trens. O artigo instrui sobre a elaboração de um gráfico representativo que estima os próximos movimentos do trem, dando subsídios para que o programador minimize as ocorrências de espera. Neste trabalho foi encontrada uma detalhada descrição sobre os procedimentos de movimentação de um trem pela via férrea;

- Artigo de Camargo Júnior et. al. (1996). **Modelos para Gerenciamento de Redes Ferroviárias**. Fazem uma explanação sobre os tipos de modelos gerenciais para redes ferroviárias, classificando-os entre estratégicos, táticos e operacionais, detalhando suas características principais. É apresentado um modelo operacional que usa programação linear para analisar uma linha ferroviária considerando linhas e pátios. Adotou-se, no presente estudo, a definição de planejamento estratégico apresentada por estes autores;
- Artigo de Kwon et. al. (1997). **Routing and scheduling temporal and heterogeneous freight car traffic on rail networks**. Desenvolve um método para avaliar o roteamento e sequenciamento de trens, através de um modelo matemático que analisa a malha ferroviária representada por uma rede tempo-espço. O modelo é capaz de apresentar a utilização dos trens, dado o sequenciamento a ser executado e regras de formação. É um estudo com foco bastante operacional, mas que busca considerar a malha como um todo;
- Artigo de Bessler e Fuller (2000). **Railroad wheat transportation markets in the central plains: modeling with error correction and directed graphs**. Fazem uso de séries temporais para analisar a evolução do preço de fretes ferroviários em diversas regiões dos Estados Unidos atendidas pela Union Pacific. O objetivo foi mostrar a influência de capacidade de estocagem e alternativas de transporte no preço do frete para a região. É um estudo sem propósitos de planejamento, mas sim de diagnóstico;

- Artigo de Homer et. al. (1999). **Evaluating Strategies to Improve Railroad Performance – A System Dynamics Approach.** Descreve o desenvolvimento de um modelo para planejamento estratégico de uma grande malha ferroviária norte-americana (CSX Transportation). O modelo foi elaborado com alto nível de agregação, ou seja, foram adotados indicadores globais sobre a malha em detrimento de informações mais localizadas, como trechos de malha específicos. O modelo considera estes fatores globais e apresenta os resultados em forma de indicadores financeiros, tornando fácil quantificar o impacto de mudanças no cenário simulado. Os autores apresentam ainda os possíveis usos futuros para o modelo. Entre estes, há a sugestão do uso como ferramenta de treinamento para gestores da malha ferroviária. Esta sugestão também se aplica ao modelo desenvolvido no presente estudo;
- Artigo de Park et. al. (1999). **The impact of railroad mergers on grain transportation markets: a Kansas case study.** Apresentam uma análise que o impacto da fusão entre companhias ferroviárias americanas tem no preço de produtos granulados originados do estado do Kansas. O estudo usa como ferramenta a análise de uma rede que representa os diversos pontos de origem e destino dos produtos, com seus diferentes modais de transporte representando as ligações entre elas. Cada alternativa de transporte (empresas em diferentes modais) foi considerada no modelo dos autores. É um estudo que busca encontrar a melhor alternativa modal/empresa para atender determinada demanda de transporte, um foco diferente do presente estudo, que busca alternativas de melhoria na operação de um único modal;
- Artigo de Dennis (1999). **Using spatial equilibrium models to analyze transportation rates: an application to steam coal in the United States.** Faz uma análise através de modelos de equilíbrio sobre o volume de carvão transportado nos Estados Unidos. O estudo foi desenvolvido de forma a ser

aplicado em outras áreas onde não existam dados confiáveis sobre o volume transportado, mas o custo de transporte esteja disponível. O trabalho tem similaridades com o presente estudo, pois seu objeto de análise é o transporte ferroviário de um granel (carvão) por uma malha semelhante à brasileira. Apesar disso, os autores não consideram em seus modelos o comportamento dos ciclos dos trens;

- Artigo de He et. al. (2002). **An integrated dispatching model for rail yards operations**. Apresentam o desenvolvimento de um sistema CAD (Computer Aided Dispatching, ou sistema de despacho auxiliado por computador). O sistema se baseia primariamente em programação linear para buscar a melhor alocação de linhas para desmembramento e formação de trens em um pátio ferroviário. É um estudo que tem foco bastante específico neste único problema sendo, portanto uma ferramenta com horizonte operacional;
- Artigo de Arnold et. al. (2003). **Modeling a Rail-Road Intermodal Transportation System**. Apresentam um estudo para a localização ótima de terminais intermodais rodo-ferroviários, usando programação linear. O estudo tem horizonte estratégico e busca determinar a melhor localização dos pontos de transbordo intermodal de carga, visando minimizar o custo do transporte. Apesar de ter um foco diverso ao do presente estudo, os autores descrevem uma abordagem para o planejamento de experimentos que pode ser aplicada em qualquer análise envolvendo modelos;

3.2 – Estudos usando modelos de simulação

Segundo Banks et. al. (1996), a disponibilidade de linguagens computacionais especializadas em estudos de simulação, o crescimento na capacidade computacional e na metodologia de simulação, tornaram esta uma das ferramentas mais difundidas e bem aceitas no ramo da pesquisa operacional. Ainda segundo Banks, a simulação é a ferramenta adequada quando se necessita

estudar e fazer experimentações com as interações entre elementos de um sistema complexo, experimentar novas políticas de operação antes de sua implementação, ou mesmo para verificar e confirmar o resultado de estudos analíticos. Saad (1999) afirma que os modelos de simulação tem a vantagem de poder incluir grandes detalhes e estudar o comportamento transitório do sistema.

Foram analisados os seguintes estudos, que tem como base a simulação de eventos discretos:

- Artigo de Krueger et al (2000). **Simulation within the Railroad Environment**. Não apresenta um estudo, mas relaciona os principais tipos de estudo ferroviário usando simulação, os desafios e dificuldades de sua implementação, e os principais benefícios obtidos neste tipo de estudo. São abordados modelos de sequenciamento e despacho e também modelos voltados para estudos estratégicos. Os autores ressaltam que o principal risco para o fracasso deste tipo de estudo é a carência de dados ou o uso de dados incorretos, que pode impedir a validação do sistema ou mesmo levar a decisões errôneas de planejamento.
- Artigo de Pater & Teunisse (1997). **The use of template-based methodology on the simulation of a new cargo track from Rotterdam Harbor to Germany**. Usam o desenvolvimento de um projeto de simulação como veículo para apresentar uma metodologia de estudos de simulação usando templates. O projeto descrito tem por objetivo responder se a capacidade da malha ferroviária holandesa seria capaz de atender a demanda prevista para 2010. Apesar de usar simulação para um estudo de ferrovia, o trabalho tem foco no transporte de passageiros, e por uma malha bastante diferente da encontrada no Brasil e outros países de extensão continental. O trabalho faz um detalhado esclarecimento sobre o que é um Template e como pode ser aplicado em uma simulação de ferrovia;

- Artigo de Hooghiemstra & Teunisse (1998). **The use of Simulation in the Planning of Dutch Railway Services**. Descrevem o desenvolvimento e uso de um simulador especialmente desenvolvido para a malha ferroviária holandesa, com foco principalmente no teste e avaliação da grade de trens (timetable), e o impacto de mudanças no restante da operação da linha. Este trabalho é uma continuação ou evolução do apresentado por Pater & Teunisse (1997), cujos principais aprimoramentos foram a maior integração com a base de dados da empresa e um foco mais intenso na avaliação da pontualidade dos trens, característica importante no transporte de passageiros. Tais aprimoramentos tornaram o trabalho ainda mais distinto do presente estudo. Aqui os autores tecem comentários adicionais sobre as vantagens do uso de templates na modelagem de ferrovias, como a maior rapidez de modelagem e a possibilidade de uso da ferramenta por usuários pouco experimentados;
- Artigo de Middelkoop & Bouwman (2001). **Simone: Large Scale Train Network Simulations**. Os autores descrevem mais uma evolução da ferramenta apresentada por Pater & Teunisse (1997) e Hooghiemstra & Teunisse (1998). Neste novo aprimoramento, a ferramenta de simulação dedicada à rede ferroviária holandesa é capaz de ler de um banco de dados todas as informações sobre a malha e construir de forma automatizada o modelo de simulação correspondente, incluindo sua animação, usando para isso a funcionalidade dos templates já descritos nos artigos anteriores. As funcionalidades apresentadas (integração com um banco de dados central e construção automatizada de modelo) são possibilidades de evolução interessantes também para o presente estudo;
- Artigo de Carr & Wei (1997) **Million Dollar Logistic Decisions using Simulation**. Desenvolveram um modelo de simulação específico para determinadas operações de transporte ferroviário realizadas no estado norte-

americano da Flórida. O modelo considera o uso da frota de vagões e tripulação, sem considerar o tipo de produto. O transporte é realizado entre dois pontos: o primeiro para carregamento e o outro, descarregamento. Uma importante similaridade do trabalho com o presente estudo é a conservação dos vagões dentro do sistema. Apesar disso, estes vagões não formam composições fixas que possam caracterizar um trem de ciclo, e o modelo não representa nenhuma característica de circulação da malha, contando apenas o seu tempo de movimentação baseado em histórico da operação;

- Artigo de Lewellen & Tumay (1998). **Network Simulation of a Major Railroad**. Descrevem uma ferramenta de simulação especialmente desenvolvida para as operações da norte-americana Union Pacific Railroad, com o objetivo de avaliar estrategicamente o impacto de investimentos em diversos aspectos da malha. O modelo descrito conta com regras simples de circulação, mas que são capazes de representar a interferência entre trens que circulam pela mesma linha. O modelo gera trens que requisitam os elementos necessários à sua formação, como tripulação e locomotivas, sendo atrasados ou cancelados caso não estejam disponíveis, permitindo mensurar e dimensionar tais elementos. Uma vez alocados os recursos, o trem parte para o destino e, ao chegar, faz a operação inversa, disponibilizando novamente os recursos para a malha. Portanto, o modelo faz uso apenas dos trens do tipo direto, não constituindo um ciclo;
- Artigo de Dalal & Jensen (2001). **Simulation Modeling at Union Pacific Railroad**. Apresentam três estudos de simulação realizados na rede ferroviária do título: ocupação de um pátio por composições, avaliação da escala de trabalho das equipes dos trens e avaliação do plano estratégico de transporte da empresa usando o mesmo modelo apresentado por Lewellen & Tumay (1998). O primeiro estudo, referente ao pátio, descreve um conceito útil para a representação de uma linha ferroviária. A linha é representada

como um recurso do sistema e tem sua capacidade limitada. Essa capacidade é reduzida quando a linha é ocupada por um trem, interferindo na movimentação de outro trem de forma semelhante ao que acontece na malha real;

- Artigo de Cook et. al. (1999). **Key Factors in Road-Rail Mode Choice in India: Applying the Logistic Cost Approach**. Apresenta o estudo realizado pela empresa Indiana Indian Railways que, frente a um cenário de competição com o modal rodoviário, foi levada a desenvolver um sistema de suporte a decisão baseado em simulação. Os resultados de uma pesquisa foram usados para associar pesos aos fatores principais a serem considerados na tomada de decisão. Apesar de ser uma simulação essencialmente financeira, apresenta uma interessante tabela com o peso de cada um dos fatores-chave em um estudo ferroviário;
- Artigo de Julich et. al. (1999). **Evaluating the Potential Benefits of a Rail Traffic Movement Planning Algorithm**. Avaliam através de simulação, o impacto da implementação do sistema PTC (Precision Train Control) nas linhas principais da malha da empresa norte-americana CSX Transportation. Segundo as próprias palavras dos autores, os experimentos realizados simulam “um dia na vida de uma ferrovia”, o que evidencia o caráter operacional do estudo. Seu objetivo na busca do melhor planejamento de movimentação dos trens tem similaridade com os de Nunes (2004), Julich et al (1999) e Higgins et al (1996), mas a ferramenta usada aqui é a simulação de eventos discretos;
- Tese de Mestrado de Jorge Antônio Cury Saad (1999). **Modelo para Análise de Trechos Ferroviários em Linha Singela**. Desenvolve um modelo estocástico capaz de representar dinamicamente o comportamento do fluxo de trens sobre uma linha singela. O modelo considera estações e velocidade dos trens, movimentando-se em uma única linha sem

ramificações. Ele é capaz de medir a utilização média de cada estação e o tempo de espera médio dos trens em cada pátio. O autor descreve as regras de movimentação que devem ser seguidas pelo modelo para se evitar ocorrências de bloqueio na linha. Tais regras são adequadas para linhas singelas sem sinalização, e foram adotadas pelo presente estudo na representação deste tipo de linha;

- Artigo de Kulick & Sawyer (2001). **The use of Simulation to Calculate the Labor Requirements in an Intermodal Rail Terminal.** Apresenta um estudo de caso realizado com simulação de eventos discretos em um terminal intermodal rodo-ferroviário, cujo foco foi o dimensionamento dos equipamentos e pessoal necessário para sua operação. Os autores descrevem um método para a geração dos trens dentro do modelo de simulação usando o horário programado para a partida, sua origem e destino, e o horário programado para chegada. Este método foi adotado no presente estudo para a representação dos trens diretos, com algumas modificações;
- Artigo de Dessouky et. al. (2002). **Using Simulation Modeling to Assess Rail Track Infrastructure in Densely Trafficked Metropolitan Areas.** Analisam através de simulação de eventos discretos uma malha ferroviária urbana. Os parâmetros de entrada para experimento são os tipos de trem, capacidade das linhas e escala dos trens. O resultado principal é o tempo de espera dos passageiros pelos trens, o qual se busca minimizar. O estudo simplifica o problema assumindo que apenas um trem pode parar em cada segmento da linha (trecho entre dois pátios de cruzamento, denominados nós da malha). Apesar de mais simples e direcionado ao estudo de uma malha urbana, o trabalho contribui para o presente estudo com a premissa de que os segmentos entre pátios sempre serão maiores que o tamanho de qualquer trem. Esta premissa também foi adotada no trabalho desta Tese, pois em

malhas como a brasileira, os pátios de cruzamento são geralmente bastante distantes entre si, e raramente um trem será maior que a distância entre eles.

- Artigo de Rizzoli et. al. (2002). **A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals**. Apresentam uma ferramenta de simulação para o estudo de um sistema composto por vários terminais intermodais interligados por uma rede rodo-ferroviária. As entradas do sistema são as frequências de chegada de cargas via caminhão nos terminais, e a grade horária dos trens. O modelo foi construído usando-se conjuntos de código lógico representando os elementos mais comuns do sistema, como a chegada de trens e chegada de caminhões no terminal. Esses conjuntos de código funcionam da mesma forma que os Templates descritos no capítulo 1, mas foram projetados especificamente para modelar terminais intermodais. O estudo simplifica bastante a representação do movimento dos trens, usando apenas uma espera, e estuda em mais detalhes o desempenho dos terminais em si;
- Artigo de Guttkuhn et. al. (2003). **A Discrete Event Simulation for the Crew Assignment Process in North American Freight Railroads**. Apresenta um estudo de simulação realizado com foco na movimentação e escalonamento das tripulações dos trens. A movimentação e tráfego de trens são representados de forma bastante simplificada, mas o detalhamento das atividades relativas às tripulações é considerado com grande quantidade de fatores. É um trabalho que analisa aspectos diferentes da malha em relação ao presente estudo, o qual também considera a influência das tripulações, mas apenas como um tempo de espera de atividade do trem em determinados pátios;
- Dissertação de Mestrado de Giselle de Moraes Ramos (2003). **Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos**. Realiza um estudo de impacto de tráfego ferroviário na

rede da baixada santista, usando um modelo de simulação de eventos discretos. O modelo descrito usa a mesma ferramenta de simulação adotada no presente estudo (Arena) e as estruturas de modelagem usadas são perfeitamente aplicáveis em outros modelos de ferrovia. Entretanto, o modelo foi construído especificamente para a malha do estudo, não sendo adequado para reaproveitamento do código em outras malhas;

- Artigo de Fioroni et al (2004). **Estudo Estratégico de Dimensionamento da Infra-Estrutura do Pátio Ferroviário de Tubarão através de Simulação.** Apresentam um estudo de pátio ferroviário usando simulação de eventos discretos. O estudo teve como objetivo avaliar determinadas expansões a serem feitas nas linhas do pátio. Foi construído um modelo representando o sistema atual e as expansões planejadas foram adicionadas uma a uma, com os resultados da simulação sendo comparados com os do sistema real atual. A modelagem do pátio foi feita usando-se recursos de capacidade limitada para as linhas de estacionamento, e também para a capacidade de atendimento das diversas instalações de carga ou descarga de vagões;

3.3 – Estudos de otimização

Os estudos de otimização buscam encontrar a melhor configuração dos parâmetros de ajuste em um sistema, para atender a um determinado objetivo. Essa configuração é denominada o “ótimo”. Segundo Saad (1999), sua aplicação mais freqüente em estudos ferroviários tem sido na realização de estudos de programação de trens, buscando otimizar algum critério, como capacidade, atraso, etc.

Modelos de otimização ferroviária, segundo Leilich (1998), apesar de serem capazes de extrair o melhor desempenho do sistema, geralmente não são capazes de representar eventos específicos de trânsito, interdependência entre trens, nem eventos aleatórios. Foram levantados os seguintes estudos que buscam

otimizar aspectos do tráfego ferroviário através de alguma heurística ou meta-heurística:

- Artigo de Assad (1982). **A Class of Train-Scheduling Problems**. Aplica o algoritmo “guloso” para solucionar o problema de sequenciamento de paradas de trens percorrendo uma linha. Esse algoritmo, segundo os autores, apresenta a solução ótima desde que se assumam como premissas que o sistema não tem aleatoriedade nos tempos de movimentação. O modelo estuda o problema para um único trem e para dois trens. Apesar de focar em um problema bastante simplificado, fornece ponto de partida para estudos mais complexos. Trata-se de um estudo com aplicação em nível operacional;
- Artigo de Higgins, et. al. (1996). **Optimal scheduling of trains on a single line track**. Apresentam uma ferramenta computacional desenvolvida com a finalidade de analisar especificamente um trecho de linha singela. Usando a meta-heurística de “branch and bound”, a ferramenta é capaz de aperfeiçoar a escala de trens que irá usar a linha, servindo também para analisar o impacto de mudanças na grade. O estudo de caso apresentado foi feito usando-se um trecho da malha ferroviária Australiana, que possui similaridades com a malha brasileira, como grandes extensões de linha e tráfego principalmente de trens de carga;
- Artigo de Martinelli, et. al. (1996). **Optimization of railway operations using neural networks**. Com foco na formação de trens, os autores apresentam um algoritmo que busca aperfeiçoar o processo, por meio de redes neurais. São consideradas as movimentações de blocos de vagões vazios e carregados. Um experimento foi realizado usando uma pequena rede com seis pátios, comprovando que a rede neural identifica corretamente as restrições e a função objetivo do sistema, alcançando uma solução ótima, ou próxima do ótimo. Apesar da eficiência apresentada na solução do problema, esta técnica encontra obstáculos no estudo de sistemas ainda não existentes,

pois haveria dificuldade em se treinar a rede. É uma ferramenta com boa aplicação em nível operacional;

- Artigo de Nachtigall & Voget (1996). **Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks.** Apresenta um modelo matemático que busca minimizar, através de uma heurística híbrida com algoritmo genético e algoritmo de lógica fuzzy, o problema do tempo de espera de passageiros mudando entre trens. O estudo identifica quais os trechos de linha potencialmente mais interessantes para expansão, sob o aspecto do tempo de espera dos passageiros pelos trens. É um estudo que apresenta resultados em nível estratégico, visto que pode auxiliar na decisão de investimentos a serem feitos na malha. Um interessante complemento deste trabalho seria simular o seu resultado usando uma ferramenta de simulação de eventos discretos, como a apresentada no nesta Tese, o que permitiria confirmar ou refinar seus resultados;
- Dissertação de Mestrado de Cássio Fernando Rosseto (1997). **Modelo para Programação de Despachos de Trens em Vias Singelas.** Apresenta um modelo computacional que busca aperfeiçoar a solução de conflitos de circulação de trens. Um caso prático do estudo é aplicado na Ferrovia de Carajás, onde o modelo foi integrado a uma ferramenta de simulação desenvolvida especialmente para esta linha, denominada SIMCAR. O modelo descrito tem algumas premissas de funcionamento que o tornam menos flexível para a modelagem de outras malhas. Uma delas é a restrição de só permitir a parada de um único trem nos trechos de linha entre pátios. O modelo de simulação é usado para verificar a eficácia do algoritmo de otimização aplicado e representa as regras de movimentação em grande nível de detalhe, como as prioridades de cruzamento entre trens;
- Dissertação de mestrado de Liége Marcela Firmino Murgel (1998). **Modelo para Formação de Composições Ferroviárias.** Apresenta uma heurística

própria para resolver o problema de formação de composições ferroviárias, considerando vagões vazios, vagões carregados e locomotivas. Um experimento foi realizado em um caso real da FEPASA. O trabalho considera, entre outros, os trens de ciclo fechado, denominados “trens unitários”. Entretanto, o resultado do trabalho é bastante distinto do presente estudo, tendo aplicação em horizonte operacional;

- Artigo de He et. al. (2000). **Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards operations**. Propõem uma combinação híbrida das metaheurísticas Algoritmo Genético e Lógica Fuzzy, para solucionar o problema de formação de trens em pátios ferroviários. Os resultados do algoritmo foram comparados com os obtidos por He et al (1998), onde exatamente o mesmo problema foi resolvido usando apenas o algoritmo genético. Na comparação, se confirmou o melhor desempenho da abordagem sugerida pelos autores;
- Artigo de Matsuba & Namatame (2002). **Scaling behavior in urban development process of Tokyo City and hierarchical dynamic structure**. Fazem um estudo do crescimento de Tóquio através de um algoritmo com meta heurística simulated annealing, tomando como referência a malha ferroviária construída. A meta heurística não é usada para otimizar o sistema, mas sim para reproduzir o comportamento de crescimento da cidade sob a influência de seu sistema de transporte. Apesar de adequado no estudo da cidade de Tóquio, este método não se aplica diretamente em outros grandes centros, como São Paulo, em que o crescimento da malha ferroviária permaneceu estagnado por vários anos mas não conteve o crescimento explosivo da metrópole.
- Artigo de Ahuja et. al. (2002). **Solving Real-Life Locomotive Scheduling Problems**. Abordam o problema de distribuição / alocação de locomotivas em uma malha ferroviária, para atender aos diversos trens em formação ou

manobra. Foi utilizada uma formulação com programação inteira mista para representar o problema e, diante da grande quantidade de variáveis, foi aplicada decomposição do problema, programação inteira e busca em vizinhança em larga escala para encontrar uma solução ótima ou próxima do ótimo. Um caso real da CSX Transportation americana foi avaliado com esta técnica e seus resultados apresentaram grandes melhorias em relação ao realizado pelos operadores da malha;

- Dissertação de mestrado de Luciana Silveira Netto Nunes (2004). **Sistema de Apoio à Decisão ao Centro de Controle Operacional no Gerenciamento do Tráfego Ferroviário**. Apresenta uma ferramenta que busca minimizar o tempo de espera em cruzamentos em uma via singela, servindo como apoio para a equipe de despachadores do centro de controle operacional. O algoritmo aplicado é uma variação do “branch-and-bound”, e foi aplicado experimentalmente em dois trechos de linha singela da malha da MRS Logística. Os experimentos realizados mostraram que a técnica é eficiente na resolução de conflitos;
- Artigo de Leal et. al. (2004). **Uma Abordagem Heurística para o Problema de Programação de Trens em Linhas Singelas**. Apresenta uma aplicação real da ferramenta apresentada por Nunes (2004). Segundo os autores, o resultado da ferramenta é significativamente mais eficiente que o planejamento feito pelos despachadores reais. Entretanto, constata-se pelos gráficos apresentados que muitas situações de parada ocorrem por motivos não relacionados ao trânsito (provável reabastecimento ou troca de tripulação). Mas estas paradas são contabilizadas no trabalho como se fossem atrasos ou erros dos despachadores reais, o que tende a ampliar artificialmente o resultado da ferramenta. Conclui-se, portanto, que a ferramenta cumpre boa parte da tarefa a que se propõe, mas carece ainda de algum aperfeiçoamento para ser usada em uma situação real;

- Capítulo de livro de Ahuja et. al. (2004). **Network Models in Railroad Planning and Scheduling**. Os autores apresentam soluções para alguns dos principais problemas encontrados na operação de uma malha ferroviária: formação de trens, localização de pátios, programação de trens, programação de locomotivas, despacho e programação de equipagem (tripulação). Todos os problemas recebem soluções com programação matemática linear e inteira, com a descrição dos algoritmos usados. Todos os problemas abordados são de nível essencialmente operacional, para decisões de curto prazo. Os resultados das soluções propostas poderiam ser testados com uma ferramenta de simulação de eventos discretos, como a apresentada nesta Tese, avaliando sua aplicação quando o sistema sofre as interferências e variabilidade inerentes ao processo real;

3.4 – Trabalhos mais relevantes

Será feito inicialmente um descritivo dos trabalhos realizados em território nacional. Dos trabalhos pesquisados, destaca-se o estudo feito por Saad (1999), que realiza a simulação estocástica de uma linha singela não sinalizada e com capacidade unitária nos pátios de cruzamento. As pontas da linha são representadas por pátios com capacidade infinita. O modelo foi construído de forma a representar rigorosamente o movimento dos trens, respeitando as paradas em pátios de cruzamento, e também introduzindo eventos aleatórios que provocam atraso no movimento do trem (como manutenções, interferências climáticas, etc.), tornando-o mais próximo da realidade. Entretanto, é um estudo limitado ao ambiente em que foi feito o experimento (um trecho de linha da FEPASA no interior do estado de São Paulo), que não apresenta variações em sua estrutura. O tipo de circulação dos trens também se limita ao tipo origem-destino, ou trens diretos, cuja característica é serem formados na origem e desagregados no destino, não realizando um ciclo.

O trabalho realizado por Ramos (2003) mescla operações que envolvem trânsito nas linhas e também atividades típicas de um pátio de manobras. No modelo estocástico usado para estudar as operações ferroviárias no Porto de Santos, estado de São Paulo, foram representados todos os pátios com suas respectivas capacidades, linhas duplas, linhas singelas e entroncamento de linhas. O trânsito dos trens pela malha foi rigorosamente representado, inclusive a requisição e movimento de locomotivas. Neste último caso, o modelo apresenta uma imprecisão quanto ao tempo de atendimento das locomotivas, já que a composição faz o chamado no momento em que ela é necessária, deixando-a liberada no local após o seu uso. No sistema real, em quase todos os casos, os despachadores sabem de antemão onde a locomotiva será necessária, e comandarão o seu movimento para o local antecipadamente. Assim, raramente haverá tempo de espera pela locomotiva se a frota for bem dimensionada. É um modelo construído especificamente para estudar a malha ferroviária que atende o Porto de Santos.

Medeiros (1989) adaptou um modelo existente (Petersen-Taylor) para o ambiente brasileiro, resultando em um estudo semelhante ao de Saad (1999), também de linha singela, mas considerando particularidades sobre o layout de cada pátio. O estudo de caso foi realizado em uma parte da malha atualmente sob concessão da MRS Logística, abrangendo o trecho iniciado no pátio “Dias Tavares” e encerrando no Pátio “Recenvindo”, totalizando 7 pátios de cruzamento.

O trabalho realizado por Amaral (1991) tratou da construção de um modelo que representa uma linha fictícia singela com 13 pátios, sendo que os pátios das pontas têm capacidade infinita. O estudo é semelhante aos de Saad e Medeiros, mas tem como adicional a possibilidade de tratar uma capacidade maior para os pátios de cruzamento, onde pode haver até 4 linhas de passagem nos pátios de maior capacidade. Segundo o autor, o sistema desenvolvido permite,

com a alteração de parâmetros, representar qualquer outra linha singela. Um estudo de caso foi feito em um trecho da malha atualmente sob concessão da FCA, que se inicia no pátio Divinópolis e termina em Garças de Minas.

Constata-se que os trabalhos nacionais que versam sobre o tema se restringem a análises de trechos isolados e razoavelmente uniformes. Em todos os casos, não é adotada a conservação de trens, ou seja, os trens são criados em uma ponta da linha e desaparecem no extremo oposto. No cenário internacional, foram identificados trabalhos bem mais complexos e ambiciosos, em grande parte originados no ambiente corporativo, demonstrando que o tema é considerado importante pelas empresas. Entre estes, destacam-se os apresentados a seguir.

Lewellen & Tumay (1998) apresentam um simulador de malhas ferroviárias construído com a ferramenta comercial (linguagem) de simulação MODSIM III. O simulador foi especificamente desenvolvido para a malha da americana Union Pacific Railroad, e tem foco principal no dimensionamento das frotas de vagões e locomotivas, e também de tripulações. A malha representada é toda singela e as regras de movimentação são simplificadas. Os trens não obedecem ciclo fechado, sendo formados na origem e desagregados no destino. Entretanto, o modelo suporta seções de bloqueio em linhas sinalizadas, permitindo que mais de um trem entre na linha obedecendo a um espaçamento pré-determinado.

Através da sequência de trabalhos de Pater & Teunisse (1997), Hooghiemstra & Teunisse (1998) e Middelkoop & Bouwman (2001) pode-se acompanhar a evolução de uma mesma ferramenta para simulação de ferrovias nomeada de SIMONE, feita para atender às necessidades da complexa malha ferroviária da Holanda. A ferramenta foi desenvolvida sob o conceito de templates, e inicialmente considerava as movimentações com alto nível de abstração, ou seja, os problemas de tráfego ou cruzamento nas linhas eram representados dentro do tempo de percurso do trem e não provocados pela

interação com outros trens do modelo. De um estudo inicial específico para uma nova linha ferroviária ligando a Holanda à Alemanha, o sistema evoluiu até ser capaz de representar malhas complexas, contando inclusive com acesso ao banco de dados da empresa para simular as grades horárias e cenários de modificação da infra-estrutura. No entanto, a ferramenta foi projetada para representar malhas extremamente capilarizadas e com grande quantidade de interligações. É um tipo de malha bastante diferente das encontradas em países com grandes extensões territoriais, como o Brasil, Canadá ou Estados Unidos. Seu foco de estudo também é diferente, mais voltado ao tráfego de trens de passageiros, onde a pontualidade é o principal fator a ser alcançado. Neste sistema, também não há conservação de trens, que são formados nos horários da grade e depois desagregados quando chegam ao destino.

No trabalho divulgado por Julich et. al. (1999), o objetivo foi desenvolver um modelo que avaliasse o impacto da aplicação de uma ferramenta de planejamento de despacho denominada “PTC – Precision Train Control”, a qual é capaz de otimizar a utilização dos recursos da malha. Para isso, foi construído um modelo de simulação matemático representando a malha da CSX Transportation com alto nível de abstração, ou seja, foram representadas as linhas e pátios principais da malha. A simulação tem horizonte de 1 a 2 dias apenas. Não usa eventos estocásticos e os trens não são conservados no sistema. Seu uso é mais voltado a situações operacionais.

3.5 – Ferramentas comerciais de simulação ferroviária

A seguir, buscou-se relacionar as principais ferramentas comerciais de simulação ou avaliação de operações ferroviárias. Não foram incluídas as ferramentas de simulação de eventos discretos com foco genérico (linguagens de simulação).

- **MultiRail Freight Edition version 3.0:** Como informado em sua documentação (Multimodal Apl. Sys. Inc., 2001), o Multirail é uma ferramenta para a elaboração de planos de operação e análise do impacto das alterações nestes planos. Entre seus recursos, oferece um ambiente de criação de planos, considerando manutenção de trens, tamanho das composições, níveis de tráfego, programação dos carros e toda a malha ferroviária. Através deste sistema, é possível avaliar as conseqüências da mudança em tempos de chegada, condições de tráfego, entre outros. O software também oferece ferramentas gráficas de análise, com criação de gráficos tempo-espaço. O fabricante oferece uma suíte de ferramentas que se integram ao Multirail. Entre eles está um módulo voltado especialmente ao estudo de trens de passageiros (Multirail Passenger Edition), e um editor-simulador de linhas ferroviárias, o Fast Track II, que será analisado a seguir. É uma ferramenta com foco no planejamento tático e também operacional. Um estudo bastante elaborado foi conduzido por Ireland et al (2003) usando esta ferramenta em um caso da Canadian Pacific Railway. Também no caso desta ferramenta, não é possível representar trens de ciclo.

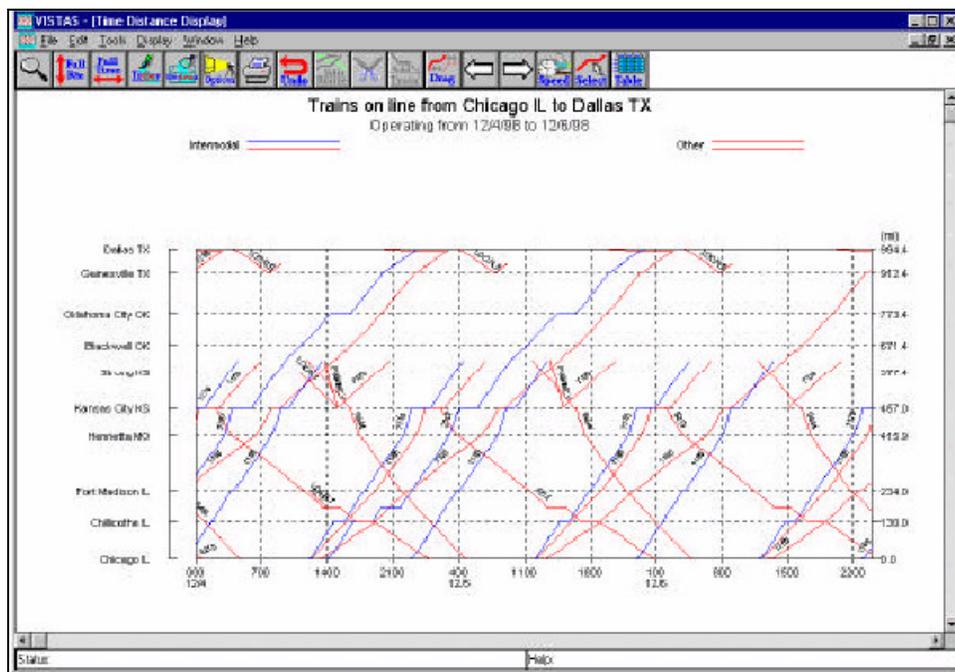


Figura 3.2 – Uma das janelas do Multirail

- **Fast Track II:** Componente da suíte em que faz parte o Multirail (Multimodal Apl. Sys. Inc., 2001), é uma ferramenta para análise de capacidade e passagem em malhas ferroviárias. Permite a construção de toda a linha considerando os pontos de passagem e os pátios. Uma vez construída a malha, é possível testar planos de despacho, ou mesmo aproveitar a malha no Multirail. Esta ferramenta permite o estudo de cenários de investimento em pátios de cruzamento e seu impacto em determinados planos de despacho. Mas como é projetado para suportar simulações com horizonte de dias, não é adequado para estudos estratégicos. Assim como o Multirail, o Fast Track II também não dá suporte a trens cíclicos.

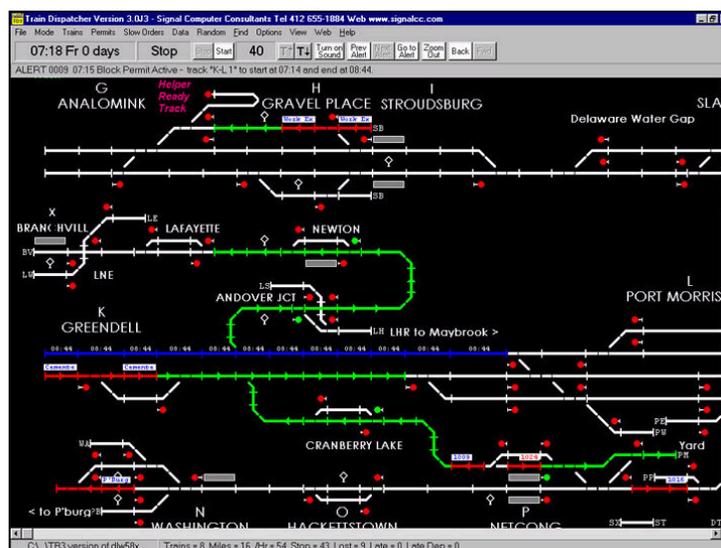


Figura 3.3 – Uma das janelas do Fast Track II

- **Train Dispatcher 3:** Como o próprio nome indica, trata-se de uma ferramenta para simulação de operações de despacho. Permite controlar as operações de cada composição sobre a malha incluindo atuação sobre a sinalização. Apesar de eficiente no treinamento da prática de despacho, é limitado para realizar estudos estratégicos ou táticos. Entre outras limitações, permite simular apenas 90 dias de operação, e também não suporta trens de ciclo que são conservados dentro do sistema (Signal Computer Consultants, 2000).

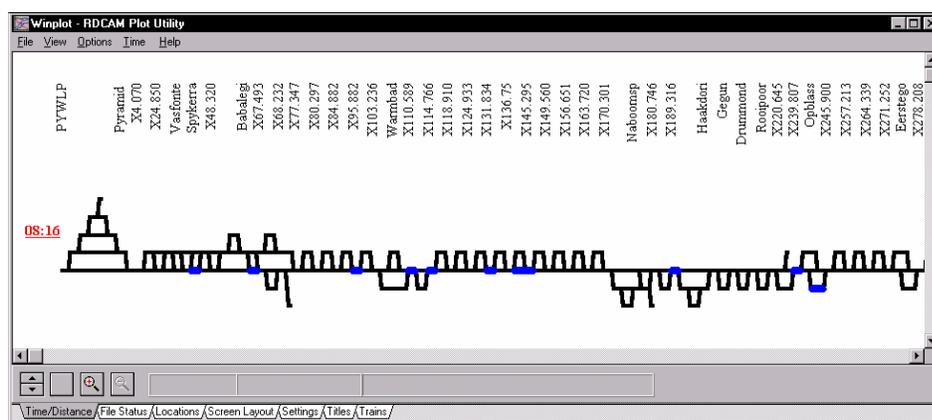


Figura 3.4 – Janela do Train Dispatcher 3

- **Track Builder 3:** O Track Builder é uma ferramenta de construção de malhas ferroviárias. Possui recursos para reproduzir redes bastante complexas, mas não é capaz de simular a malha. Para isso, o usuário deve abrir a malha construída no Train Dispatcher, descrito anteriormente. Apesar de serem ferramentas distintas, podem atuar em conjunto como uma suíte de softwares. (Signal Computer Consultants, 2000).

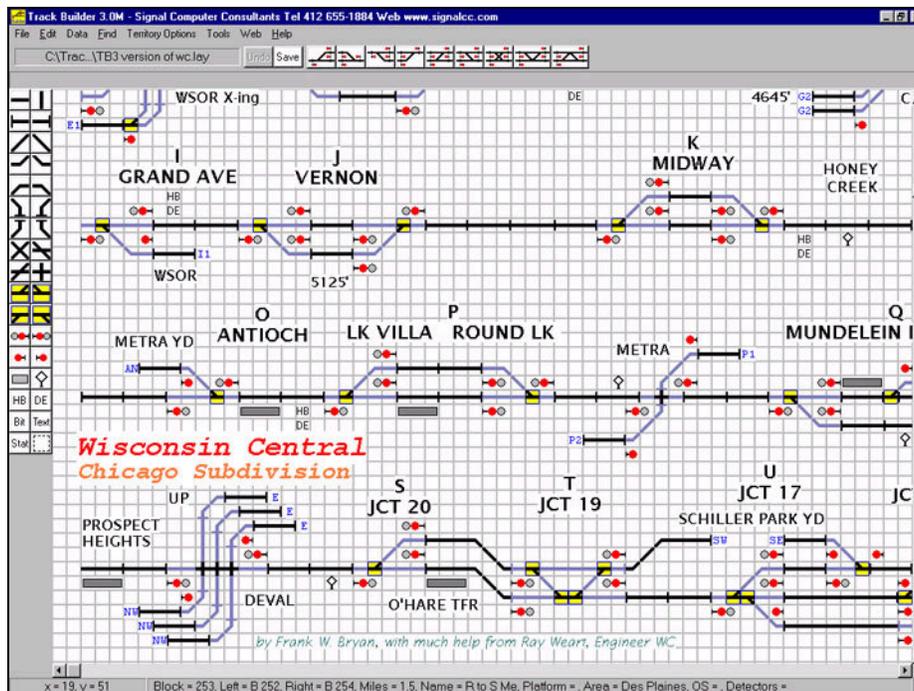


Figura 3.5 – Janela do Track Builder

- PC Rail:** Conjunto de simuladores específicos para determinadas malhas ferroviárias previamente configuradas, a maioria britânicas. Permite simular operações de despacho sob diversas condições e atuar sobre o sistema durante a execução. Apesar de representar com eficiência as operações de despacho, é vendido como um jogo (Rail Operations Simulations, 2002). A limitação da simulação com malhas previamente construídas limita o seu uso em malhas diferentes, ou mesmo nas mesmas malhas depois de certo tempo, caso sejam feitos investimentos ou modificações na infra-estrutura. O sistema também não representa trens de ciclo.

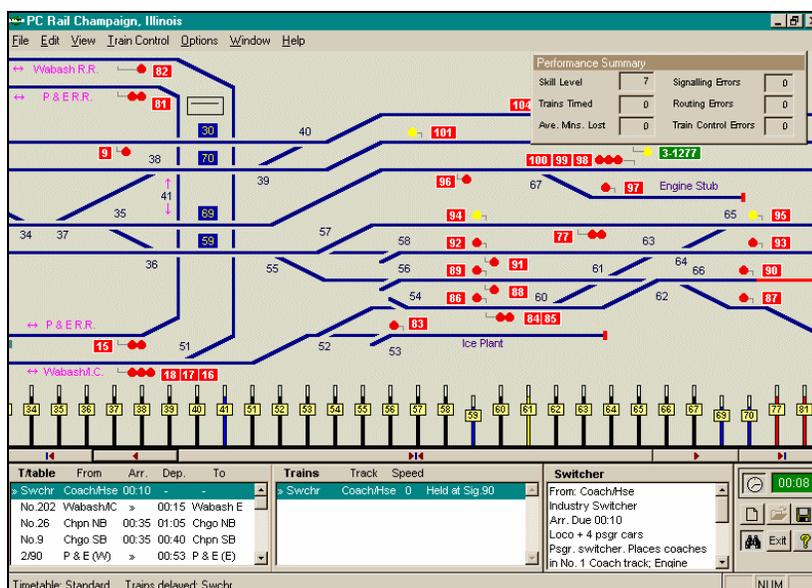


Figura 3.6 – Interface do PC Rail

- **SimCar**: Simulador elaborado pela CVRD especificamente para simular a Estrada de Ferro de Carajás. Não possui interface animada, mas apresenta gráficos de tempo-espço e permite a realização de diversos tipos de estudos, como dimensionamento da frota, priorização de cruzamentos, programas de despacho e outros (Rosseto, C. S., 1997).

De um modo geral, constatou-se que as ferramentas existentes tem foco principalmente operacional, não sendo projetadas para estudos estratégicos. Tal necessidade geralmente é atendida por estudos específicos, conforme se pôde constatar na pesquisa bibliográfica realizada nos itens anteriores.

3.6 – Discussão da Revisão Bibliográfica

Com os levantamentos realizados, constatou-se uma carência de ferramentas e trabalhos acadêmicos voltados ao estudo de malhas ferroviárias com trens em ciclo fechado.

Entre estes últimos, foi montada uma tabela comparativa que relaciona as características consideradas essenciais para que um estudo de simulação seja completo. Como demonstrado na Tabela 3.1, constatou-se que nenhum dos estudos aborda a presença dos trens cíclicos, ou seja, que não são formados e depois desagregados. Estes trens são muito comuns nas ferrovias que fazem o transporte de granéis líquidos ou sólidos, como minério ou petróleo.

Estes trens são formados geralmente por longas composições de vagões idênticos, que seguem de um ponto de carga para outro de descarga e vice-versa, repetindo sempre o mesmo ciclo. Nesta situação, as ocorrências de movimentação são diferentes dos trens que se formam e depois desagregam, pois se há um atraso em um ponto de carga, ocorre uma fila de trens que conseqüentemente traz impacto para o ponto de descarga, que terá ociosidade por falta de trens. E esse atraso se propagará pela malha no ciclo destes trens, conforme já exposto anteriormente.

Portanto, nas malhas onde circulam estes trens, não é possível realizar estudos de simulação que representem seu correto comportamento sem atuar neste nível de detalhe, e o modelo deve ser capaz de validar frente ao sistema real, caso contrário, seus resultados perdem credibilidade.

Neste quesito reside a principal relevância desta Tese, que pretende atender a esta lacuna nos estudos existentes.

Tabela 3.1 – Comparativo entre os estudos de simulação

| TÍTULO | AUTOR | ANO | LINHA SINGELA | LINHA DUPLA | TRENS CÍCLICOS | INTERRUPÇÕES DE LINHA | FLEXÍVEL (uso em outras ferrovias) | SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA | OBJETIVO ESTRATÉGICO |
|---|--|------|---------------|-------------|----------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------------|
| Network Simulation of a major Railroad | Artigo de Lewellein & Tumay | 1998 | X | | | X | | X | X |
| Simone: Large Scale Train Network Simulations | Artigo de Middelkoop & Bouwman | 2001 | X | X | | X | X | X | X |
| Evaluating the Potential Benefits of a Rail Traffic Movement Planning Algorithm | Artigo de Julich et. al. | 1999 | X | X | | X | | | |
| Simulation Modeling at Union Pacific Railroad | Artigo de Dalal & Jensen | 2001 | X | X | | X | | X | X |
| Modelo para Programação de Despachos de Trens em Vias Singelas | Dissertação de mestrado de Cássio Fernando Rosseto | 1997 | X | | | X | X | X | |
| Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos | Dissertação de mestrado de Giselle de Moraes Ramos | 2003 | X | X | | X | | X | X |
| The use of Simulation in the Planning of Dutch Railway Services | Artigo de Hooghiemstra & Teunisse | 1998 | X | X | | | X | X | X |
| A Discrete Event Simulation for the Crew Assignment Process in North American Freight Railroads | Artigo de Guttkuhn et. al. | 2003 | | | | | X | X | X |
| The use of Simulation to Calculate the Labor Requirements in an Intermodal Rail Terminal | Artigo de Kulick & Sawyer | 2001 | | | | | | X | X |
| The use of template-based methodology on the simulation of a new cargo track from Rotterdam Harbor to Germany | Artigo de Pater & Teunisse | 1997 | X | X | | | | X | X |
| Modelo para Análise de Trechos Ferroviários em Linha Singela | Dissertação de Mestrado de Jorge Antônio Cury Saad | 2003 | X | | | | X | X | X |

Legenda: Atende Não Atende

Capítulo 4 – Método

Este capítulo apresenta as principais ferramentas e técnicas que serão usadas no estudo, e descreve o método a ser usado na aplicação destes elementos para que se alcance o objetivo da Tese.

É feita uma descrição da técnica utilizada: simulação de eventos discretos, juntamente com as ferramentas computacionais de simulação e otimização adotadas e suas principais características. Neste capítulo também é apresentado um procedimento de validação inicial do modelo por otimização, que é usado para calibrar a equação de decisão do direcionamento dos trens.

Segundo Freitas (2001), as principais razões para se realizar estudos usando modelos de simulação são:

- O sistema real ainda não existe. Neste caso, a simulação pode ser usada para planejar o futuro sistema;
- Experimentar com o sistema real é dispendioso. O modelo poderá indicar, com muito menos custo, quais os benefícios de se investir no sistema;

- Experimentar com o sistema real não é apropriado. Algumas situações, como as que envolvem risco de vida, não são apropriadas para se estudar com o sistema real, mas são viáveis com a simulação.

O presente estudo adotou a técnica de simulação pela segunda razão, visto que através da simulação, é possível verificar o impacto da presença de estruturas não existentes ainda no sistema real, e também porque não se cogita em modificar o comportamento do sistema real sem uma previsão segura do seu impacto, pelo volume financeiro usualmente envolvido na operação de uma malha ferroviária.

4.1 – Método

Para alcançar os objetivos da Tese, as alternativas propostas para representar o direcionamento de trens descritos no Capítulo 2 deverão ser comparadas através de um modelo de simulação de malha ferroviária que contenha trens em ciclo fechado. A comparação entre as alternativas permitirá a determinação da mais adequada.

Isto será realizado através dos procedimentos apresentados a seguir:

4.1.1 – Elaboração dos Algoritmos de Modelagem

Desenvolvimento de todos os algoritmos necessários para se representar computacionalmente o comportamento de uma malha ferroviária com vários trens circulando em ciclo fechado, e os elementos que interferem no ciclo, como eventos de manutenção ou circulação de outros trens não cíclicos (entre outros descritos no Capítulo 2).

4.1.2 – Elaboração Parcial da Equação de Direcionamento

Como descrito anteriormente no Capítulo 2, algumas opções de direcionamento necessitam que os fatores envolvidos sejam representados matematicamente através de uma equação.

A alternativa de direcionamento realizada pelo próprio modelo, e a alternativa que acessa uma ferramenta externa requerem a representação matemática dos fatores de decisão, portanto esta equação deve ser elaborada.

Esta versão parcial ainda carecerá dos pesos, que representam a importância que tem cada fator no processo de decisão. Estes pesos serão posteriormente determinados por um procedimento de validação inicial por otimização, descrito adiante.

4.1.3 – Elaboração do modelo conceitual (codificação do modelo)

Implementação dos algoritmos desenvolvidos em um modelo de simulação, representando uma malha ferroviária real. Será escolhida uma malha brasileira que possua complexidade suficiente para a proposta de estudo da Tese. Essa malha ferroviária será usada como estudo de caso, e seus indicadores de desempenho, uma referência para a validação do modelo.

4.1.4 – Determinação da Influência de cada Fator na Equação

Esta etapa propõe o uso de uma ferramenta de otimização capaz de otimizar variáveis de cenário em um modelo de simulação. Estas ferramentas funcionam integradas com ferramentas de simulação, mas seu princípio de funcionamento é idêntico ao de outros otimizadores.

A principal diferença é que não se necessita desenvolver um modelo representativo do sistema para ser otimizado. O próprio modelo desenvolvido no simulador é usado para isso. Todos os outros procedimentos continuam sendo necessários, como a escolha das variáveis que podem ser usadas para se gerar

novos cenários, restrições e indicadores de desempenho cujo resultado deve ser minimizado ou maximizado.

O modelo de simulação desenvolvido nas etapas anteriores será submetido a esta ferramenta de otimização, sendo que as variáveis de entrada a serem manipuladas serão justamente os pesos que influenciam os fatores na equação que representa o direcionamento. O indicador de resultado será a diferença entre o resultado de produção do modelo e a produção do sistema real no mesmo cenário e período. Este resultado deverá ser minimizado, ou seja, a diferença de desempenho entre o valor real e o simulado deverá ser o menor possível.

Ao executar este procedimento, o otimizador deverá encontrar os pesos da equação de direcionamento que validam o modelo. Por esta razão, se entende que é feita uma validação inicial.

4.1.5 – Experimentos de Direcionamento

Execução de experimentos com o modelo de simulação operando com as três opções de direcionamento propostas (escolha aleatória, escolha realizada por algoritmo de decisão interno e escolha realizada por ferramenta de decisão externa).

O cenário usado para os experimentos será o cenário de validação, de forma que possam ser comparados ao resultado do sistema real.

Estes experimentos serão realizados em um mesmo microcomputador, que deverá ser reinicializado após cada experimento, para que a comparação entre os resultados seja isenta de interferências.

4.1.6 – Escolha da Melhor Opção para Representação do Direcionamento

A escolha da melhor opção será baseada em uma restrição eliminatória e um indicador de desempenho quantitativo.

Restrição: O procedimento de direcionamento deverá ser capaz de apresentar o resultado com até 10% de diferença em relação ao resultado do sistema real para o cenário proposto (cenário de validação). A opção que não alcançar este valor será desconsiderada.

Indicador: Duração do experimento. Será escolhido o procedimento que exige menor esforço computacional, ou seja, que é executado em tempo menor.

4.1.7 – Experimentos de Desempenho do Sistema

Realização de experimentos de desempenho da malha ferroviária com o modelo de simulação, operando com a opção de direcionamento escolhida na etapa anterior.

Esta etapa busca demonstrar a utilidade do modelo assim ajustado através da realização de alguns estudos com foco estratégico e análise dos resultados obtidos.

Para melhor esclarecimento, os procedimentos do método adotado estão apresentados em seqüência no fluxograma da Figura 4.1.

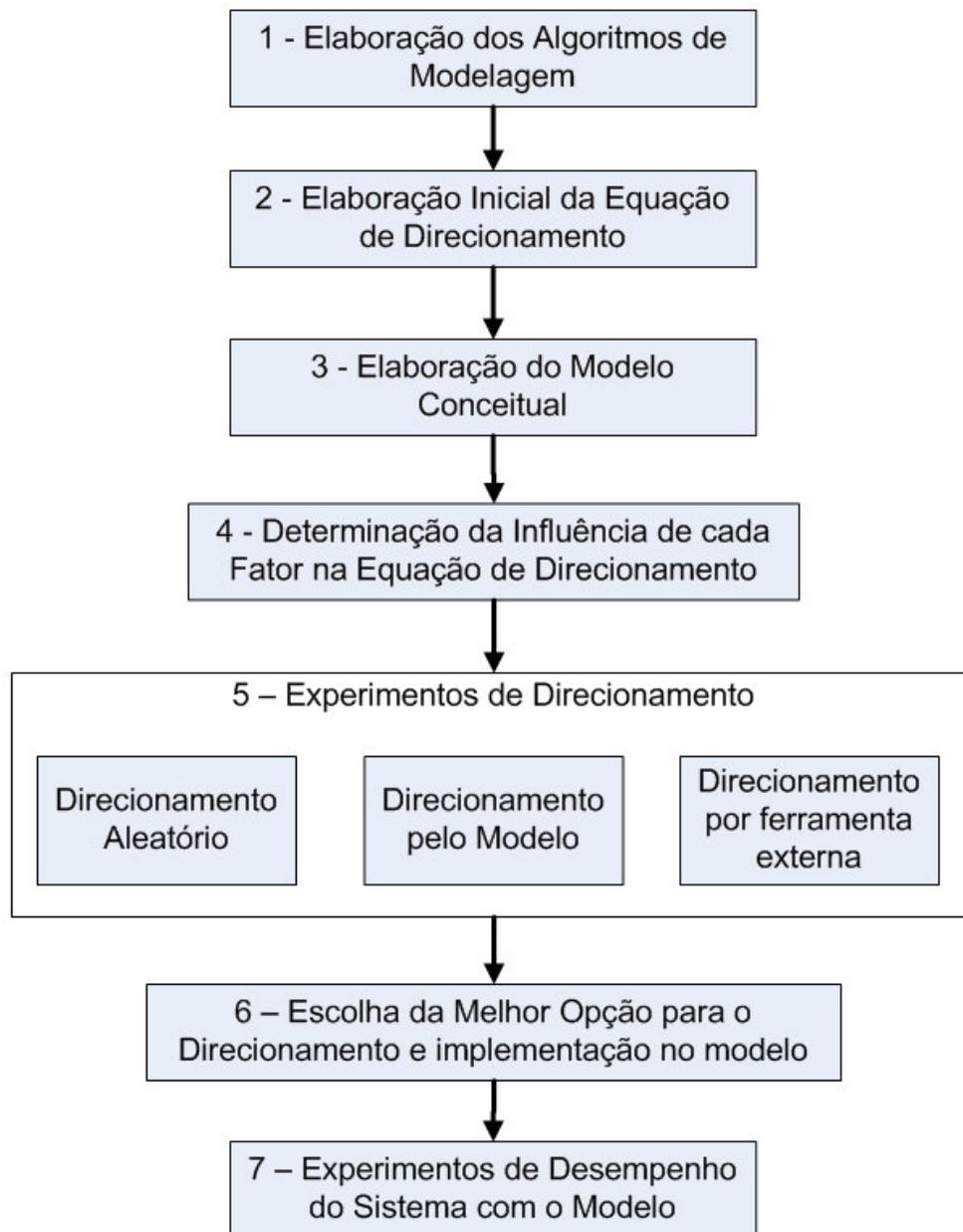


Figura 4.1 – Fluxograma de aplicação do método

4.2 – Simulação de Eventos Discretos e Ferramenta computacional de Simulação adotada: Arena

Para este estudo, adotou-se a ferramenta computacional Arena da Rockwell Software, uma divisão da Rockwell Automation (Rockwell Automation, 2007) para realizar a tradução do modelo. Por se tratar de uma ferramenta de simulação genérica, torna possível desenvolver um modelo de simulação que preencha a lacuna de pesquisa identificada no capítulo anterior, também não atendida pelas ferramentas comerciais disponíveis.

Esta ferramenta também permite o desenvolvimento de templates a partir de pequenos modelos, favorecendo o uso destes modelos menores como parte de outros maiores de forma simplificada, como anteriormente apresentado no capítulo 1.

Os principais elementos de um modelo de simulação em Arena são, segundo Kelton (1998):

- **Entidades:** São os objetos dinâmicos da simulação. Elementos que circulam pelo sistema, interagindo com sua estrutura e seguindo as regras estabelecidas pelo modelo. Entidades podem representar elementos físicos reais do sistema, como pessoas, carros, clientes, peças, trens, ou serem usadas para funções lógicas de comportamento, sem representarem um elemento físico existente no sistema.
- **Recursos:** As entidades competem entre si pelo serviço dos recursos, que representam elementos do sistema com capacidade restrita, como pessoal de atendimento, equipamentos, espaço de estocagem limitado, instalações de carga/descarga, pátios de ultrapassagem ferroviários. Podem ser considerados elementos “estáticos” do sistema.

- Filas: Quando não conseguem avançar devido a restrições de falta de capacidade em recursos, ou condição do sistema, as entidades ficam ordenadas em filas. As filas podem ter regras de ordenação como “último que entra, primeiro que sai” (também chamado de pilha, ou LIFO), “primeiro que entra, primeiro que sai” (também chamado de FIFO), ou ordenado por atributos da entidade.
- Atributos: São informações referentes às entidades, que as diferenciam ou não das demais. Informações como peso, tipo, cor e valor podem ser representados como atributos;
- Variáveis: São estruturas que guardam informações globais sobre o sistema. As variáveis podem ser usadas para registrar a quantidade de entidades dentro do sistema ou o estado de um determinado elemento do sistema (como por exemplo, indisponibilidade de uma instalação devido ao horário de atendimento). As variáveis também podem ser usadas como vetores ou matrizes, armazenando grandes quantidades de informações que podem estar relacionadas.

Pode-se descrever o funcionamento conceitual de um modelo em Arena de forma resumida da seguinte maneira:

O usuário descreve, durante a construção do modelo, todos os elementos estáticos como recursos e outros, e também as regras de comportamento a serem seguidas. Ao se iniciar a simulação, os elementos dinâmicos (entidades) entram no modelo, interagem com os elementos estáticos e circulam conforme as regras que foram modeladas.

Esse comportamento está ilustrado na Figura 4.2.

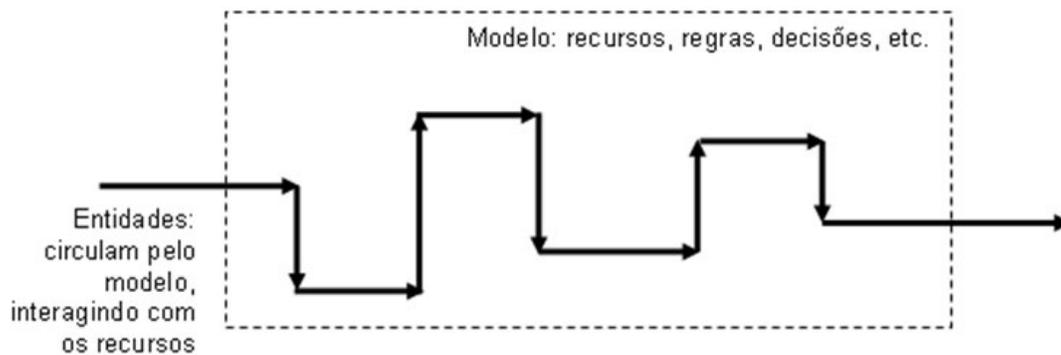


Figura 4.2 – Comportamento geral de um modelo de simulação em Arena

Como a maioria das ferramentas computacionais de simulação de eventos discretos, o Arena usa a geração de números aleatórios pelo método de Monte Carlo. A partir de uma distribuição matemática que define as probabilidades de ocorrência de cada valor ou faixa de valores, esse método realiza o sorteio do valor a ser usado na simulação. Conforme esclarece Freitas (2001), este método foi desenvolvido durante as pesquisas da bomba atômica americana, e foi publicado pela primeira vez por Dudewicz et al (1985). Maiores detalhes sobre o uso do método pelo Arena são também apresentadas por Freitas (2001).

4.3 – Ferramentas de Otimização

Segundo Freitas (2001), em oposição aos modelos de otimização, um modelo de simulação é executado a invés de ser resolvido. Ainda segundo este autor, as diferenças entre estas duas abordagens implicam que o modelo simulado permite análises quase que a todo instante, à medida que novas indagações sobre o comportamento do sistema modelado sejam aludidas.

Ainda segundo este autor, na maioria dos casos, os modelos de simulação não são, por natureza, modelos de otimização. Não oferecem (a menos de um razoável esforço) a possibilidade de busca de uma solução ótima, servindo

mais apropriadamente para análises do comportamento do sistema sob condições específicas.

Entretanto, há casos em que se necessita realizar simulações de sistemas mais complexos, onde o próprio sistema a ser simulado tem comportamentos de otimização. Como exemplos pode-se citar um caso de simulação de uma linha produtiva em que se realiza o sequenciamento ótimo das tarefas a cada dia, ou de um sistema que, ao sofrer a falha de um equipamento, redistribui as tarefas de maneira ótima entre as restantes.

O caso do direcionamento de trens estudado nesta Tese se enquadra nesta situação.

Para cumprir o método proposto, serão necessárias duas ferramentas de otimização diferentes. Uma que irá otimizar o próprio modelo de simulação, na busca pelo peso dos fatores de decisão. E outra que atuará em conjunto com o modelo, como parte integrante deste, reproduzindo o processo de decisão existente no sistema real.

As figuras a seguir ilustram a diferença na aplicação de cada uma destas ferramentas. Como pode ser visualizado na Figura 4.3, a ferramenta que busca o peso dos fatores atua sobre o próprio modelo de simulação. Já o otimizador que reproduz o processo de decisão, atua como parte integrante do próprio sistema que está sendo simulado, como pode ser visto na Figura 4.4.

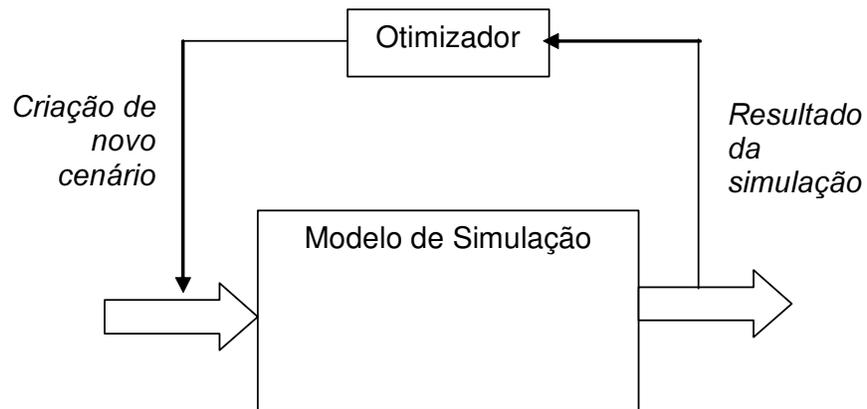


Figura 4.3 – Otimizador buscando os pesos dos fatores para a equação do direcionamento de trens.

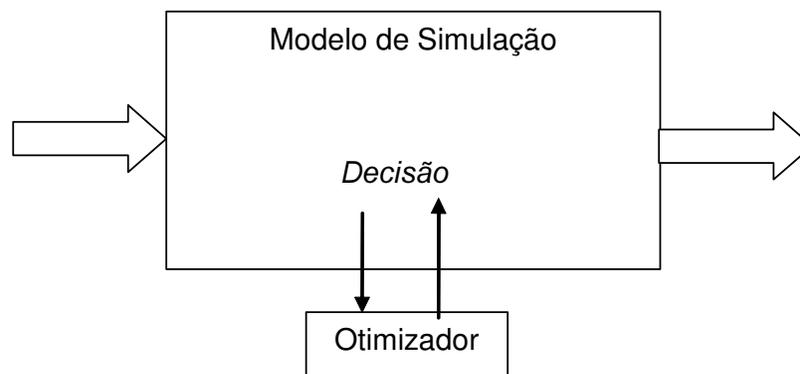


Figura 4.4 – Otimizador atuando como motor de decisão para o direcionamento.

Ambas as ferramentas de otimização usadas estão descritas nos tópicos a seguir:

4.3.1 – Otimizador do Modelo de Simulação: Ferramenta Optquest

Atualmente, as melhores ferramentas computacionais de simulação de eventos discretos vêm com um módulo otimizador. Em várias destas ferramentas, o módulo de otimização é um software à parte desenvolvido por terceiros.

A finalidade deste programa é facilitar o trabalho do analista que necessita tomar decisões com o modelo de simulação, mas se depara com uma quantidade muito grande de cenários, inviabilizando o procedimento padrão de testar cenário, avaliar resultados e sensibilidade das variáveis, testar novo cenário buscando um desempenho melhor, e etc.. Se a quantidade de cenários possíveis é muito grande, este procedimento se torna muito demorado, sendo bem vinda uma ferramenta que automatize esse processo.

Para usar a ferramenta, o usuário informa quais são as variáveis do modelo que podem ser alteradas pelo otimizador, e qual o intervalo de valores passível de ser assumido por elas. Podem ser cadastradas restrições que ajudam o otimizador a desconsiderar cenários inviáveis. Um indicador de desempenho (geralmente um resultado obtido pelo modelo) pode ser minimizado ou maximizado, para orientar a busca pelo melhor cenário, fazendo o papel de uma função objetivo.

Uma vez assim configurado, o programa otimizador toma conta do simulador e realiza diferentes cenários, buscando encontrar a combinação de valores para as variáveis de entrada que apresentem o melhor desempenho para o sistema, conforme a função objetivo definida.

A ferramenta com essa finalidade que acompanha o Arena é o Optquest, desenvolvido pela OptTek Systems (OptTek, 2007). Esta empresa foi fundada pelo criador da metaheurística Tabu Search, Fred Glover (Glover & Laguna, 1997) e esta metaheurística de busca era usada em suas primeiras versões. Na versão atual, usada neste estudo, a metaheurística usada é a Scatter Search (Glover

et. al., 2000), um aprimoramento do Tabu, segundo os desenvolvedores. O uso de uma metaheurística de busca permite que mesmo com uma grande quantidade de alternativas de cenário a serem testadas, a ferramenta conseguirá convergir para resultados satisfatórios. O critério de parada automático usado pela metaheurística é a ocorrência de 100 iterações sem melhoria. Entretanto, pode-se requisitar ao programa que realize iterações adicionais, ou estabelecer o critério de parada manual.

Esta ferramenta de otimização será usada somente para aplicar o procedimento de validação inicial.

4.3.2 – Otimizador Externo para Representar o Direcionamento: Ferramenta GAMS

O método prevê o uso de uma ferramenta de otimização atuando como o “motor” de decisão do modelo. Este procedimento exige que a ferramenta escolhida seja capaz de estabelecer comunicação com o modelo para tomar a decisão mais adequada para o contexto do sistema naquele momento.

Foi escolhida a ferramenta GAMS (abreviação de General Algebraic Modeling System), desenvolvido pela GAMS Development Corporation (GAMS, 2007), por ser capaz de resolver problemas como o do direcionamento, e por ser capaz de ler e gravar dados em planilhas eletrônicas de cálculo.

Como a ferramenta de simulação escolhida (Arena) também é capaz de trocar dados com planilhas, este recurso será usado para estabelecer a comunicação entre os programas. Foi escolhida a ferramenta de planilha eletrônica MS-Excel da Microsoft, pela sua compatibilidade tanto com o GAMS como com o Arena.

Este procedimento seguirá os seguintes passos:

1. O Arena executa a simulação até o momento em que se necessita tomar uma decisão;

2. O Arena grava a situação atual do modelo em uma planilha MS-Excel;
3. O Arena aciona o GAMS e fica aguardando a resposta do otimizador;
4. O GAMS lê os dados gravados na planilha e executa o algoritmo que seleciona a melhor decisão;
5. O GAMS grava o resultado da seleção em um arquivo texto;
6. O Arena detecta o término da execução do GAMS e lê o resultado do arquivo texto;
7. O Arena retoma a execução da simulação, usando a decisão informada pelo GAMS.

Este procedimento irá se repetir sempre que surgir a necessidade de tomada de decisão de direcionamento dentro do modelo.

4.4 – O Procedimento de Validação Inicial por Otimização

O procedimento de validação inicial por otimização é apropriado quando se dispõe de todos os dados necessários para alimentar o modelo, mas há dificuldade em se determinar qual é o exato procedimento decisório envolvido em um sistema.

Muitas vezes o procedimento de decisão é realizado por profissionais experimentados que são muito bons para decidir, mas tem dificuldade em esmiuçar com clareza os detalhes desse processo. Nestes casos, as entrevistas com os profissionais geralmente permitem que se tenha uma visão geral do processo, mas não que se replique o exato procedimento decisório. Frequentemente, a reprodução de um procedimento de decisão dentro do modelo não pode ser feito como uma exata cópia do que é feito na realidade, pois o sistema real leva em

conta fatores operacionais que não são sequer representados no modelo ou tem representação sem detalhamento suficiente.

Quando se implementa no modelo um algoritmo de decisão que toma decisões de forma diferente da realidade, duas situações problemáticas podem ocorrer:

- Caso o algoritmo escolhido seja muito simplificado ou incorreto, o modelo pode tomar decisões piores que o sistema real, levando o desempenho do sistema simulado a ser pior que o do real;
- Se o algoritmo for muito sofisticado, o modelo tomará decisões melhores que o sistema real, e seu desempenho será melhor que o real;

Ambas as situações são indesejáveis, pois resultam em um modelo que não valida, ou seja, não reproduz a realidade do sistema.

A proposta da validação inicial por otimização é desenvolver uma equação representativa de todos os fatores que influenciam na decisão e usar o próprio modelo do sistema, associado a uma ferramenta de otimização, para determinar qual a influência exata de cada fator no processo de decisão. Sua forma de aplicação está apresentada a seguir:

4.4.1 – Construção e Verificação do Modelo

Para a aplicação do procedimento, é necessário que o modelo já esteja construído e com todos os seus comportamentos corretamente implementados (excetuando-se o procedimento de decisão).

Apesar de carecer do procedimento de decisão, é importante que o modelo seja verificado quanto ao atendimento correto de cada opção de direcionamento. Para isso, devem ser realizadas simulações experimentais

independentes para cada alternativa, fixando-se a decisão para cada experimento. Assim se comprova que todas as decisões possíveis de serem tomadas pelo modelo funcionarão corretamente.

O modelo deve fornecer, ao final da simulação, um conjunto de indicadores de desempenho que possam ser comparados com os do sistema real. Estes indicadores serão usados para validar efetivamente o modelo nas etapas seguintes.

4.4.2 – Elaboração da Equação Decisória

A elaboração da equação consiste em se combinar todos os fatores conhecidos que influenciam no processo de decisão, desde que sejam quantificáveis.

Há a opção de se escolher maximizar ou minimizar a equação. A influência dos fatores deve ser correspondente. Caso se deseje maximizar, ou seja, escolher o terminal que resulte no maior valor, os fatores que favorecem o terminal devem ser somados, e os fatores que o desfavorecem, subtraídos. Ex.:

$$F1 + F2 + F3 - F4 - F5$$

Fatores que envolvam restrições como “se o terminal está em manutenção ele não deve ser escolhido” podem ser incluídas na equação, desde que combinadas com operações de resultado booleano ou binário (zero ou um) e multiplicando um valor que influencie decisivamente o resultado. Por exemplo, se a equação está sendo maximizada, o fator de resultado booleano pode multiplicar um valor extremamente baixo (-10.000 por exemplo). Assim, se o resultado for zero (terminal não está em manutenção), este fator não interfere na decisão, mas se for um (terminal em manutenção), a equação sofre um grande decremento, tornando este terminal muito menos interessante que os outros. Ex.:

$$F1 + F2 + F3 - F4 - F5 - 10.000 * (F6)$$

Esta opção pode ser usada em ferramentas computacionais de simulação que suportam operações booleanas. Em outras ferramentas sem este recurso, deve-se realizar operações condicionais comuns para se obter o mesmo efeito. O objetivo é sempre evitar que um terminal restritivo seja considerado como opção.

Cada fator da equação deve estar associado a uma constante multiplicadora, de forma que seja possível representar a sua influencia, mais ou menos significativa, para o processo de decisão. Ex.:

$$C1*F1 + C2*F2 + C3*F3 - C4* F4 - C5*F5 - 10.000*(F6)$$

4.4.3 – Elaboração do Modelo de Otimização

Nesta etapa, a ferramenta de otimização do simulador deve ser configurada de forma que possa testar diferentes pesos para a equação, buscando o resultado o mais próximo possível do sistema real. Isto é feito configurando-se os seguintes itens:

Definição das variáveis de controle: As variáveis correspondentes às constantes da equação de direcionamento devem ser cadastradas como variáveis de controle. Um intervalo de valores que pode ser assumido por elas deve ser informado, com mínimo 1. O valor máximo possível deve ser alto o suficiente para permitir uma boa diferenciação entre os fatores. Quando maior a quantidade de fatores da equação, maior deve ser este valor máximo. É importante que não se exagere neste valor, pois acarretará em uma busca mais longa pelo otimizador;

Definição da função-objetivo. Devem ser escolhidos os indicadores de desempenho do sistema dos quais se tenha dados reais para o cenário em estudo. A equação deve retratar a busca pela menor diferença entre o real e o simulado, portanto:

$$\text{MINIMIZAR (} |IS1-IR1| + |IS2-IR2| + |IS3-IR3| \dots)$$

Onde:

IS = Indicador simulado

IR = Indicador do sistema real

A função objetivo pode, desta forma, monitorar diversos indicadores ao mesmo tempo ou apenas um único, caso se considere que seja suficiente;

Condição de parada. Uma condição de encerramento da busca pode ser configurada, baseada em tempo decorrido, quantidade de resultados sem melhoria da função-objetivo ou mesmo parada manual. Este critério depende da complexidade da busca. A maioria das ferramentas permite que se continue a busca por mais um período de tempo ou por uma quantidade definida de iterações. Estes recursos devem ser usados até que o resultado seja satisfatório para a precisão que se busca no modelo.

Outras configurações do otimizador podem ser necessárias, mas atendem necessidades específicas da ferramenta sendo usada, como quantidade de replicações do modelo, precisão, etc.

4.4.4 – Validação Inicial

A validação inicial é realizada acionando-se o otimizador, configurado conforme descrito na etapa anterior.

Ao término do procedimento de otimização, a ferramenta terá fornecido os valores a serem usados como multiplicadores dos fatores na equação de direcionamento. Se o procedimento foi corretamente aplicado, o modelo poderá usar estes valores para tornar seu procedimento de decisão bastante semelhante ao do sistema real.

4.4.5 – Inserção dos Fatores no Modelo

Uma vez de posse dos valores, o modelo de simulação pode receber uma atualização da equação do direcionamento, onde os fatores multiplicadores não serão mais variáveis, mas sim constantes fixas.

Com esta configuração, o modelo já estará preparado para tomar as decisões de direcionamento a partir de seu próprio algoritmo interno.

4.4.6 – Exemplo de Aplicação

Para melhor clareza sobre o procedimento, será apresentado um exemplo de aplicação com situação e valores hipotéticos.

Supondo-se que uma empresa distribui seus produtos para 5 clientes, em diferentes localizações de uma cidade. Um único caminhão da empresa atende a todos os clientes, indo carregado, abastecendo o cliente e retornando ao armazém para recarga. Uma vez carregado, um despachador da empresa decide para qual cliente enviar o caminhão, baseado nos seguintes critérios:

- É importante dar preferência aos clientes que estejam com nível de estoque mais baixo;
- A empresa prefere atender aos clientes mais próximos, pois o caminhão logo retorna para uma nova carga;
- Alguns clientes pagam mais caro pelo produto, e a empresa também prefere atender a estes clientes em detrimento de outros, para maximizar seu ganho financeiro;
- Ocasionalmente, um cliente pode ter o seu equipamento de descarga indisponível para manutenção. Neste caso, o caminhão não deve ser despachado para ele.

Considerando-se as seguintes representações:

NE = Nível de estoque em toneladas

D = distância em Km

V = Valor pago por unidade do produto, em reais

M = Estado do equipamento de descarga do cliente. Trata-se de uma variável binária, que assume os valores 1=ativo ou 0=em manutenção.

Q = Quantidade média de viagens realizadas por mês.

C1 a C3 = Constantes multiplicadores dos fatores

A equação de direcionamento pode ser elaborada, considerando-se que deverá ser escolhido o cliente cujo resultado da equação obteve o maior valor.

Inicialmente, são somados os fatores que favorecem a escolha de um cliente (quando aumentam, devem aumentar o valor da equação). Neste caso, apenas o valor pago por unidade do produto é somado:

$$+V$$

Em seguida se acrescentam os fatores que desestimulam a escolha do cliente (quando aumentam, devem diminuir o valor da equação). Neste caso, são subtraídos a distância e nível de estoque:

$$+V - D - NE$$

O evento de manutenção pode ser considerado como um fator que desestimula fortemente a escolha do cliente, quando ocorre. Isso é equacionado multiplicando-se o fator M por um valor alto, que cause um forte desestímulo pela sua escolha quando a manutenção está ativa (M igual a 1):

$$+V - D - NE - 100.000 *(M)$$

Finalmente, cada fator decisório da equação recebe uma constante multiplicadora, a qual representará o seu peso de influência na decisão:

$$+(C1*V) - (C2*D) - (C3*NE) - 100.000 *(M)$$

Encerrada a equação do direcionamento, pode-se elaborar a função-objetivo. Para isso, deve ser escolhido o indicador ou indicadores de desempenho

para comparação com o sistema real. Neste caso, foi escolhido o indicador “quantidade de viagens realizadas”. Feito um levantamento na empresa, constatou-se que em média se fazem 73 viagens por mês, caso não ocorra uma situação fora do normal.

A função objetivo, portanto, deve ser:

MINIMIZAR ($|Q-73|$)

Desta forma, o otimizador atribuirá valores a C1, C2 e C3, executará a simulação, e fará a comparação entre a quantidade média de viagens/mês obtida (Q) com o valor do mesmo cenário no sistema real (73 viagens). O procedimento se repetirá, buscando os valores que resultarem na menor diferença entre estes indicadores. Portanto, os valores C1, C2 e C3 que obtiverem o valor mais próximo de zero para a função-objetivo deverão ser os adotados de forma fixa no modelo.

Capítulo 5 – Modelo Conceitual da Simulação

Este capítulo descreve os algoritmos adotados no modelo de simulação, que o tornam capaz de representar os processos de decisão e resolução de conflitos em uma malha ferroviária. Este é o primeiro passo do método proposto.

A Figura 5.1 apresenta um diagrama de blocos do funcionamento geral do modelo de simulação. O modelo se inicia com a entrada dos trens na malha, que são basicamente de dois tipos: diretos e de ciclo. Os trens diretos são criados conforme a grade, ou seja, entram na malha semanalmente em um horário pré-determinado. Estes trens percorrem a malha até a estação de destino e saem do modelo. Após uma semana, estes trens são criados novamente e repetem o percurso.

Os trens diretos são de dois tipos: normal e expresso. A diferença entre eles é que o trem expresso é prioritário em relação ao normal. Ambos possuem grades separadas.

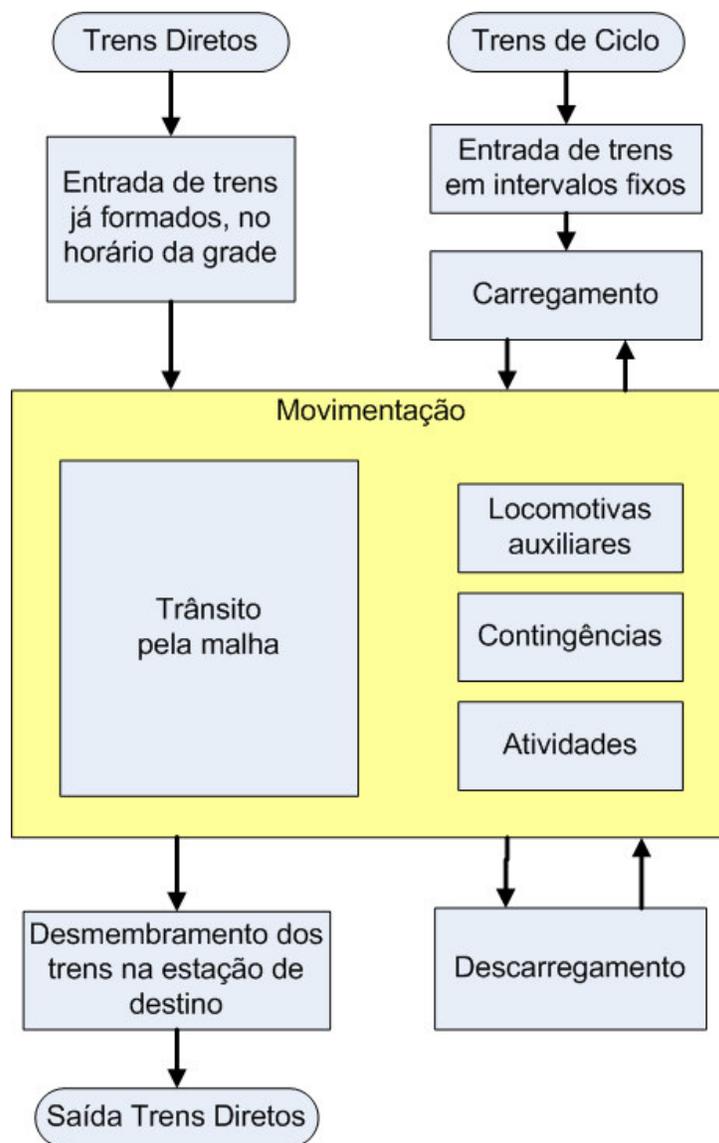


Figura 5.1 – Estrutura do modelo conceitual

Os trens de ciclo são criados vazios e seguem para a estação de carga. Como são criados uma única vez, eles entram na malha em intervalos de tempo fixos. O objetivo é evitar a criação súbita de muitos trens em um único local, para que o modelo entre em regime mais rapidamente. Uma vez carregados, os trens de

ciclo seguem para a estação de descarga, descarregam e voltam para a estação de carga, repetindo esse ciclo até o término da simulação.

O funcionamento do modelo é descentralizado, ou seja, não se adota nenhuma técnica de planejamento de despacho. Os trens partirão nos horários previamente estabelecidos (no caso de trens diretos), ou partirão imediatamente depois de encerrada a sua atividade no pátio em que se encontra (no caso de trens cíclicos). A partir daí, cada trem seguirá seu caminho e resolverá seus próprios conflitos de trânsito, reproduzindo o que acontece no sistema real, onde a equipe no Centro de Controle Operacional atua o tempo todo na orientação dos maquinistas.

Ao entrar na malha no pátio de origem, o trem tem um objetivo principal, que é alcançar o pátio de destino seguindo a rota (seqüência de pátios) especificada para o seu movimento. Esse objetivo principal é segmentado em objetivos secundários que consistem em “micro-movimentos” que, juntos, formarão o caminho completo. Por “micro-movimentos”, define-se como sendo o percurso do trem do pátio atual até o próximo pátio do roteiro em que este tenha a possibilidade de parar devido a situações de trânsito. As situações em que o trem não pode parar em um pátio são as seguintes:

- Inclinação excessiva do terreno: nestes casos, se uma composição carregada pára no pátio, ela não é mais capaz de retomar o seu movimento sem tração adicional de uma ou mais locomotivas, que precisariam ser deslocadas de outros pontos da malha. Portanto, o trem não deve parar nestas condições;
- Pátio muito curto: Neste caso, o pátio não comporta todo o comprimento do trem, de forma que mesmo ocupando todo o seu espaço, parte do trem ainda irá bloquear a linha de trânsito. Portanto, o cruzamento com outro trem em sentido contrário

não é possível neste pátio, e não há razão para que o trem pare neste local.

O algoritmo de movimentação, que é a espinha dorsal do modelo, descreve o processo de decisão do trem para realizar estes micro-movimentos. Ele possui outros algoritmos auxiliares (paradas de manutenção, atividades, formação de filas, etc.) que atuam em situações de movimentação específicas. Os outros algoritmos se dedicam aos eventos que acontecem com o trem fora da malha, como carga/descarga, formação, desmembramento e coleta de estatísticas.

5.1 – Representação da malha

A malha é representada através das seguintes estruturas:

5.1.1. Pátios

Os Pátios são posições da malha ferroviária onde se localizam linhas de cruzamento ou linhas de atividade, onde o trem pode sair da linha de trânsito. Um exemplo de pátio é apresentado na Figura 5.2.

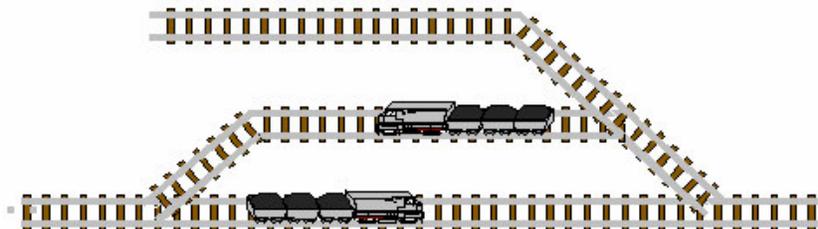


Figura 5.2 – Ilustração de um pátio ferroviário

Cada pátio da malha possui as seguintes informações ou características:

- Número de linhas de estacionamento: Quantidade de linhas nas quais um trem pode parar por qualquer motivo diferente de carga/descarga ou cruzamento. Nas linhas de estacionamento, o trem pode parar para realizar atividades de troca de tripulação,

abastecimento, manutenção preventiva ou aguardar em fila para entrar na linha de carga/descarga deste mesmo pátio;

- Número de linhas de carga: Quantidade de linhas preparadas para carregar um determinado material no trem. São suportados cinco materiais diferentes. Cada um pode ter sua quantidade de linhas dedicadas;
- Número de linhas de descarga: Quantidade de linhas preparadas para descarregar um determinado material do trem. Assim como nas linhas de carga, são suportados cinco materiais diferentes. Cada um pode ter sua quantidade de linhas dedicadas;
- Comprimento útil: Comprimento máximo da linha que pode ser usado para acomodar um trem;
- Chave indicativa de suporte à parada de trens pesados: informa se o pátio permite ou não a parada de trens pesados (trens de ciclo carregados);
- Probabilidade de contingência: Percentual que indica a probabilidade de que o trem necessite parar neste pátio para reparo. São três percentuais independentes, para trens de ciclo, trens diretos normais e trens diretos expressos;
- Tempo de contingência: Tempo fixo ou distribuição matemática que representa o tempo em que o trem fica parado em reparo no pátio. São três tempos independentes, para trens de ciclo, trens diretos normais e trens diretos expressos;

5.1.2. Segmentos

Os segmentos são linhas ferroviárias duplas ou singelas que fazem a ligação entre dois pátios. Cada segmento pode ter as seguintes características:

- Tipo sinalizado ou não sinalizado: Se o segmento é sinalizado, ele permite que um ou mais trens (no máximo 4) possam parar na linha por razões de trânsito. Se o segmento não é sinalizado, o trem não pode parar no segmento, caso em que ele só pode sair do pátio se houver um pátio adiante no caminho que possa recebê-lo;
- Número de seções de bloqueio (até 4): Quantidade de divisões sinalizadas do segmento que podem acomodar um trem. Só são usadas se a linha for representada como sinalizada. Este estudo assume como limitação que no máximo 4 seções de bloqueio podem ser usadas em cada segmento. Assume-se também a premissa de que estes segmentos podem acomodar qualquer tamanho de trem;
- Número de linhas (1 ou 2): Define se o segmento representa uma linha dupla ou singela;
- Tempo de trânsito normal: Tempo constante ou distribuição matemática que representa o tempo que o trem leva para percorrer todo o segmento. São três tempos separados, para trens de ciclo, trens diretos normais e trens expresso;
- Probabilidade de contingência de via: Representa a chance que um trem tem de sofrer uma pane ou outro tipo de imprevisto durante a circulação;
- Tempo de trânsito sob contingência: Caso o trem tenha que percorrer o trecho sob contingência, ele deverá usar este tempo ao invés do tempo de trânsito normal. São três tempos separados, para trens de ciclo, trens diretos normais e trens expresso;

A figura 5.3 ilustra o que representam os segmentos na malha

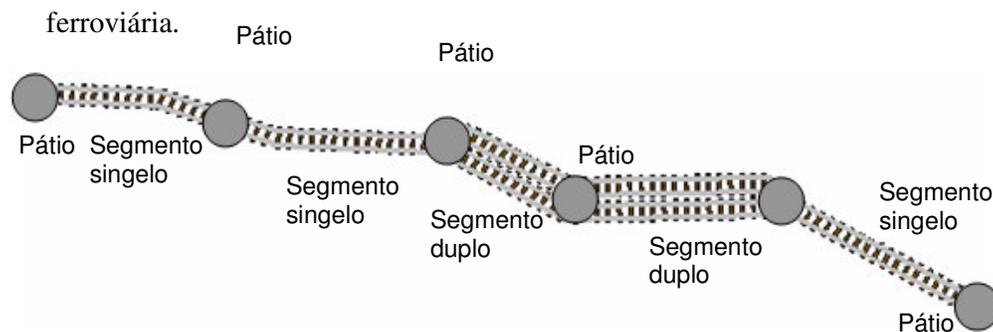


Figura 5.3 – Ilustração de segmentos da malha

5.1.3. Entroncamentos

Entroncamentos são pátios onde três ou mais linhas da malha se encontram. São representados como pátios normais, exceto pelo fato de que estes pátios podem pertencer a dois ou mais trechos (definidos a seguir). A Figura 5.4 identifica graficamente com círculos, o que são os entroncamentos em uma malha ferroviária, representada pelas linhas;

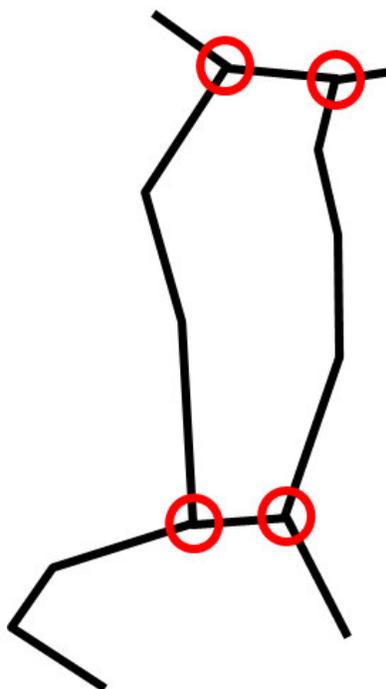


Figura 5.4 – Entroncamentos da malha ferroviária

5.1.4. Trechos de Malha

Os Trechos de Malha são conjuntos de pátios e segmentos consecutivos, localizados entre dois entroncamentos. Cada trecho da malha é cadastrado como uma lista de segmentos e seu respectivo pátio de início. O pátio de destino do segmento é sempre o pátio de início do segmento seguinte. Assim, o primeiro pátio cadastrado é o pátio de início do trecho. O cadastro do trecho termina com o cadastramento do último pátio. Quando um pátio inicia ou termina três ou mais trechos, é identificado pelo modelo como sendo um pátio de entroncamento.

A figura 5.5 ilustra o que representam os trechos na malha ferroviária. Os trechos estão identificados numericamente na figura (a numeração é apenas um exemplo).

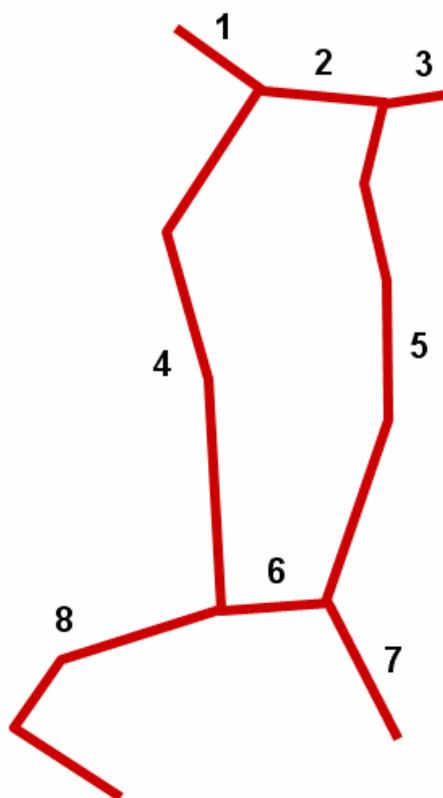


Figura 5.5 – Trechos da malha ferroviária

5.2 – Representação dos Trens Diretos

A Representação dos trens diretos no modelo de simulação requer a representação de sua grade de horários. A grade deste tipo de trem possui as seguintes informações:

- Tamanho do trem, em metros: Esta informação é usada para determinar em quais pátios o trem pode parar. O trem não para em pátios mais curtos que a composição;
- Local de origem: Pátio onde é formado o trem;
- Horário de origem: Horário marcado para a partida do trem no dia. Os trens saem todos os dias neste mesmo horário;

- Local de destino: Pátio para onde o trem deve se deslocar;
- Horário de chegada: Horário previsto para sua chegada no destino. No modelo, este horário é usado apenas como referência para determinar a pontualidade do trem frente as interferências encontradas pelo caminho;
- Roteiro: Seqüência de Trechos da malha a serem percorridos pelo trem. O roteiro deve começar com o trecho onde se localiza o pátio de origem, e terminar com o trecho onde se localiza o pátio de destino. Os trechos intermediários devem possuir conexão para que o trem siga seu caminho com sucesso;
- Locomotivas: Quantidade de locomotivas que devem ser usadas pelo trem. Há cinco frotas disponíveis e o trem pode usar qualquer combinação delas;
- Tonelada Útil: Peso em toneladas da carga desta composição. Informação usada para contabilizar indicadores de desempenho do trem, conforme detalhado adiante;
- Percentual de supressão: Nem sempre os trens são formados e despachados, por razões diversas. O impacto desta característica é representado por este percentual. É a probabilidade de que o trem não saia neste dia;
- Atividades: Relação de pátios e tempos de atividade. Estes pátios deverão estar nos trechos do roteiro do trem. Quando o trem alcança um destes pátios, executa o tempo de espera informado, representando assim uma atividade (troca de tripulação, abastecimento, inspeção, etc.). O algoritmo de movimentação informa maiores detalhes sobre este comportamento;

5.3 – Representação dos Trens de Ciclo

Os trens de ciclo são conservados dentro do sistema, ou seja, não são formados e desmembrados na origem e no destino. Por este motivo, os pátios de origem e destino se alternam. Decidiu-se arbitrariamente que o trem começa vazio no seu pátio de descarga.

5.3.1. Direcionamento de trens vazios

Conforme detalhado anteriormente no Capítulo 2, em algumas malhas o trem de ciclo precisa escolher o melhor terminal para carregar ou descarregar conforme critérios específicos.

O processo de decisão do direcionamento pode ser implementado de maneiras diferentes, conforme explicado anteriormente. A escolha da alternativa de direcionamento mais adequada é importante, pois sem representar este comportamento, o modelo dificilmente poderá ser validado.

Dentre as opções a serem avaliadas, duas delas terão implementação dentro do próprio código como modelo de simulação:

Escolha aleatória do terminal de destino: Neste caso, sempre que um trem necessitar de direcionamento, este algoritmo seguirá os seguintes passos:

1. Sorteia aleatoriamente, com chances iguais, entre todos os terminais de carga da malha;
2. Verifica se o terminal sorteado pode receber este tipo de trem;
3. Caso o terminal não possa receber este tipo de trem, retorna ao passo 1 para refazer o sorteio;
4. Caso o terminal possa receber este tipo de trem, o trem é direcionado para o terminal sorteado, encerrando o algoritmo.

Escolha do terminal baseada em equação de direcionamento: Nesta alternativa, sempre que um trem necessitar de direcionamento, o algoritmo seguirá os seguintes passos:

1. Calcula a equação de direcionamento para todos os terminais de carga da malha;
2. Identifica qual terminal obteve o maior valor como resultado da equação;
3. Direciona o trem para esse terminal, encerrando o algoritmo.

Independente do procedimento de decisão adotado, a representação dos trens de ciclo necessita das informações relacionadas no tópico a seguir.

5.3.2. Informações dos trens de ciclo

A representação dos trens de ciclo usa dois grupos de informações distintos. Um para definir a frota de trens e suas características, e outro para definir as opções de direcionamento.

Os parâmetros que definem o trem são:

- Ponto de decisão: Pátio para onde o trem se dirige quando sai de um terminal de descarga. Neste pátio será tomada a decisão sobre qual pátio de carga ele deve se encaminhar;
- Quantidade de vagões: Quantidade de vagões presentes na composição;
- Peso da carga por vagão: Refere-se a quantidade de material no vagão quando carregado. Juntamente com a quantidade de vagões, esta informação serve para calcular os indicadores de desempenho do sistema;

- Locomotivas: Quantidade de locomotivas que devem ser usadas pelo trem. Há cinco frotas disponíveis e o trem pode usar qualquer combinação delas;
- Carga: Tipo de carga levada pelo trem. Esta informação é usada para determinar a prioridade do trem durante a movimentação pela malha e diferenciar a linha de carga ou descarga, caso o terminal trabalhe com produtos diferentes;
- Quantidade de trens: Quantidade de trens de ciclo que atuarão com esta carga nesta origem e destino.
- Tempo de descarga: Tempo necessário para descarregar esta composição. Este valor pode tanto ser um valor constante quanto uma distribuição estatística;
- Grupo de direcionamento: O grupo de direcionamento é uma lista de pátios onde o trem pode carregar, pátios onde pode descarregar, demanda das estações de carga, roteiros e tudo mais relacionado ao direcionamento deste trem.

As informações de direcionamento dos trens são separadas em grupos, de forma que se pode dedicar frotas específicas para determinados transportes. Para cada grupo, há uma tabela cujas linhas são todos os pátios de carga disponíveis na malha, e as colunas são todos os possíveis destinos de descarga do trem.

Essa tabela deve conter a quantidade de viagens a ser feita do pátio de carga na linha correspondente com destino ao pátio de descarga na coluna correspondente. Ainda nesta mesma tabela, há duas colunas adicionais, que devem conter as seguintes informações:

- Tempo de carga: Este valor pode tanto ser um valor constante quanto uma distribuição estatística. É o tempo que esta composição levará para ser carregada neste pátio;

- Tempo médio de carga: Para realizar a previsão de direcionamento, é necessário um valor fixo. Este valor não pode ser uma distribuição estatística;

O direcionamento necessita ainda das seguintes tabelas de informação:

- Tabela de roteiros dos Pontos de Direcionamento aos Terminais de Carga: Relaciona todos os roteiros que se iniciam nos pontos de direcionamento e levam o trem a cada um dos terminais de carga do sistema. Esta informação é acompanhada de um valor médio do tempo de deslocamento (estimativa), que é usado na decisão de direcionamento do trem;
- Tabela de Roteiros dos Terminais de Carga aos Terminais de Descarga: Relaciona todos os roteiros que se iniciam em cada um dos terminais de carga do modelo e levam até cada um dos terminais de descarga;
- Tabela de Roteiros dos Terminais de Descarga aos Pontos de Direcionamento: Relaciona todos os roteiros que se iniciam em cada um dos terminais de descarga do modelo e levam até cada um dos pontos de direcionamento;
- Tabela de Pátios com Atividade Programada: Relação dos pátios onde o trem de ciclo sofre algum tipo de atividade. Cada pátio possui um tempo de atividade associado, e a atividade pode ser realizada apenas para trens carregados, apenas para trens vazios ou para ambos;

5.4 – Algoritmo de Inserção de Trens na Malha

Para iniciar o percurso pela malha ferroviária, tanto o trem direto quanto o trem de ciclo devem seguir os seguintes passos:

5.4.1 – Passo 1: Definir o Pátio de Destino

Os trens diretos, quando são formados, já tem a informação de seu pátio de destino. Os trens de ciclo também, mas apenas quando estão sendo formados pela primeira vez. Quando atingem o seu pátio de destino pela primeira vez, e após realizar a atividade no local, um novo destino deve ser definido. A situação mais simples é enviar o trem de volta ao pátio onde foi formado, fazendo com que este trem passe a efetuar o ciclo: vai carregado, descarrega, volta vazio, carrega, etc. Entretanto, podem ser aplicados algoritmos mais complexos para que o trem selecione vários destinos possíveis, conforme regras e interesses definidos pelos administradores da malha.

5.4.2 – Passo 2: Verificar a Rota

Todo movimento dos trens é feito seguindo uma rota. A rota é uma relação de trechos consecutivos que ligam o pátio de origem ao pátio de destino, e deve ser informada ao trem quando está partindo.

Antes de sair, deve ser feita uma checagem da rota para confirmar se ela realmente leva o trem até o pátio de destino. O propósito é identificar um possível erro de associação de rota ao trem, levando-o para um caminho que não passa pelo seu pátio de destino.

5.4.3 – Passo 3: Ocupar Pátio de Cruzamento

Antes de entrar na malha, o trem deve ocupar a linha de trânsito do pátio de origem, no sentido do seu movimento. Isto é necessário para evitar conflito com outros trens.

Uma vez ocupado o pátio, o trem pode iniciar a execução do algoritmo de movimentação. Enquanto o pátio estiver ocupado, o trem fica aguardando. A Figura 5.7 ilustra estes passos através de um fluxograma.

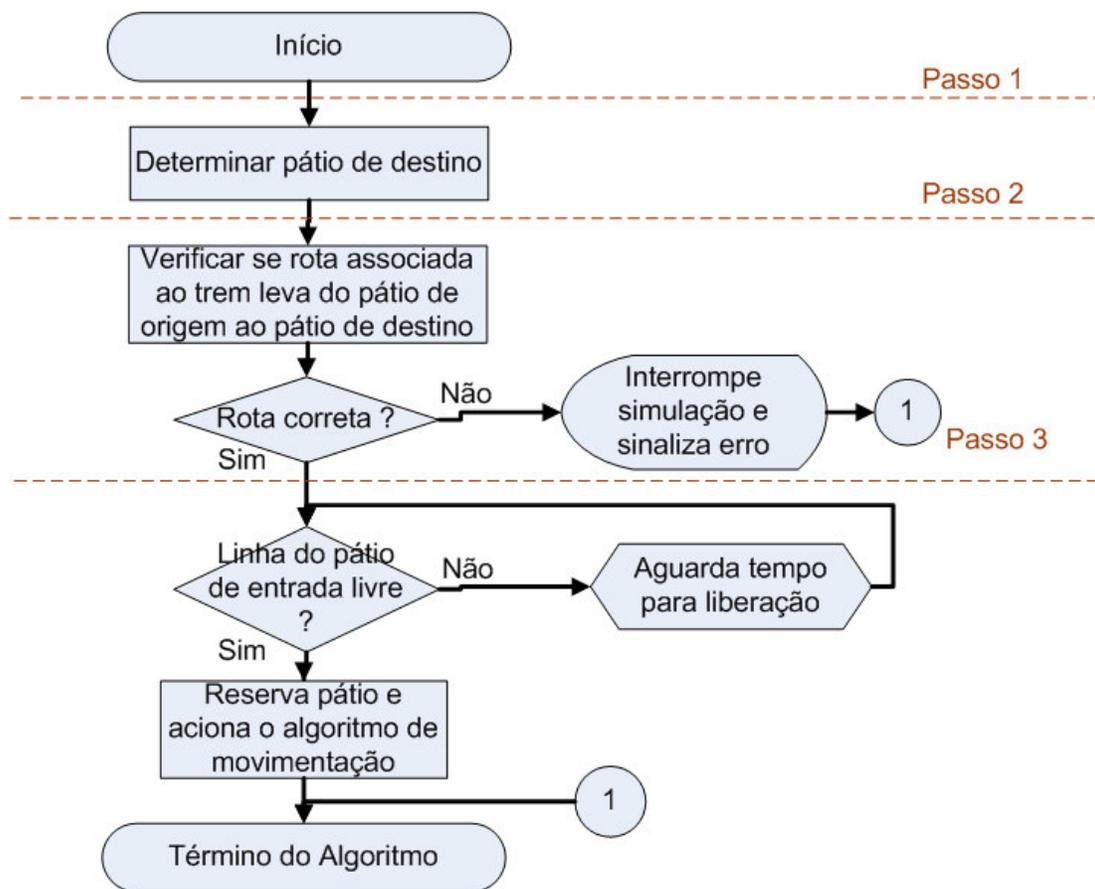


Figura 5.7 – Algoritmo de Inserção dos Trens na malha

5.5 – Algoritmo de Movimentação

O principal algoritmo do modelo é responsável por levar o trem do pátio de origem até o de destino e resolver todas as situações de conflito que ocorrerem em seu caminho. Ele deve executar os micro-movimentos que levarão o trem na direção do pátio de destino pela rota escolhida. O trem repete sua execução até alcançar o pátio de destino.

5.5.1 – Descrição do Algoritmo

Passo 1: Identificar o próximo pátio a ser alcançado

Neste passo, o trem precisa identificar qual é o próximo pátio da sua rota onde pode parar. Esse pátio, denominado como “pátio-objetivo”, é a próxima posição onde o trem irá executar este algoritmo. A verificação é a seguinte: Determinar qual é o próximo pátio de cruzamento que:

- Seja sinalizado, ou seja, permita parada de trens;
- Permita parada deste trem (no caso de trem de carga carregado);
- Tenha comprimento suficiente para frear e estacionar este trem;

Passo 2: Definir o tipo de movimento:

Neste passo, o trem deve examinar o caminho até o pátio-objetivo determinado no passo 1, para que possa realizar os procedimentos de movimento correspondentes. As possibilidades são as seguintes:

- a. A linha é dupla. Neste caso, deve seguir os procedimentos do passo 2.1.
- b. A linha é singela e o pátio-objetivo é o próximo pátio da rota. Neste caso, deve seguir os procedimentos do Passo 2.2;
- c. A linha é singela e há um ou mais pátios de cruzamento entre o pátio atual e o pátio-objetivo. Neste caso, deve seguir os procedimentos do Passo 2.3;

Passo 2.1: Linha Dupla

Neste caso, não há problema com trens vindo em sentido contrário, pois estes passam pela outra linha, portanto, as seguintes condições precisam ser satisfeitas:

- I) Se a linha é sinalizada, a seção de bloqueio seguinte deve estar livre.
Se a linha não é sinalizada, o pátio-objetivo e a linha devem estar livres;

II) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio seguinte, verifica se há linha de atividade disponível, ou linha de espera (Algoritmo de Atividade);

III) Se ele necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, é feita a verificação se há locos disponíveis na quantidade necessária, consultando a frota dedicada a este trecho (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

Se alguma destas condições não for satisfeita, o trem aguarda que todas elas sejam atendidas. Se todas foram satisfeitas, segue para o passo 3.1:

Passo 2.2: Linha é singela e o pátio-objetivo é o próximo pátio da rota:

Neste caso, há uma restrição no caminho e existe a possibilidade de conflito com outro trem em sentido contrário. Portanto, as seguintes condições precisam ser satisfeitas:

I) O sentido da linha está reservado no mesmo sentido para onde vai o trem, ou o sentido não está reservado;

II) Se a linha é sinalizada, a seção de bloqueio seguinte deve estar livre. Se a linha não é sinalizada, o pátio-objetivo e a linha devem estar livres;

III) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio seguinte, verifica se há linha de atividade disponível, ou linha de espera (Algoritmo de Atividade);

IV) Se ele necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, é feita a verificação se há locos disponíveis na quantidade necessária, consultando a frota dedicada a este trecho (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

V) A soma dos trens do mesmo sentido, entre o pátio onde está o trem e o próximo trecho reservado para sentido contrário, é menor que a quantidade de pátios de cruzamento entre estes dois pontos. Se esta condição não for atendida, o trem não deve avançar, sob o risco de

provocar travamento como o mostrado na Figura 5.8. Nesta situação, o trem X aguarda que o trem Z libere o pátio, o trem Z aguarda o trem K liberar a linha, o trem K, por sua vez, aguarda o trem Y liberar o pátio e, finalmente, o trem Y aguarda que o trem X libere a linha. Portanto, é um ciclo fechado onde um trem espera o outro e que não tem solução em um algoritmo simples. Em uma malha real, um dos trens teria que recuar para o pátio anterior, em uma operação complicada e demorada. O algoritmo não deve permitir que os trens entrem nesta situação.

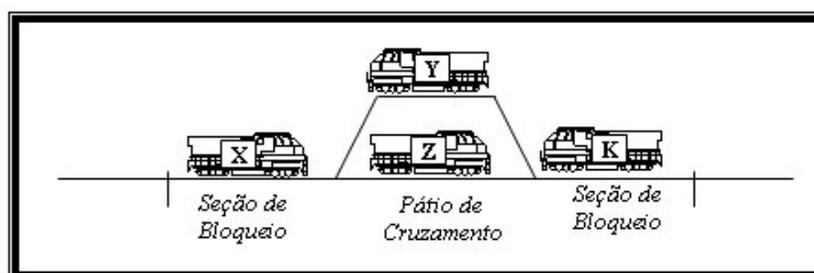


Figura 5.8 – Situação de travamento

VI) No pátio imediatamente posterior ao pátio-objetivo não há nenhum trem vindo em sentido inverso, ou este trem tem prioridade de avanço menor que a do trem atual. Esta condição impede o avanço deste trem em detrimento do outro mais prioritário.

Se alguma destas condições não for satisfeita, o trem aguarda que todas elas sejam atendidas. Se todas foram satisfeitas, segue para o passo 3.2:

Passo 2.3: Linha é singela e há um ou mais pátios de cruzamento entre o pátio atual e o pátio-objetivo:

Neste caso, a restrição no caminho é maior, pois o trem deve percorrer uma seqüência de pátios onde ele não pode realizar uma parada. A possibilidade de conflito com outro trem em sentido contrário é maior que na situação anterior. Portanto, as seguintes condições precisam ser satisfeitas:

I) O sentido de todas as linhas do pátio atual até o pátio-objetivo estão reservados no mesmo sentido para onde vai o trem, ou o sentido não está reservado;

II) Se a linha é sinalizada, a seção de bloqueio seguinte deve estar livre. Se a linha não é sinalizada, o pátio-objetivo e a linha devem estar livres;

III) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio seguinte, verifica se há linha de atividade disponível, ou linha de espera (Algoritmo de Atividade);

IV) Se ele necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, é feita a verificação se há locos disponíveis na quantidade necessária, consultando a frota dedicada a este trecho (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

V) A soma dos trens do mesmo sentido, entre o pátio onde está o trem e o próximo trecho reservado para sentido contrário, é menor que a quantidade de pátios de cruzamento entre estes dois pontos. Se esta condição não for atendida, o trem não deve avançar, sob o risco de provocar travamento como o mostrado na Figura 5.8. O algoritmo não deve permitir que os trens entrem nesta situação.

VI) No pátio imediatamente posterior ao pátio-objetivo não há nenhum trem vindo em sentido inverso, ou este trem tem prioridade de avanço menor que a do trem atual.

Se alguma destas condições não for satisfeita, o trem aguarda que todas elas sejam atendidas. Se todas foram satisfeitas, segue para o passo 3.3:

Passo 3: Reserva do caminho:

Atendidas as condições do passo 2, o trem precisa reservar o caminho, para evitar que trens em sentido contrário venham ao seu encontro, e que trens no mesmo sentido avancem para a sua posição.

Passo 3.1: Linha Dupla

I) Se a linha é sinalizada, reserva apenas a seção de bloqueio seguinte. Se a linha não é sinalizada, reserva o pátio-objetivo e a linha;

II) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio seguinte, reserva a linha de atividade correspondente. Caso essa linha esteja ocupada, ocupa uma linha de espera (Algoritmo de Atividade);

III) Se ele necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, reserva a quantidade de locos necessárias para o seu avanço (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

Realizadas as reservas, o trem libera o pátio atual e segue para o passo 4:

Passo 3.2: Linha é singela e o pátio-objetivo é o próximo pátio da rota:

I) Reserva o sentido da linha para o sentido do trem;

II) Se a linha é sinalizada, reserva apenas a seção de bloqueio seguinte. Se a linha não é sinalizada, reserva o pátio-objetivo e a linha;

III) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio seguinte, reserva a linha de atividade correspondente. Caso essa linha esteja ocupada, ocupa uma linha de espera (Algoritmo de Atividade);

IV) Se necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, reserva a quantidade de locos necessárias para o seu avanço (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

Realizadas as reservas, o trem libera o pátio atual e segue para o passo 4:

Passo 3.3: Linha é singela e há um ou mais pátios de cruzamento entre o pátio atual e o pátio-objetivo:

- I) Reserva o sentido de todas as linhas entre o pátio atual e o pátio-objetivo para o sentido do trem;
- II) Se a linha é sinalizada, reserva apenas a seção de bloqueio seguinte. Se a linha não é sinalizada, reserva o pátio-objetivo e a linha;
- III) Caso tenha que realizar alguma atividade no pátio-objetivo, reserva a linha de atividade correspondente. Caso essa linha esteja ocupada, ocupa uma linha de espera (Algoritmo de Atividade);
- IV) Se necessita de locos auxiliares para vencer o trecho, reserva a quantidade de locos necessárias para o seu avanço (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);

Realizadas as reservas, o trem libera o pátio atual e segue para o passo 4:

Passo 4: Determina o tempo de movimentação e realiza o deslocamento:

Neste passo, o trem realiza o sorteio do tempo de movimentação conforme a ocorrência ou não de contingência na via e inicia o seu movimento.

- I) Verifica se uma contingência de **via** deve acontecer para este movimento (Algoritmo de Contingências). Se houver contingência, seleciona o tempo correspondente conforme o tipo de trem e o trecho trafegado. Se não houver contingência, seleciona o tempo conforme o tipo de trem e o trecho trafegado;
- II) Se a linha não for sinalizada, o trem realiza o movimento por toda a linha de uma só vez, alcançando o pátio seguinte. Se a linha é sinalizada, ele avança uma seção de bloqueio por vez, sempre verificando se a seção seguinte está liberada e ocupando-a antes de prosseguir, liberando a seção anterior. Quando chega na última seção de bloqueio, verifica se o pátio está livre e, caso esteja, o ocupa e realiza o último movimento até ele;

III) Se há um ou mais pátios entre o atual e o pátio-objetivo, o trem libera o trecho anterior (ou seção de bloqueio) e, caso seja o último trem a deixar a linha, retira a reserva de sentido, deixando a linha com o sentido liberado. Então retorna ao passo I e repete a operação até que o pátio-objetivo seja alcançado.

Para fins de simplificação, será assumido que as seções de bloqueio são iguais. Portanto, no caso de linhas sinalizadas e com mais de uma seção de bloqueio, independente da ocorrência ou não de contingência de via, o tempo de percurso de uma seção de bloqueio é dada pelo tempo sorteado dividido pela quantidade de seções de bloqueio. Assim, se o tempo de percurso em uma linha com 3 seções de bloqueio é 90 minutos, o trem percorrerá cada seção de bloqueio em 30 minutos.

Passo 5: Preparação para o próximo movimento:

Antes de recomeçar o algoritmo de movimentação para alcançar o próximo pátio-objetivo, o trem executa todos os seguintes passos:

- a. Libera a seção de bloqueio de onde saiu, e também a linha, no caso de não sinalizada.
- b. Verifica se foi o último trem a sair da linha (nenhum outro trem está na linha em movimento no mesmo sentido) e libera o sentido da linha, de forma que possa ser usada por outro trem em sentido contrário;
- c. Verifica se o trem chegou em um pátio de desanexação de auxílios e os libera, caso esteja ocupando algum (Algoritmo de Locomotivas Auxiliares);
- d. Verifica se uma contingência de **pátio** deve acontecer nesta posição, devido a falha de locomotiva. Neste caso, o trem aguarda este tempo ocupando a linha (Algoritmo de Contingências).
- e. Verifica se é o seu destino final. Caso afirmativo, segue o procedimento descrito no algoritmo de representação dos terminais;

- f. Retorna ao passo 1 para continuar se deslocando pela malha.

5.5.2 – Demonstração do Algoritmo de Movimentação

Para confirmar a validade do algoritmo de movimentação, foram verificadas conceitualmente algumas situações. Considerando a linha experimental mostrada na Figura 5.9, têm-se os seguintes casos de conflito:

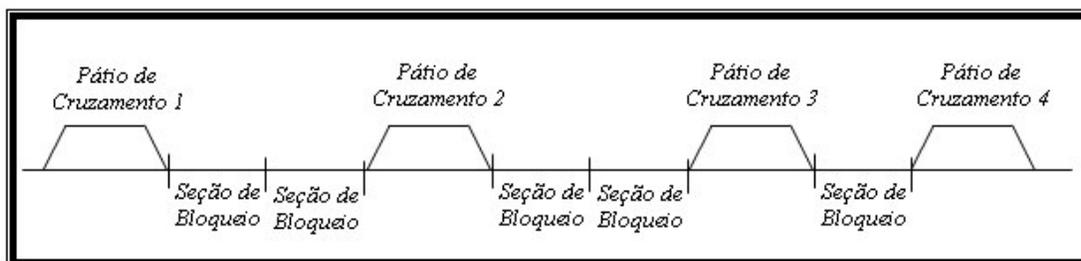


Figura 5.9 – Linha experimental

Caso de conflito 1: Dois trens se movendo em direções opostas ao encontro um do outro

Quando se movendo de direções opostas, os trens irão se encontrar em algum local da linha, e um deles deverá esperar em um pátio de cruzamento até que o outro passe. Esta é uma situação de conflito simples que deverá ocorrer com grande frequência no modelo

O trem Y chega no pátio 3 momentos antes que o trem X chegue no pátio 2. Portanto, ele seque os passos 1 e 2 do algoritmo, encontrando o caminho até o pátio 2 totalmente livre. Com o passo 3, o trem Y reserva a linha entre os pátios 2 e 3 e prossegue para o passo 4 (inicia o movimento).

Ao mesmo tempo, o trem X checa a linha (passos 1 e 2) e encontra a linha bloqueada (pelo trem Y). Portanto, ele ficará esperando até que as condições do passo 2 sejam satisfeitas. Isto irá acontecer apenas quando o trem Y chegar até o pátio 2 e liberar a linha. Este exemplo é mostrado na Figura 5.10.

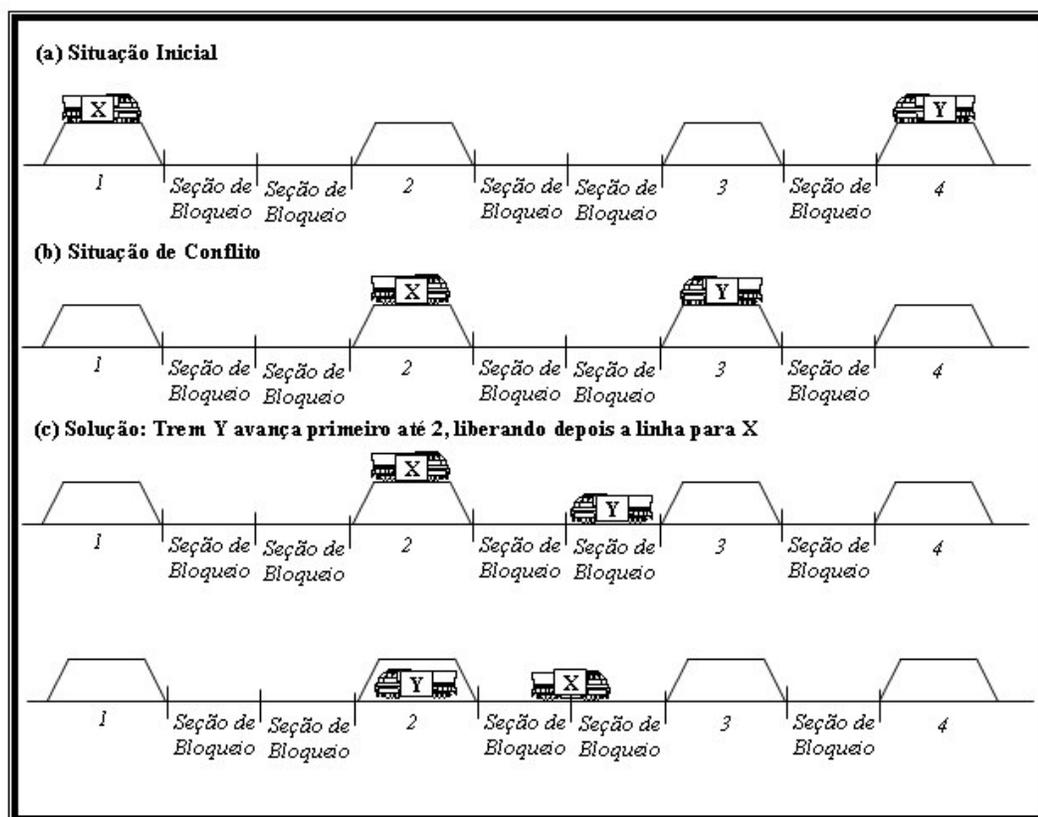


Figura 5.10 – Resolução do conflito 1

Caso de conflito 2: Dois trens se movendo na mesma direção e um trem vindo pela direção oposta

Similar ao caso 1, esta situação é um pouco mais complicada, pois os pátios de cruzamento podem receber apenas um trem de cada direção. Isto significa que após o trem Y chegar ao pátio 2, o trem X ficará parado na linha entre os pátios 1 e 2. Nesta situação, o trem Y irá esperar até que a linha seja liberada (passo 2).

Quando o trem Z verifica a linha 2-3, a encontra livre e inicia o movimento, liberando o pátio 2 (passo 4). Neste momento, o trem X encontra a linha livre no pátio 2 e inicia seu movimento, liberando a linha 1-2.

Finalmente, o trem Y encontra a linha 1-2 livre e inicia o seu movimento. Este exemplo está mostrado na figura 5.11.

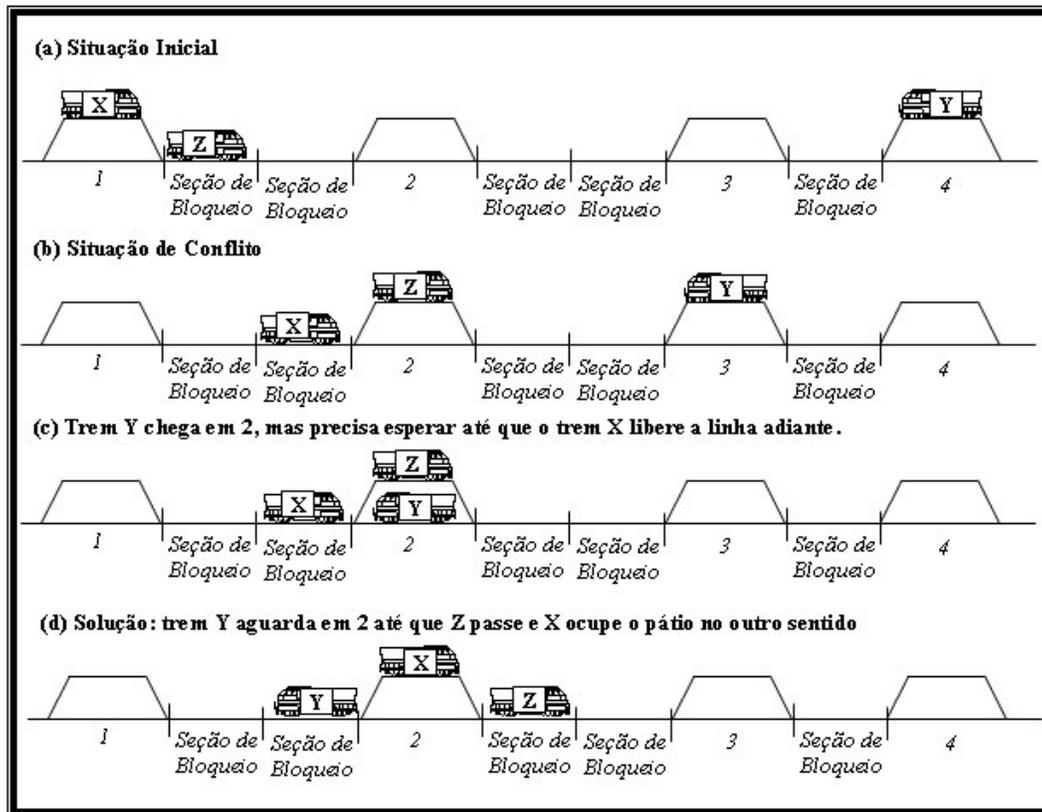


Figura 5.11 – Resolução do conflito 2

Caso de conflito 3: Dois trens se movendo na mesma direção, e dois trens vindo na direção oposta

Este é o pior caso, pois os trens podem criar uma situação como a mostrada na Figura 5.8: um travamento onde cada trem aguarda a liberação do próximo em um ciclo fechado.

Para evitar que esta situação aconteça, o algoritmo usa o item “e” do passo 2. A quantidade de trens vindo na direção oposta é considerada. Portanto, se o trem detecta uma situação de travamento potencial, ele permanece esperando até

que a linha volte a ser livre, evitando os travamentos. A Figura 5.12 mostra como isso é feito.

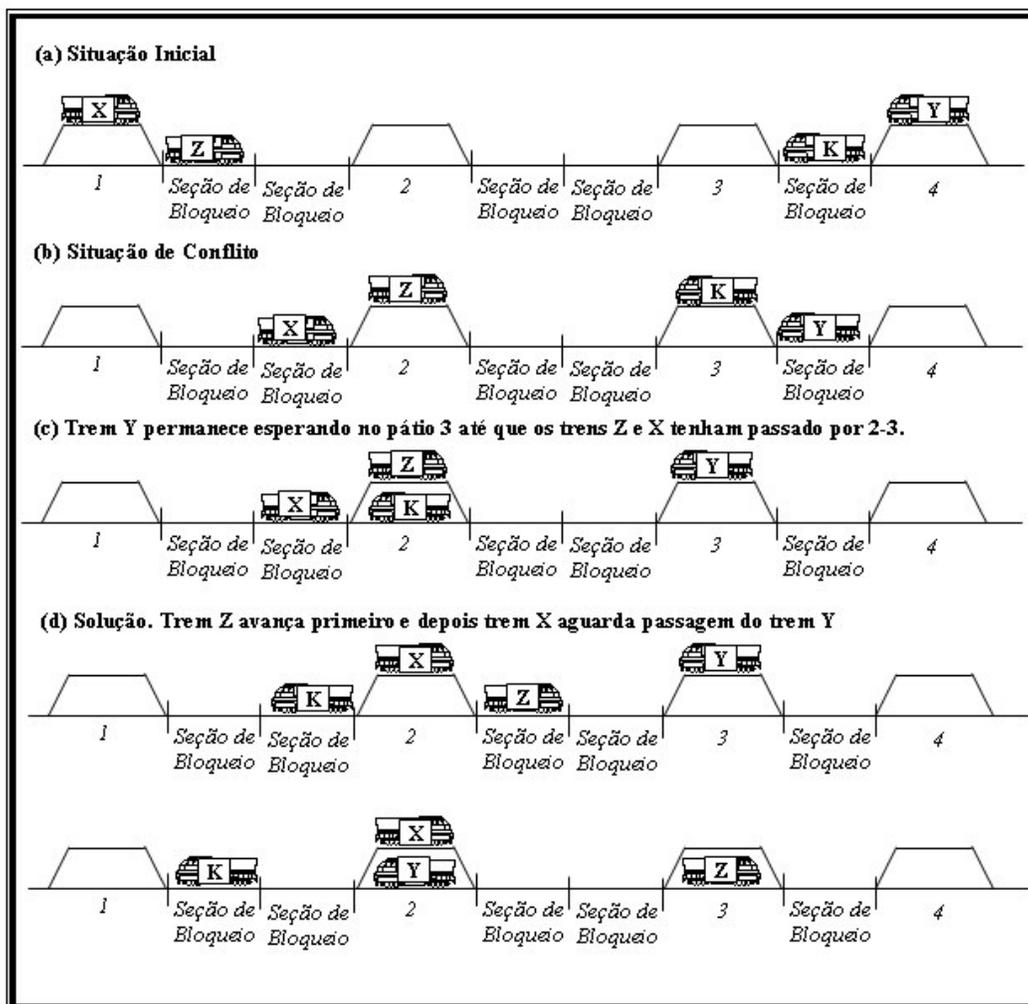


Figura 5.12 – Resolução do conflito 3

5.6 – Algoritmo de Atividades

5.6.1 – Atividades gerais

Durante o percurso, o trem realiza diversas atividades, como reabastecimento, troca de equipe, verificação preventiva, entre outras. Essa

atividade ocorre em um ou mais pátios da rota do trem, entre o pátio de origem e o de destino.

Sua representação é feita através de uma espera simples. Assim, quando o trem alcança o pátio-objetivo (do algoritmo de movimentação) e há uma atividade programada para este pátio, o trem sorteia um tempo de espera e permanece ocupando o pátio de atividade (que foi ocupado no passo 3 do algoritmo de movimentação). Caso o pátio não tenha linha de atividade, o trem permanece parado ocupando a linha de trânsito, interferindo no movimento de outros trens.

Terminado o tempo de atividade, o trem retoma o algoritmo de movimentação e, no passo 3, libera a linha de atividade ou de trânsito.

Este item é válido para todos os trens, tanto os de ciclo como os diretos.

5.6.2 – Carga ou Descarga

Quando um trem de ciclo alcança o seu destino, ele realiza um sorteio para definir o tempo de carga ou descarga correspondente para toda a composição, dependendo do pátio. A linha de carga ou descarga foi ocupada durante o passo 3 do algoritmo de movimentação.

Cumprido o tempo da operação, o trem muda o seu estado de carregado para vazio (se efetuou descarga) ou de vazio para carregado (se foi carregado) e executa o algoritmo de inserção de trens na malha para continuar o seu movimento.

Os trens diretos não realizam atividades de carga ou descarga, sendo simplesmente desmembrados ao chegar no pátio de destino.

5.7 – Algoritmo de Locomotivas Auxiliares

Este algoritmo funciona em combinação com o algoritmo de movimentação. Determinados trechos da malha exigem que os trens mais pesados

a percorram com locomotivas adicionais anexadas a ele, as locomotivas auxiliares.

5.7.1 – Uso das Locomotivas Auxiliares

Os trechos de auxílio são definidos como o conjunto de linhas e pátios existentes entre um pátio de início e um pátio de término. Quando um trem carregado cruza o pátio de início no sentido do pátio de término, é feita a verificação se este tipo de trem necessita de auxílio. Trens vazios, por exemplo, geralmente não requerem auxílio.

Se o trem necessita de auxílio, é feita uma consulta à frota local de auxílios (passo 2 do algoritmo de movimentação). Caso não haja quantidade suficiente de auxílios, o trem aguarda a sua chegada.

Quando a frota local de auxílios tem quantidade suficiente de locomotivas, o trem retira desta frota a quantidade que necessita e continua o seu caminho normalmente.

Ao atingir o pátio de término no sentido contrário do pátio de início, é sorteado um tempo de desanexação. O trem permanece no pátio de cruzamento até que as locomotivas sejam desanexadas e depois continua seu caminho (passo 5 do algoritmo de movimentação).

5.7.2 – Retorno das Locomotivas Auxiliares

Ao serem desanexadas no pátio de término, as locomotivas precisam retornar ao pátio de início para atender aos outros trens que chegam. Isto pode ser feito de duas maneiras:

- A locomotiva retorna imediatamente, sozinha, para o pátio de início do trecho, bloqueando o trecho;
- A locomotiva aguarda que outros auxílios cheguem, até que se forme uma composição com determinado número de

locomotivas, que retornam juntas para o pátio de início do trecho;

Para realizar o retorno, a(s) locomotiva(s) auxiliar(es) comporta(m)-se como um trem direto. Ela usa o algoritmo de inserção de trens para retornar à malha, com uma rota que a leve ao pátio de início do trecho, que será o seu pátio de destino (usando o algoritmo de movimentação). Chegando no pátio de início, as locomotivas se somam à frota disponível neste pátio e permanecem esperando um novo trem.

Desta forma, o modelo de simulação representa restrições importantes para o movimento dos trens pela malha, que são:

- O impacto da espera por locomotivas de auxílio no pátio de início
- A interferência das locomotivas auxiliares no trânsito dos trens normais quando estão retornando do pátio final para o inicial.

5.8 – Algoritmo de Contingências

O modelo deve suportar contingências de pátio e de via. Ambos os eventos provocam atraso no movimento do trem.

5.8.1 – Contingência de Pátio

Quando o trem executa o passo 5 do algoritmo de movimentação, é feito um sorteio de probabilidade para a ocorrência ou não de contingência neste pátio. Caso seja sorteada a contingência, é realizado o sorteio do tempo de espera do trem neste pátio. O comportamento é semelhante ao da parada por atividade, com a diferença de que o trem sempre fica em contingência na linha de trânsito, atrapalhando outros trens que eventualmente passem pelo local.

5.8.2 – Contingência de Via

Quando o trem executa o passo 4 do algoritmo de movimentação, é feito um sorteio de probabilidade para a ocorrência ou não de contingência durante o movimento deste pátio para o próximo. Caso seja sorteada a contingência, é realizado o sorteio do tempo de movimentação sob contingência, que são tempos mais altos do que os tempos de movimentação normal. Assim, o trem realizará o movimento normalmente, mas em um tempo superior ao normal para este trecho.

As figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 nas páginas seguintes apresentam o algoritmo de movimentação em formato de fluxograma, detalhando as decisões envolvidas e sua interação com os algoritmos de contingência, auxílios e atividades.

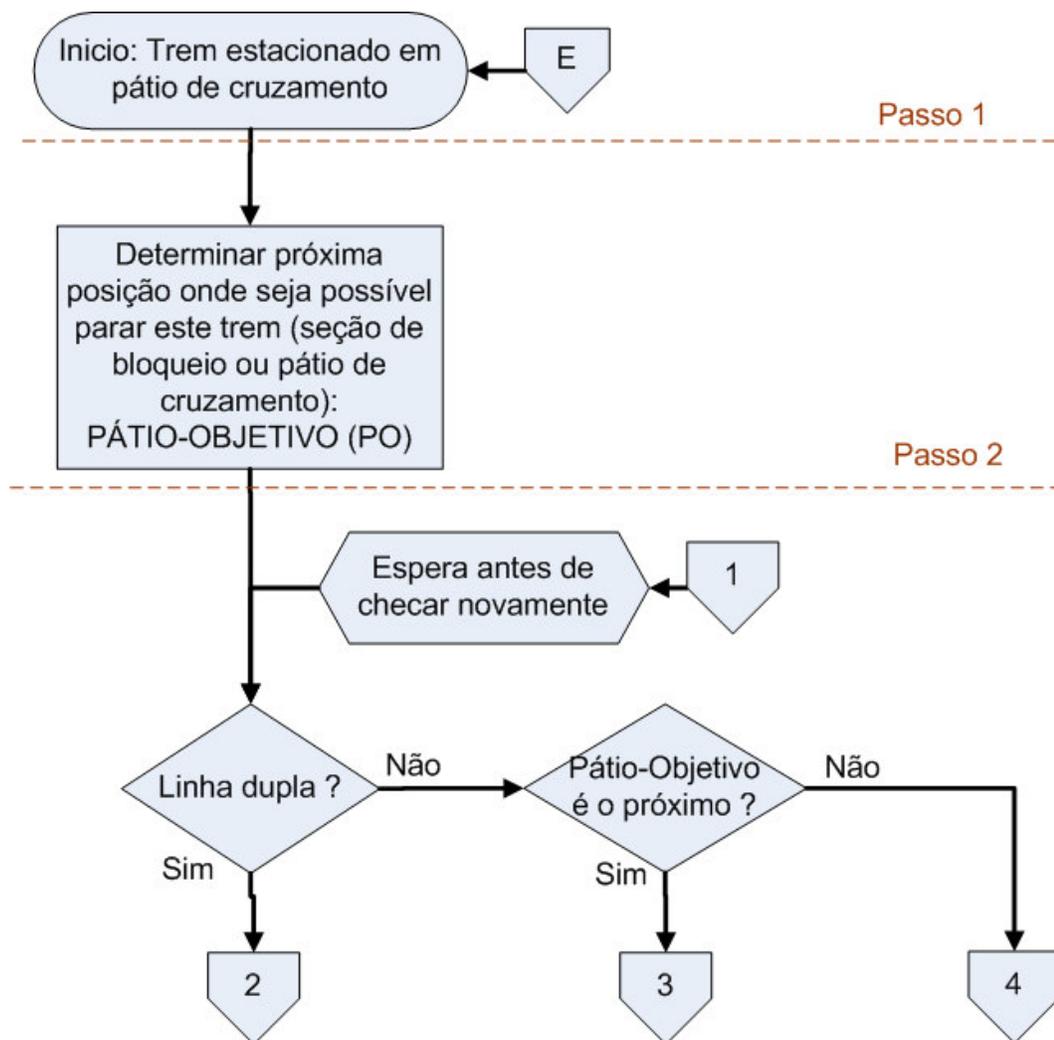


Figura 5.13 – Passo 1 e início do passo 2 do algoritmo de movimentação

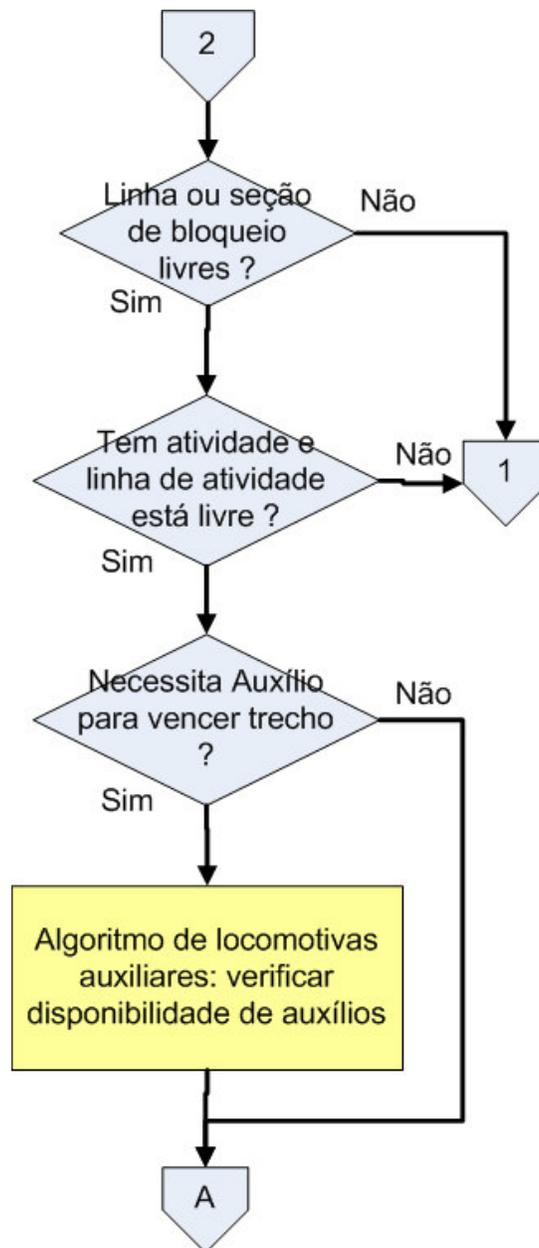


Figura 5.14 – Procedimento para linha dupla

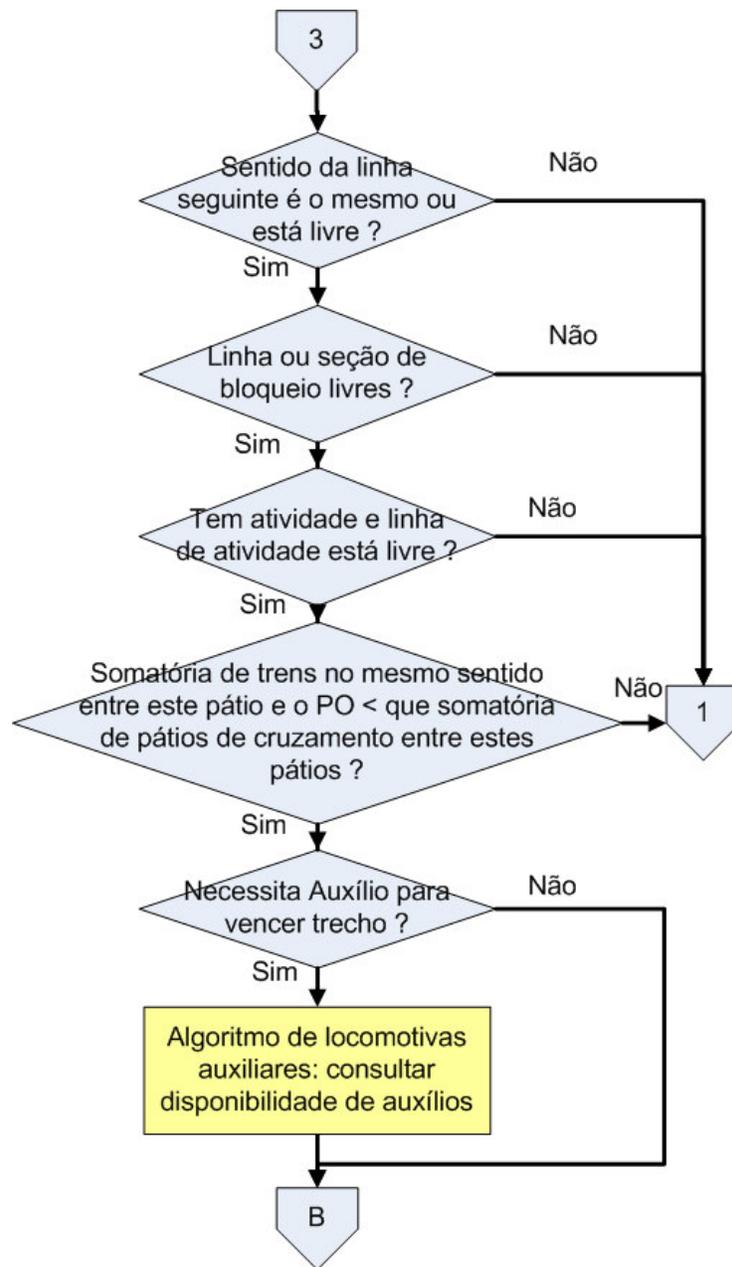


Figura 5.15 – Procedimento para vencer um único trecho em linha singela

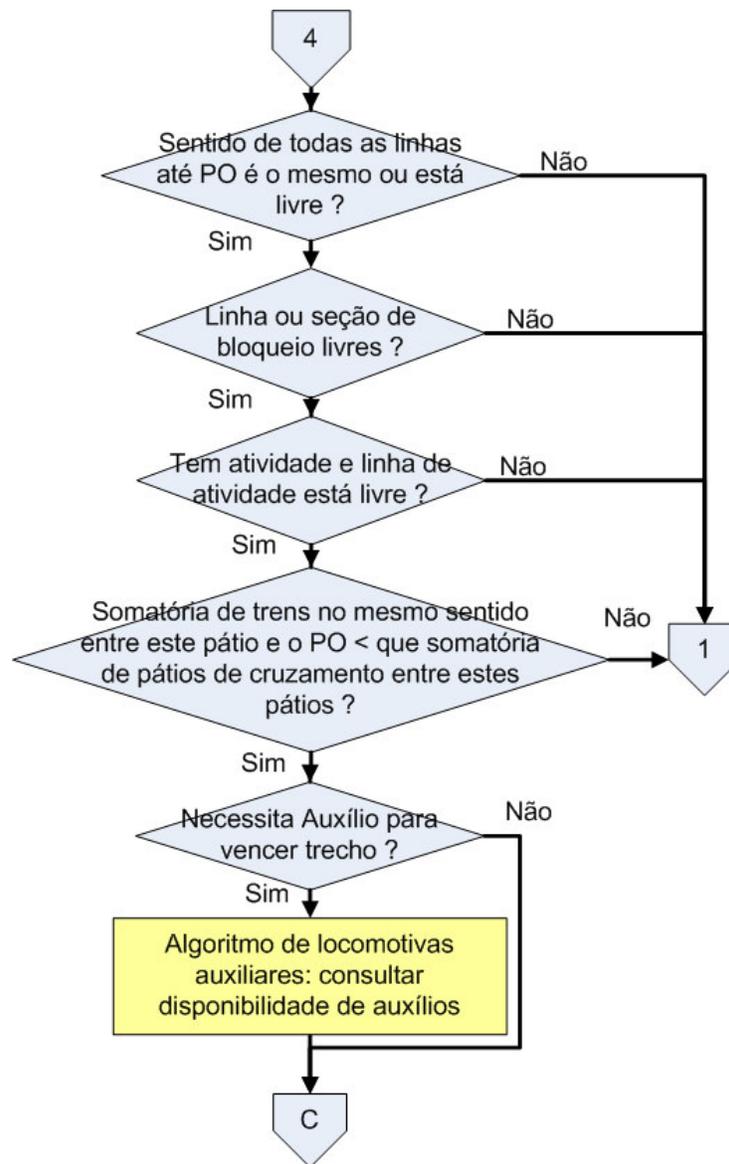


Figura 5.16 – Procedimento para vencer seqüência de trechos em linha singela

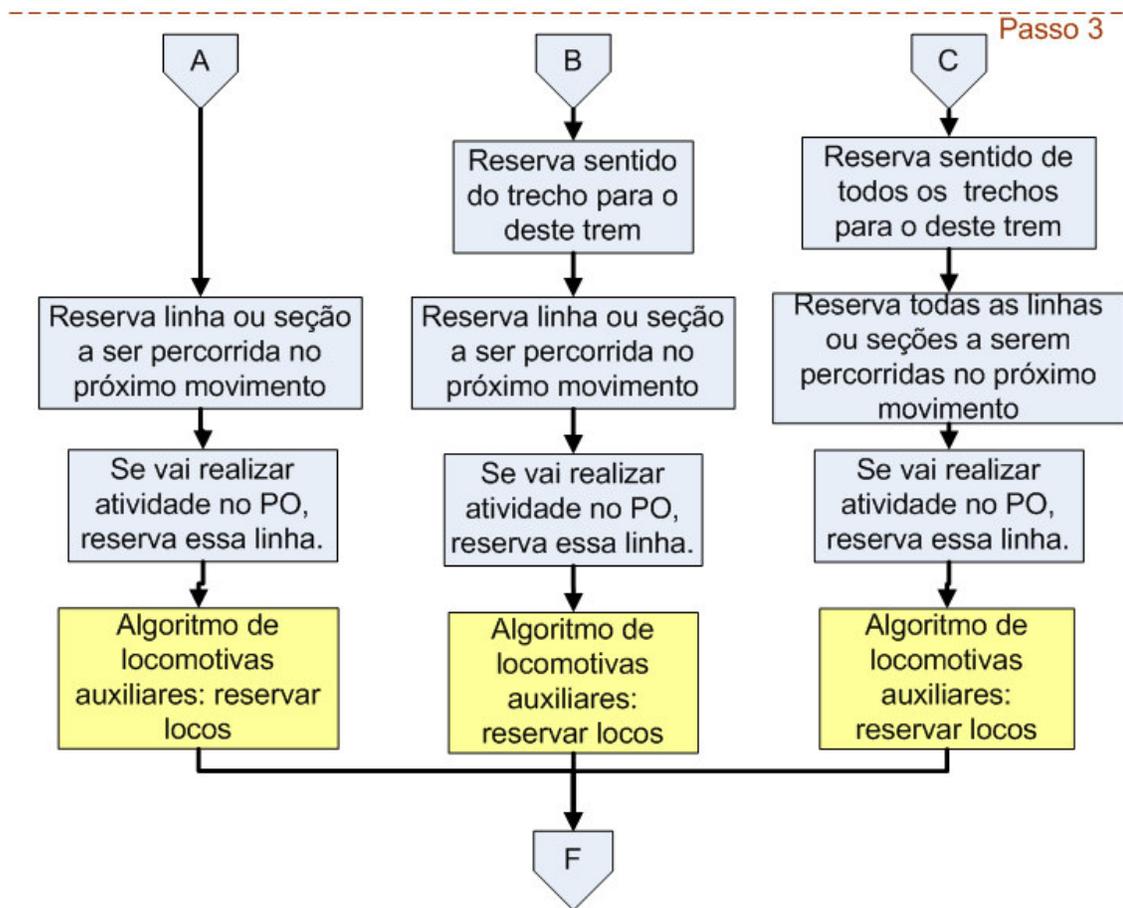


Figura 5.17 – Passo3, que reserva o caminho a ser percorrido

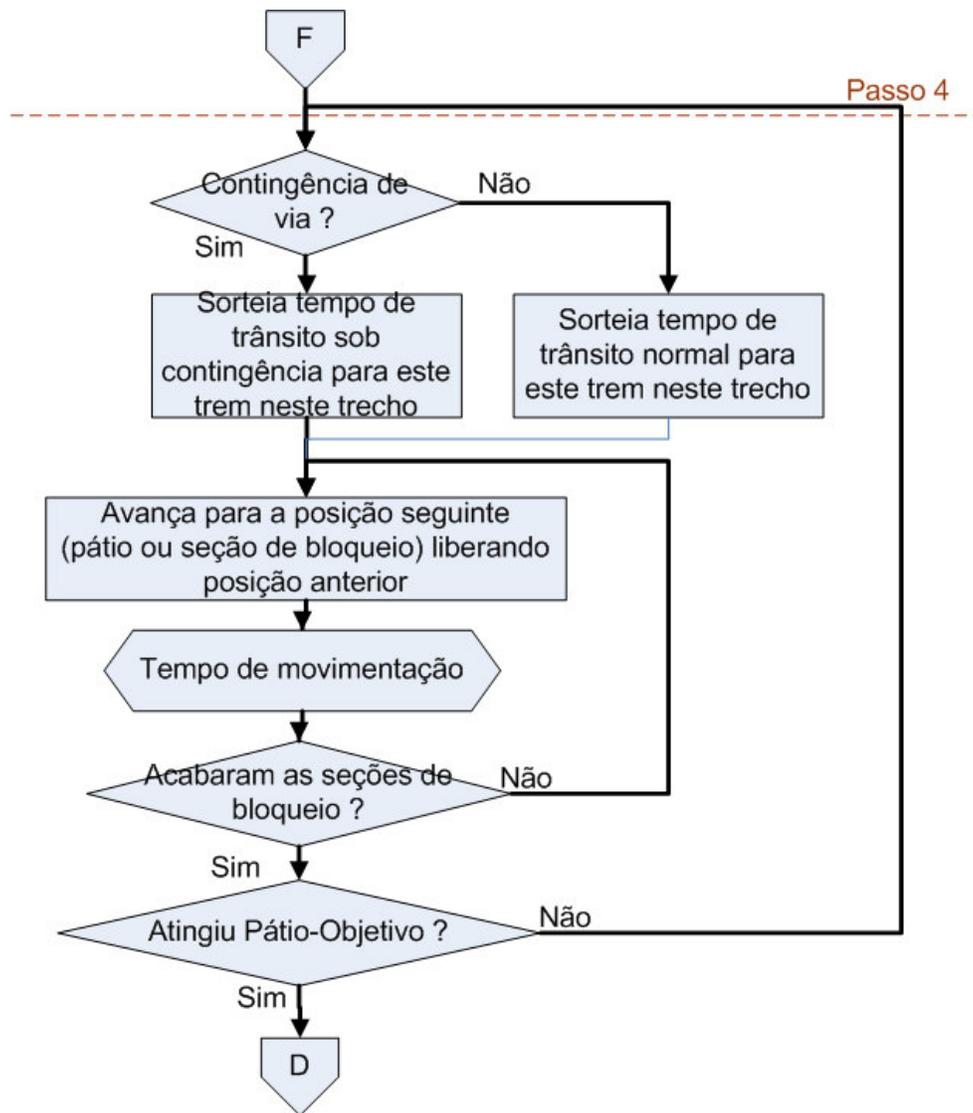


Figura 5.18 – Passo 4, que executa o movimento do trem

Passo 5

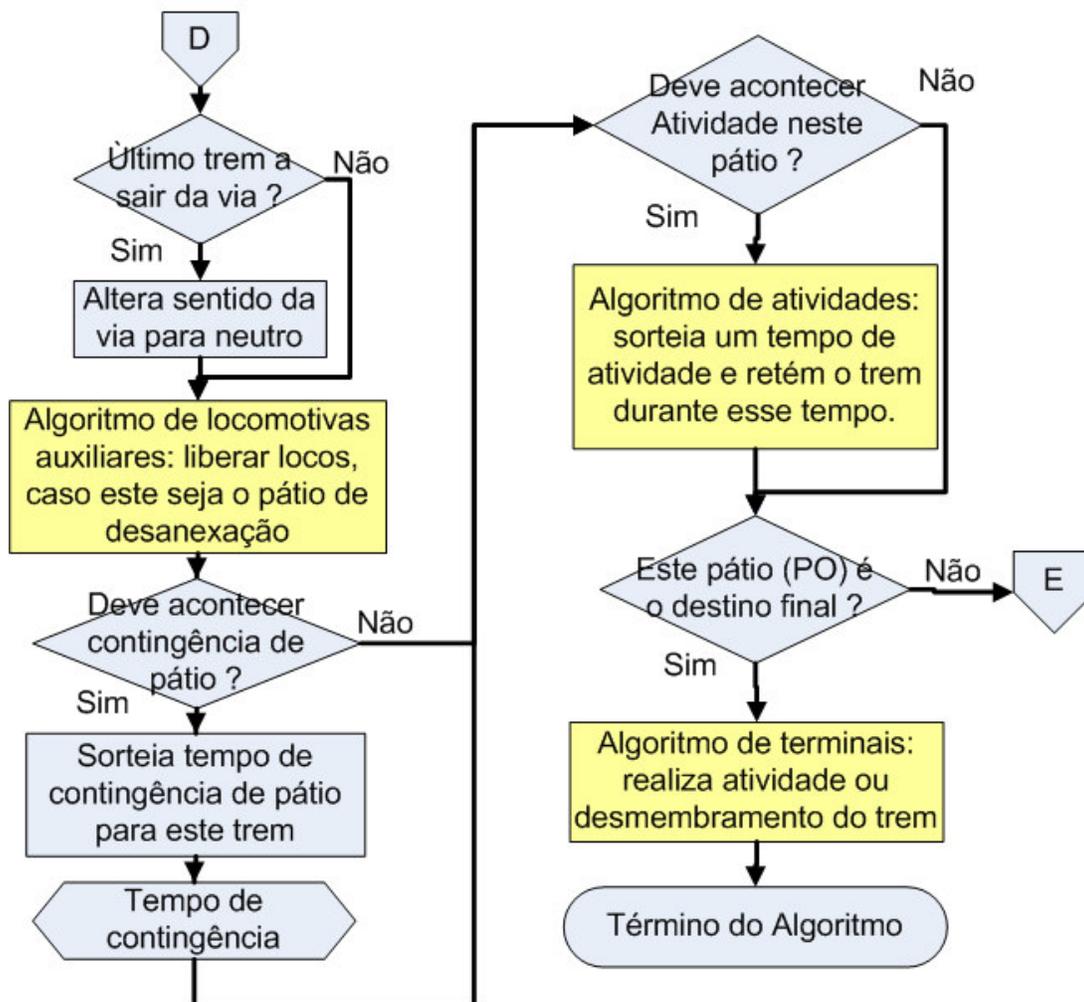


Figura 5.19 – Passo 5, que encerra o movimento

5.9 – Medição dos Indicadores de Desempenho

Esta seção relaciona os indicadores de desempenho a serem registrados pelo modelo, e descreve a forma como cada indicador será calculado.

5.9.1 – Tonelada Útil Gerada (TU) diária

Definição: Somatória do peso dos trens que partiram. Por dia. Segmentada por tipo de trem.

Cálculo: Somar o peso de todos os trens que partiram a cada dia segmentado por tipo, ou seja: serão dois tipos de trem: de ciclo e diretos. Para os trens de ciclo, devem ser contabilizadas apenas as partidas em que estejam carregados, uma vez que o peso da composição vazia não é considerado como tonelada útil.

5.9.2. Tonelada Km-Útil Gerada (TKU) por dia

Definição: Somatória do cálculo (peso*distância percorrida) dos trens que circularam no dia. Segmentada por tipo de trem.

Cálculo: Somar o resultado do cálculo de (peso * distância percorrida) de todos os trens que saíram da malha ou estão ativos, ou seja, que ainda estejam circulando e ainda não chegaram ao pátio de destino.

5.9.3. Quantidade de Carregamentos por dia

Definição: Quantidade de carregamentos iniciados. Apenas para trens de ciclo.

Cálculo: Registrar para os trens de ciclo, quantos carregamentos foram iniciados a cada dia. Contagem de ocorrências.

5.9.4. Quantidade de pares por trecho

Definição: Quantidade de trens que circularam por um trecho em um dia. Definição de “trecho”: linha férrea que faz a ligação entre dois pátios.

Cálculo: Contar quantos trens ocuparam determinado trecho em um dia, registrando separadamente para cada sentido do movimento.

5.9.5. Gráfico de Utilização de Auxílios

Definição: Quantidade de locomotivas auxiliares sendo utilizadas a cada momento, em cada posição da malha. A resolução do gráfico será de dez minutos e seu registro será feito de forma idêntica à do gráfico de locomotivas.

Cálculo: Assim como no gráfico de locomotivas, os valores serão registrados em arquivo texto ou banco de dados, permitindo a montagem de um gráfico de tempo X número de auxílios com a ferramenta apropriada..

5.9.6. Contagem da Chegada de Trens por dia

Definição: Quantidade de trens por tipo que chegaram ao pátio de destino naquele dia. Cada dia deve gerar informações separadas para trens de ciclo vazios, de ciclo carregados, e trens diretos.

Cálculo: Contar quantos trens chegaram ao destino dentro deste dia, para cada tipo. A estatística de cada dia deve ser separada em ciclo vazios, ciclo carregados, e trens diretos.

5.9.7. Quantidade de Operações por dia dos Terminais de Carga

Definição: Quantidade de trens carregados por dia em cada terminal de carga.

Cálculo: Em cada pátio de carga, é feita a contagem de trens que saíram carregados. A apresentação deve ser segmentada por terminal de carga e por dia. Os trens diretos devem ser ignorados.

5.9.8. Quantidade de Operações por dia dos Terminais de Descarga

Definição: Quantidade de trens descarregados por dia em cada terminal de descarga.

Cálculo: Em cada pátio de descarga, é feita a contagem de trens que saíram vazios. A apresentação deve ser segmentada por terminal de descarga e por dia. Os trens diretos devem ser ignorados.

5.9.9. Utilização diária dos Terminais de Carga (%)

Definição: Percentual de utilização por dia de cada terminal de carga.

Cálculo: Os terminais trabalham 24 horas por dia, e não sofrem interrupções por manutenção. Portanto, deve-se contar quantos minutos por dia o terminal fica ocupado e, ao final do dia, dividir este valor por 1440 (total de minutos em um dia). A contagem de minutos é reiniciada para o próximo dia.

5.9.10. Utilização diária dos Terminais de Descarga (%)

Definição: Percentual de utilização por dia de cada terminal de descarga.

Cálculo: Os terminais trabalham 24 horas por dia, e não sofrem interrupções por manutenção. Portanto, deve-se contar quantos minutos por dia o terminal fica ocupado e, ao final do dia, dividir este valor por 1440. A contagem de minutos é reiniciada para o próximo dia.

5.9.11. Contagem de Uso dos Pátios por dia

Definição: Quantidade de vezes que este pátio foi utilizado para uma operação de cruzamento de trens ou outra atividade.

Cálculo: Sempre que um trem parar o seu movimento em um pátio devido a problemas de tráfego (trens em sentido contrário, ou parados adiante) deve ser feito o registro da ocorrência. A contagem deve ser por pátio e por sentido, e é reiniciada para o próximo dia.

5.9.12. Utilização diária de Pátios (%)

Definição: Percentual de utilização por dia de cada pátio de cruzamento. Trata-se do tempo disponível para seu uso (no caso, um dia), e o tempo que ele efetivamente foi utilizado.

Cálculo: Sempre que um trem parar o seu movimento em um pátio devido a problemas de tráfego (trens em sentido contrário, ou parados adiante) deve ser cronometrado o tempo que ele permanece parado. A informação deve ser

segmentada por pátio e por sentido. Ao final do dia, o total de minutos registrado é dividido por 1440. A contagem de minutos é reiniciada para o próximo dia.

5.9.13. Tempo de Ciclo dos Trens

Definição: Aplicável apenas em trens de ciclo. Tempo total que um trem leva para cumprir seu percurso completo, ou seja: carregamento, movimento para pátio de descarga, descarregamento e movimento de volta para pátio de carga.

Cálculo: Serão registrados individualmente cada um dos componentes do tempo de ciclo, ou seja:

- Tempo de carregamento;
- Tempo de percurso até o pátio de descarga;
- Tempo de descarregamento;
- Tempo de percurso no retorno até o pátio de carga.

O tempo de ciclo será a soma das médias destes valores. A informação será segmentada por par origem-destino, sendo a origem o pátio de carga onde é carregado o material, e destino o pátio considerado cliente, ou seja, onde o material é descarregado e consumido. Assim, um pátio de carga pode carregar trens que seguem para vários destinos diferentes, assim como os pátios de descarga podem receber produtos procedentes de diversas origens.

Esta informação é o valor médio de ciclo durante todo o período da simulação.

5.9.14. Tempo de Percurso Trens Diretos

Definição: Aplica-se apenas aos trens diretos. É o tempo total de percurso desde o momento que ele partiu, até o momento em que chegou a seu pátio de destino.

Cálculo: É iniciada uma cronometragem quando o trem direto entra na malha. A medição termina quando o trem chega ao seu destino e deixa a malha.

Esta informação é o valor médio de percurso durante todo o período da simulação.

5.9.15. Tempo de Fila para Carregamento

Definição: Tempo médio em que o trem precisa ficar esperando pela liberação do terminal em pátios de cruzamento, separado por terminal de carga e pátio de espera.

Cálculo: Quando o trem fica parado em um pátio de cruzamento porque a linha de carregamento do seu pátio de destino está ocupada, é feito o registro deste tempo e do pátio onde o trem está esperando.

Esta informação é o tempo médio durante todo o período da simulação.

5.9.16. Tempo de Fila para Descarregamento

Definição: Tempo médio em que o trem precisa ficar esperando pela liberação do terminal em pátios de cruzamento, separado por terminal de descarga e pátio de espera.

Cálculo: Quando o trem fica parado em um pátio de cruzamento porque a linha de descarga do seu pátio de destino está ocupada, é feito o registro deste tempo e do pátio onde o trem está esperando.

Esta informação é o tempo médio durante todo o período da simulação.

5.9.17. Tempo de Fila em Espera por Auxílio

Definição: Tempo médio em que o trem precisa ficar esperando por uma locomotiva de auxílio em pátios de cruzamento, separado por terminal de descarga e pátio de espera.

Cálculo: Quando o trem fica parado em um pátio de cruzamento porque não há auxílios disponíveis no pátio, é feito o registro deste tempo e do pátio onde o trem está esperando.

Esta informação é o tempo médio durante todo o período da simulação.

5.10 – Indicadores Gráficos

Alguns indicadores de desempenho são mais adequadamente apresentados em forma gráfica. O sistema deve ser preparado para gerar as informações necessárias à montagem destes gráficos.

Esta seção relaciona quais indicadores serão preparados para esse formato e como o modelo extrai as informações necessárias do sistema.

5.10.1. Gráfico de Utilização de Locomotivas

Definição: Quantidade de locomotivas sendo utilizadas a cada momento, em cada frota.

Montagem: A resolução do gráfico será de dez minutos. O modelo irá gravar qual a ocorrência máxima de uso de cada frota no período de dez minutos. Os valores serão registrados em arquivo texto ou banco de dados, permitindo a montagem de um gráfico de tempo X número de locomotivas com a ferramenta apropriada..

5.10.2. Gráficos de Cruzamento

Definição: Gráfico que registra o movimento de todos os trens em um trecho determinado da malha, apresentando os conflitos entre eles e o uso dos pátios de cruzamento. Trata-se da ferramenta operacional mais importante para o centro de controle, possibilitando prever conflitos e estudar ocorrências anteriores. A Figura 5.20 apresenta um gráfico de cruzamento real elaborado na MRS Logística, para um dia de atividades em um trecho da malha na região de São Paulo. O gráfico é feito manualmente e a imagem foi obtida fotografando-se o

desenho no dia 20 de outubro de 2004, sendo que o diagrama se refere aos eventos ocorridos na malha durante o dia 19 de outubro do mesmo ano.

O Anexo V apresenta este gráfico ampliado permitindo melhor observação.



Figura 5.20 – Gráfico de Cruzamento real

Na Figura 5.21, também procedente do Centro de Controle da MRS Logística, pode ser observado o registro de um cruzamento entre trens idêntico ao caso de conflito 1, descrito no tópico 5.6.2:

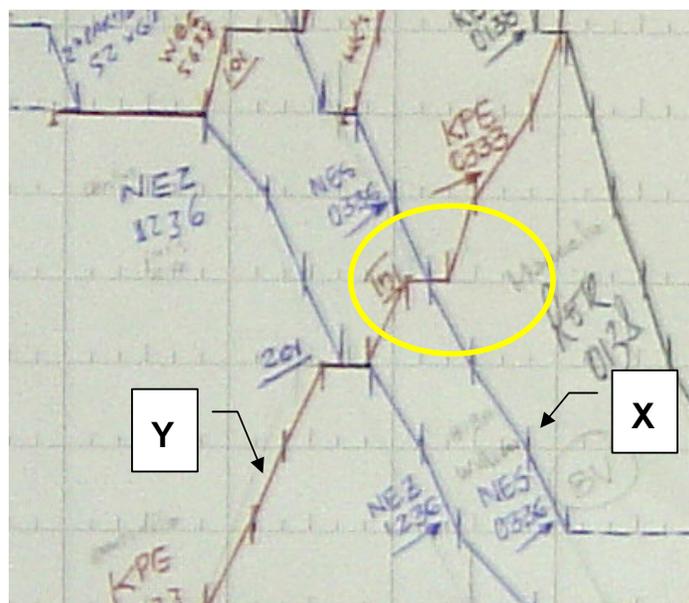


Figura 5.21 – Solução de Conflito entre Trens

Na área circulada da figura, pode-se constatar que havia um trem descendo (linha X) e outro trem subindo na direção oposta (linha Y). Se ambos continuassem o movimento, haveria uma colisão na linha singela entre os pátios.

Para resolver o conflito, um dos trens (o vermelho) interrompeu seu movimento e permaneceu parado no pátio de cruzamento, até que o outro trem passasse. Pode-se observar que o trem da linha azul não interrompe o seu movimento, e que o trem da linha vermelha retoma seu percurso apenas depois que o outro já passou pelo pátio.

Montagem: Neste gráfico, o eixo Y representa os pátios de cruzamento da linha, dispostos na seqüência em que estão na linha, e o eixo X representa o tempo. Cada linha contínua do gráfico representa o movimento de um trem. Assim, para representar o movimento de um trem de um pátio a outro, é feito um traço diagonal ligando as linhas horizontais referentes aos dois pátios. Quanto mais vertical for a inclinação desta linha, menor o tempo usado pelo trem para

percorrer o trecho. Uma linha horizontal contínua representa o trem parado no pátio.

Para que seja possível montar este gráfico, as seguintes informações devem ser extraídas da simulação a cada chegada e saída de trem em um pátio:

- Identificador do trem
- Identificador do pátio
- Data e Hora de entrada neste pátio
- Data e Hora de saída deste pátio.

A resolução do gráfico é de um minuto. Os valores são registrados em arquivo texto, permitindo a montagem do gráfico com uma ferramenta apropriada.

5.11 – Comportamentos específicos

Além dos algoritmos anteriormente apresentados, alguns procedimentos adicionais foram desenvolvidos para atender necessidades específicas do estudo de caso escolhido, e que podem ser adequados também para estudos com outras malhas.

5.11.1. Restrição de horário para circulação em determinados trechos da malha

Em malhas ferroviárias administradas por diferentes empresas, é comum haver acordos de circulação para que os trens de uma empresa trafeguem pela malha da outra. Estes acordos podem restringir horários ou tipos de carga.

Um exemplo brasileiro é a malha administrada pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), que por ser prioritariamente voltada à circulação de passageiros, não permite a circulação de trens de carga durante os horários de maior demanda. Assim, os trens de carga evitam adentrar esta malha durante o horário restritivo. Caso já estejam circulando no momento em que se inicia o horário de restrição, estes trens continuam o movimento até o próximo

pátio e lá permanecem parados, aguardando o horário permitido para continuar circulando.

Por este motivo, incluiu-se uma verificação adicional no algoritmo de movimentação, nos passos 2.2 e 2.3. Esta verificação é a seguinte:

VII – O pátio para onde o trem deve ir não tem restrições de horário, ou tem restrições de horário mas este não coincide com o horário atual.

Verificando esta restrição adicional, o trem permanecerá parado no pátio atual sem avançar para a malha restritiva. Caso ele já esteja na malha restrita, esta verificação acontecerá no pátio seguinte do movimento, bloqueando o trem da mesma forma.

5.11.2. Representação de uma Cremalheira

Em locais de terreno excessivamente acidentado, algumas malhas contam com um equipamento denominado Cremalheira. Este equipamento usa um sistema de engrenagens combinado com locomotivas especiais para auxiliar os trens a vencerem o trecho mais acidentado. Normalmente, este equipamento não é capaz de levar a composição inteira, devendo ser feito o desmembramento prévio do trem em pequenas composições menores.

Neste estudo, o impacto da cremalheira é representado de forma simplificada, através de um tempo de atividade no pátio anterior à cremalheira, e outro tempo de atividade no pátio após a cremalheira.

Estes tempos, somados ao tempo de trânsito do trem pelo trecho, são próximos do tempo real consumido pelo trem ao se desmembrar, percorrer o trecho e ser recomposto depois.

No sistema real, nem sempre o mesmo trem é recomposto com os mesmos vagões, mas este estudo assumirá a premissa de que se trata do mesmo trem no caso dos trens de ciclo, uma vez que mesmo desmembrados, seus vagões são levados para o mesmo destino.

No caso dos trens diretos (que usam a grade), seu comportamento já é previsto na própria grade. Estes trens têm como destino o pátio anterior ou posterior à cremalheira, com tempos de atividade correspondente para desmembramento. No pátio após a cremalheira, a grade já prevê a formação de um novo trem que parte desse local.

Na realidade, a própria cremalheira possui a sua grade de trens que sobem ou descem, mas esta grade não é representada no presente estudo. Apenas o seu efeito em termos de impacto temporal.

Capítulo 6 – Aplicação de Simulação a uma Malha Ferroviária Brasileira

Com o propósito de avaliar os algoritmos propostos e escolher o procedimento de direcionamento mais adequado, selecionou-se uma malha ferroviária brasileira para servir como objeto de estudo, com base na qual será construído o modelo de simulação.

Este capítulo descreve as características da malha selecionada e como suas estruturas foram representadas no modelo. Também realiza os experimentos de validação para determinar o procedimento de direcionamento mais adequado.

Foi selecionada a malha sob concessão da MRS Logística, pelas seguintes razões:

- Sua malha é de razoável complexidade, sendo constituída por linhas duplas, linhas singelas, trechos sinalizados e trechos sem sinalização;
- Em sua malha, circulam trens de carga geral, com comportamento de trens diretos, e também trens de ciclo, que em sua maioria se dedicam a escoar o minério de ferro das

minas localizadas em um extremo da malha (interior do estado de Minas Gerais), para os portos e siderúrgicas, em sua maioria localizados no seu outro extremo (litoral dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro);

- Vários trechos da malha requerem o uso de locomotivas auxiliares para que seja possível o tráfego de trens carregados;
- A malha possui características específicas, como uma cremalheira para auxiliar o tráfego de composições em trecho montanhoso, regras de distribuição de trens de carga entre vários terminais de carregamento, limitação de tráfego em determinados horários em algumas regiões, e etc. Estas características permitirão avaliar a capacidade de integração da ferramenta com o próprio ambiente da linguagem de simulação, o que é necessário quando há alguma personalização a ser feita no modelo;
- A empresa possui um amplo histórico de suas atividades e eventos, bem como as cronometragens de todos os tempos necessários para alimentar o modelo, e indicadores de desempenho para realizar sua validação;
- A empresa gentilmente se colocou à disposição para auxiliar este estudo e ceder todas as informações que se façam necessárias, salvo aquelas estratégicas. Essa autorização está apresentada no Anexo I.

Portanto, supõe-se que se os algoritmos puderem representar esta malha, bastante complexa, e contendo praticamente todos os elementos presentes nas outras, estará apta a representar também as outras malhas brasileiras.

As informações levantadas sobre o funcionamento e estrutura da malha selecionada (MRS), estão apresentadas a seguir.

6.1 – Descrição da Malha da MRS Logística

6.1.1. Informações Gerais da Empresa

A MRS Logística S.A. é a concessionária que opera a chamada Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal S. A., que era composta pelas Superintendências Regionais SR3 - Juiz de Fora e SR4 - São Paulo. Foi constituída em agosto de 1996, assumindo a concessão no dia 1º de dezembro do mesmo ano, após a obtenção por cessão dos direitos adquiridos pelo Consórcio MRS Logística através do leilão de privatização realizado em 20/09/96 na Bolsa de Valores do Rio de Janeiro.

A malha ferroviária operada pela MRS possui extensão total de 1.674 km, sendo 1.632 km de bitola larga (1,60 metros) e 43 km são de bitola mista (1,00 metro/1,60 metros). As linhas férreas operadas pela MRS são predominantemente compostas de linhas singelas.

A empresa possui localização geográfica privilegiada, passando por estados que concentram 67% do PIB brasileiro e interconectando as regiões metropolitanas das cidade de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte e os portos de Santos, Rio de Janeiro e Sepetiba. Suas linhas permitem também o acesso das minas de minério de ferro em Minas Gerais às principais siderúrgicas (CSN, COSIPA, AÇOMINAS e USIMINAS) e aos terminais exportadores (Guaíba – MBR; Sepetiba – Ferteco).

6.1.2. Descrição da Malha

As quatro linhas principais são: a Linha do Centro, a Ferrovia do Aço, a Linha de São Paulo (que juntas pertenciam à antiga Superintendência Regional de Juiz de Fora – “SR-3”), e a Linha Santos-Jundiaí (a antiga Superintendência

Regional de São Paulo – “SR-4”). A SR-3 compreendia linhas entre São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Já a SR-4 cobria a linha de Santos a Jundiaí, no Estado de São Paulo. A malha ferroviária da MRS é interligada com a Ferrovia Centro-Atlântica (“FCA”), a Estrada de Ferro Vitória-Minas (“EFVM”) e a malha da antiga Ferrobán – Ferrovia Bandeirantes SA (“Ferrobán”), oferecendo, com isso, alternativas de transporte para outras regiões do país.

A Figura 6.1, obtida do material de divulgação da MRS, ilustra a localização continental da sua malha. A Figura 6.2 apresenta o mapa da malha. Este mapa está apresentado em tamanho maior no Anexo III

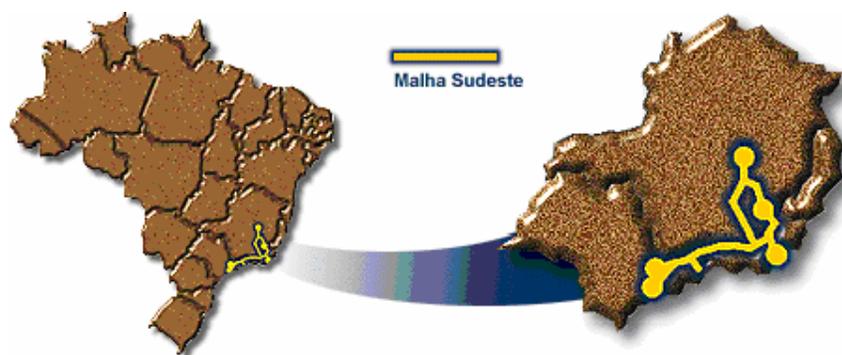


Figura 6.1 –Localização da Malha da MRS Logística

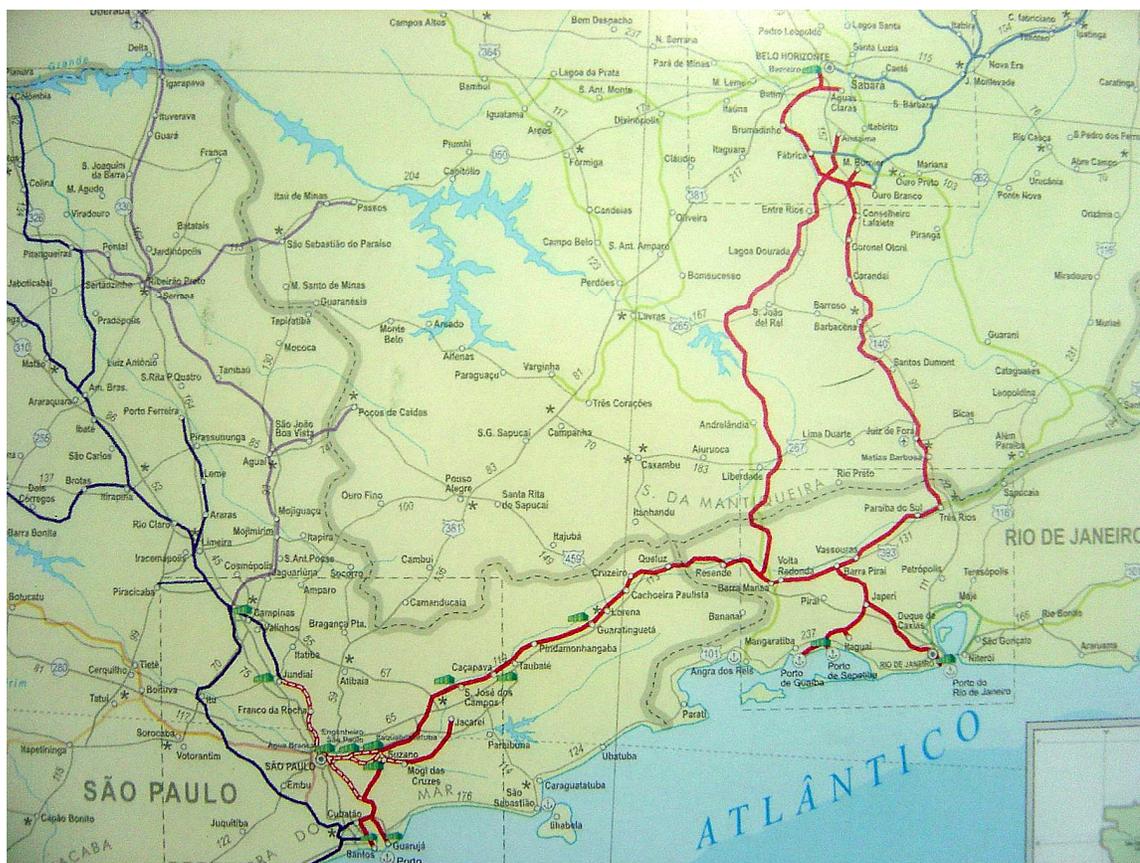


Figura 6.2 – Mapa da Malha da MRS Logística

Linha do Centro: Corre de Belo Horizonte para a cidade do Rio de Janeiro passando por Juiz de Fora, no Estado de Minas Gerais (566 km). Trata-se de uma das mais antigas linhas férreas em operação no Brasil, tendo sido reformada na década de 80. Além de ser utilizada para transportar, até o porto do Rio de Janeiro, produtos siderúrgicos com origem na usina mantida pela CSN em Volta Redonda, e cimento e sucata de Minas Gerais, esta linha também é parcialmente utilizada como via de retorno a Minas Gerais de alguns dos trens vazios que transportam minério de ferro para usinas siderúrgicas e portos localizados no Estado de São Paulo e Rio de Janeiro, através da Ferrovia do Aço.

Ferrovia do Aço: Corre de Andaime, Município de Itabirito, em Minas Gerais, para a localidade de Saudade, Município de Barra Mansa, no Estado do Rio de Janeiro (370 km). Trata-se de uma linha férrea recente, tendo começado a operar em 1989. É a mais movimentada linha da Malha Sudeste, sendo utilizada, basicamente, para o transporte do minério de ferro produzido na região próxima a Belo Horizonte até os portos de Guaíba e Sepetiba, no Rio de Janeiro, e as unidades siderúrgicas da CSN e da Cosipa. O retorno para Minas Gerais dos trens que carregam minério de ferro, conforme referido acima, é freqüentemente realizado por meio da Linha do Centro.

Linha de São Paulo: Está situada entre Barra do Piraí, no Estado do Rio de Janeiro, e a cidade de São Paulo (400 km). Nesta linha está incluído o trecho entre Saudade e Barra do Piraí (45 km), que faz conexão com a Ferrovia do Aço e a Linha do Centro e termina por ser um dos trechos mais movimentados da Malha Sudeste. A Linha de São Paulo é utilizada para o transporte de produtos siderúrgicos, cimento, contêineres e minério de ferro (principalmente para a usina da Cosipa em Cubatão).

Linha Santos-Jundiaí: Corre pelo Estado de São Paulo, de Jundiaí, até o porto de Santos, passando pela cidade de São Paulo (139 km). Esta linha é muito utilizada para o transporte de cargas em geral (tais como grãos e soja) da região agrícola de São Paulo para o porto de Santos, e de contêineres entre o terminal de Jundiaí e os terminais portuários em Santos. A capacidade desta estrada de ferro é em parte limitada devido à necessidade de utilização do sistema de cremalheira, instalado na descida da Serra do Mar, pelo qual, através do uso de locomotivas elétricas e de um mecanismo de tração situado entre os trilhos, é possível fazer com que vagões sejam transportados por um trecho bastante íngreme entre a base e o alto da serra. Ocorre que o sistema de cremalheira, além de ser dispendioso, não suporta volume de cargas muito grande.

Além da ligação com a FCA, EFVM e FERROBAN, a MRS também interage com mais duas ferrovias:

- CPTM (Companhia Paulista de Trens Metropolitanos), mas com restrição de passagem em função da prioridade do trem de subúrbio (faixas de horário para tráfego de cargas);
- SUPERVIA (concessionária que explora as linhas do subúrbio do Rio de Janeiro);

A MRS tem a sua Via Permanente em todas as linhas na bitola de 1600 mm; trilho tipo 68, com exceção das Linhas de São Paulo onde são encontrados trilhos do tipo 57 e todas as linhas com capacidade de carga de 30 toneladas por eixo.

A relação de todos os pátios está apresentada no mapa de pátios da MRS, disponibilizado no Anexo II, onde se pode observar a posição e nome de cada pátio de cruzamento, bem como os pontos de carga e descarga mais importantes.

6.2 – Tipos de Trem em Circulação

A MRS Logística opera 3 tipos de trens, que segundo sua nomenclatura são: Unitário (trens de ciclo), Carga Geral (trem direto) e Expresso (trem direto). A maioria dos trens são monoconduzidos (somente um maquinista) e operam em quase toda a malha, com exceção dos trens que operam no trecho Barreiro (FCA - manobras), Ibitité (trecho de Serra), Serra do Mar (núcleo do RJ), km 64 para Arará, CPTM, Brasil Ferrovias e para trens de produtos perigosos (basicamente combustível para consumo interno).

6.2.1. Trens de Ciclo

Os trens de ciclo, na MRS, recebem o nome de “Trens Unitários”. O trem unitário é dedicado ao transporte de minérios de ferro, carvão, coque,

celulose e areia, com predominância do primeiro. Estes trens unitários têm comportamento equivalente aos trens de ciclo previstos nos algoritmos descritos anteriormente. Para maior clareza do texto desta Tese, eles serão referenciados como trens de ciclo. Esses trens são baseados no conceito de “tabelas”, que são conjuntos de vagões que circulam entre os pontos de carregamento e descarga.

Com base na demanda dos clientes, na posição dos trens no momento da programação e da situação dos terminais de carga, o PCO (Planejamento de Controle Operacional) programa quais os trens que serão direcionados para cada ponto de carga. A programação “tenta” minimizar o tempo de fila das tabelas nos terminais de carga, vislumbrando, também, a situação dos auxílios e terminais de descarga.

Mesmo baseado na programação do PCO, ao chegar ao pátio de código FPK – devido às inúmeras ocorrências a que estão sujeitos os trens (avarias, descarga, tempo de trânsito, etc.) - o trem vazio é distribuído de acordo com o estado de atividade de terminais, situação de filas nos terminais, além de priorização do cliente e demanda. Com estas informações e observando os horários de chegada dos trens, o tempo de percurso até o terminal e o tempo de carregamento de cada terminal, a programação (agora realizada pelo CCO, Centro de Controle Operacional, em “tempo real” quando o trem chega no FPK) distribui os trens.

Existe uma grande flexibilidade nesta distribuição o que, em grande parte, é possível por se tratar de trens com a mesma configuração e por acordos flexíveis com os clientes. A distância e o tempo de carga dos terminais varia bastante. Existem terminais que possuem um baixo tempo de carga e que ficam mais próximos – ou seja, são terminais considerados “produtivos” pela empresa – e terminais cujo tempo de carga é alto e que ficam mais distantes – estes são terminais considerados “improdutivos”. A MRS tenta evitar carregamento nos

terminais com baixa produtividade ao mesmo tempo em que precisa atender às demandas dos clientes.

Os trens que chegam ao FPK entre 17:30 e 18:00 horas são distribuídos ou para TFA (Andaime) ou FCR (Casa de Pedra) para garantir faturamento ainda no dia. Caso não seja possível, os trens podem ser distribuídos para outros terminais – tentando sempre a alocação primeiramente para os terminais de maior produtividade, e em seguida para os de menor produtividade.

O FPK é o “ponto zero” para os trens de minério exportação. O “ponto zero” é a denominação usada pela MRS para identificar a posição onde o trem é informado para qual terminal de carga deve se dirigir. A MRS tem mais dois outros “pontos zero”. Um em FJC (P1-07) para os trens de minério para consumo interno da CSN e COSIPA, e outro em FDM (Joaquim Murtinho) para os trens da Açominas e do Patrag. A lógica de distribuição, entretanto, é a mesma para os outros pontos. Estes pontos zero estão indicados claramente no diagrama de pátios do Anexo IV.

Especificamente no caso da MRS, o ciclo completo do trem está ilustrado na Figura 6.3 a seguir, onde os trechos 1 e 3 são percorridos pelo trem vazio, e o trecho 2 percorrido pelo trem carregado.

Na MRS, a decisão sobre qual é o terminal “ótimo” para enviar o trem é realizado por uma pequena equipe de especialistas, usando como ferramenta de decisão, uma planilha eletrônica, e como fonte de informações, os diversos sistemas computacionais de monitoramento e registro de dados da empresa. Esse é um procedimento essencialmente otimizador e que tem papel importante no sistema.

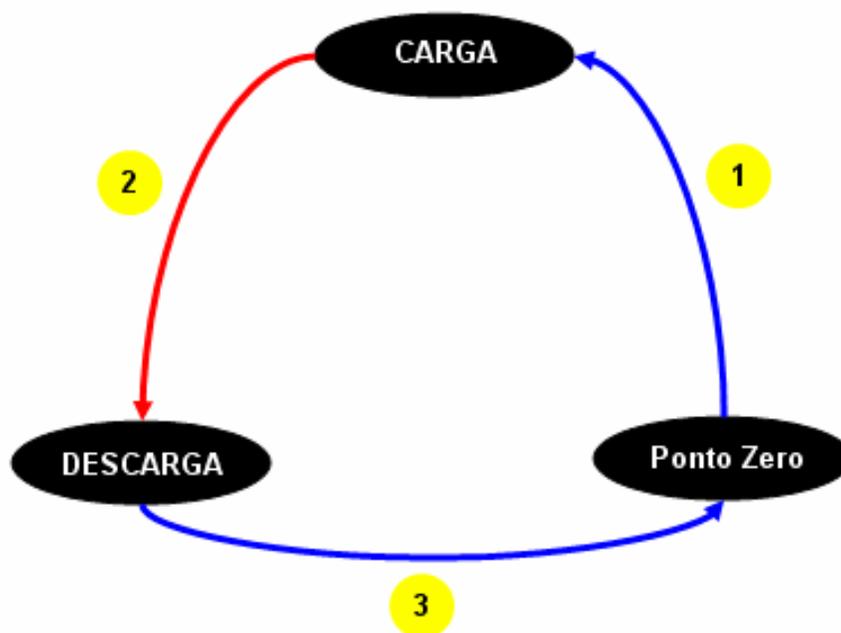


Figura 6.3 – Etapas do percurso dos trens de ciclo

O equacionamento do processo de decisão tomado pela MRS está detalhado adiante.

6.2.2. Trens Diretos (Grade e Expresso)

Os trens de tipo “Grade” são usado para o transporte de todos os materiais exceto aqueles transportados pelos trens unitários (trens de ciclo). Os trens de tipo expresso transportam os mesmos materiais, mas são voltados para o segmento intermodal no qual se requer maior pontualidade no atendimento.

Estes tipos de trem são baseados em uma grade de horários que especifica a hora e o local de partida, os pontos e tempos de parada e uma estimativa da hora de chegada ao seu destino. Todos os trens de carga geral baseados na grade, a princípio partem todos os dias no horário estabelecido pela grade. No entanto, em virtude das anomalias da operação (avarias de locos e vagões, equipagem, cruzamentos, prioridades, etc.) os trens podem atrasar o

horário de partida, ou até mesmo serem suprimidos. A Tabela 6.1 apresenta uma imagem parcial da grade da MRS.

Tabela 6.1 – Exemplo de grade de trens da MRS

| N° | TREM | ORIGEM | | DESTINO | | CHEGADA E PARTIDA NOS PÁTIOS ONDE EXISTE PROGRAMA DE A | | | | | | | | | | | |
|----|-----------|--------|-------|---------|-------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | LOCAL | HORA | LOCAL | HORA | P1-7 | | FOJ | FSE | FCZ | FCT | FSJ | FPE | | | | |
| 1 | KCP 0 | FDM | 09:00 | IEF | 21:00 | 12:00 | 13:00 | 20:30 | 21:00 | 00:30 | 01:30 | 06:00 | 07:30 | 10:30 | 12:00 | 16:00 | 16:30 |
| 2 | KPC | IEF | 16:00 | FDM | 02:00 | FST | FSJ | FCT | FCZ | FVR | FBF | FPE | | | | | |
| 3 | KOD | FBN | 21:00 | ZAL | 12:30 | FBB | FRA | FSJ | IEF | ILA | IJN | | | | | | |
| 4 | KVP | FBB | 06:00 | IEF | 19:45 | FRA | FSJ | | | | | | | | | | |
| 5 | KDO | ZAL | 13:30 | FBN | 00:30 | IJN | IEF | FSJ | FRA | FBB | | | | | | | |
| 6 | KEP 0 | FBO | 23:00 | IEF | 20:00 | P1-7 | FOJ | FBB | FRA | FTA | FSJ | FST | | | | | |
| 7 | KPE 01 | IEF | 07:00 | FBO | 10:30 | FST | FSJ | FTA | FCZ | FBB | FBF | FDT | | | | | |
| 8 | KPE 02 | IEF | 12:00 | FBO | 15:30 | FSJ | FTA | FCZ | FBB | FBF | FDT | FBC | | | | | |
| 9 | KER | FBO | 18:00 | FAR | 10:00 | FDM | FPE | FDT | FPU | HRS | | | | | | | |
| 10 | KCP 1 | FDM | 21:00 | IEF | 21:30 | FPE | FBC | FDT | FPU | FBB | FSJ | FST | | | | | |
| 11 | KMP | ISC | 20:00 | FRA | 11:00 | ISC | ISA | IRG | OSU | FPI | FSJ | FEM | | | | | |
| 12 | KLE / KSE | FBA | 01:00 | FBO | 07:00 | FGD | FBB | FPK | | | | | | | | | |

O trem expresso também é baseado numa grade de horários, e geralmente faz o transporte de contêineres. Esse tipo de trem, em Tese, tem prioridade sobre os demais, a fim de garantir os horários previstos na grade. Estes trens têm o mesmo tratamento em termos de programação que os trens de carga geral. Um exemplo de grade de horários para trens expressos é apresentada na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Grade de Trens Expresso da MRS

| Nº | TREM | ORIGEM | | DESTINO | | CHEGADA E PARTIDA NOS PÁTIOS ONDE EXISTE PROGRAMA DE ATIVIDADE DO TREM - PAT | | | |
|----|-----------|----------------|-------|----------------|-----------------|--|---------------------|----------------------|---------------------|
| | | LOCAL | HORA | LOCAL | HORA | | | | |
| 1 | RER | FBO | 05:00 | FAR | 10:00 | FDT 17:30; 19:30 | FBP 03:00; 05:00 | | |
| 2 | RRE | FAR | 21:00 | FBO | 23:00 | FBP 01:30; 03:30 | FDT 08:30; 10:30 | | |
| 3 | RPL | IEF | 18:00 | FBP | 11:00 | | | | |
| 4 | RLP | FBP | 03:30 | IEF | 17:24 | | | | |
| 5 | XPU | FEN | 20:00 | ICZ | 18:00 | FCA 01:00; 03:00 | IEF 07:00 | ICG 10:00; 11:00 | |
| 6 | XUP | ICZ | 06:00 | FEN | 03:00 | ICG 11:00; 12:00 | IEF 15:30 | FCA* 20:00; 22:00 | |
| 7 | XUP | ICZ | 01:00 | FEN | 19:00 21:00* | ICG 05:00; 06:00 | IEF 09:30 | FCA* 14:00; 16:00 | |
| 8 | BUD | ICZ | 20:00 | IJN | 04:00 | | | | |
| 9 | BDU | IJN | 21:00 | ICZ | 07:00 | | | | |
| 10 | BNK / BUK | ISN IPG ICZ | 02:00 | IOF | 10:00 | | | | |
| 11 | BKN / BKU | IOF | 05:00 | ISN IPG ICZ | 10:00 | | | | |
| 12 | HPN | FSZ | 20:00 | ISN | 06:00 | FCE 21:15; 22:00 | OSU 23:00; 23:30 | IPA 01:30 | IRS 04:30; 04:45 |
| 15 | HNP | ISN | 21:00 | FSZ | 05:30 | IRS 22:30 | IPA 00:00 | ICG 00:30 | OSU 02:15; 02:45 |

Analisando-se as Tabelas 6.1 e 6.2, pode-se constatar que estes trens têm comportamento semelhante, sendo formados no pátio de origem e desagregados ao chegar ao pátio de destino, sendo que todas as suas atividades ao longo do roteiro estão especificadas. Por essa característica de formação-desmembramento, os trens grade e expresso da MRS são considerados no modelo de simulação como trens diretos, e serão denominados para maior clareza nesta Tese, como trem direto grade e trem direto expresso.

6.2.3. Trens de Auxílio

Diversos trechos da malha da MRS são caracterizados por rampas acentuadas, onde os trens precisam de auxílio de locomotivas extras para vencer estas distâncias. No modo atual de operação, as locomotivas de auxílio são acopladas ao final do trem (cauda), de maneira a reduzir o tempo de manobra. Em

termos de redução dos esforços de tração nos engates dos vagões, a maneira ideal de operação dos auxílios seria acoplá-los a “2/3” do trem a partir de sua parte frontal. No entanto, este tipo de operação exige manobra das locomotivas de auxílio e pressurização do sistema de freio dos vagões, o que demanda tempo e, portanto, não é realizado.

Os trechos onde os auxílios são necessários, estão indicados na Figura 6.4. O Anexo VI apresenta este mesmo mapa em tamanho maior.

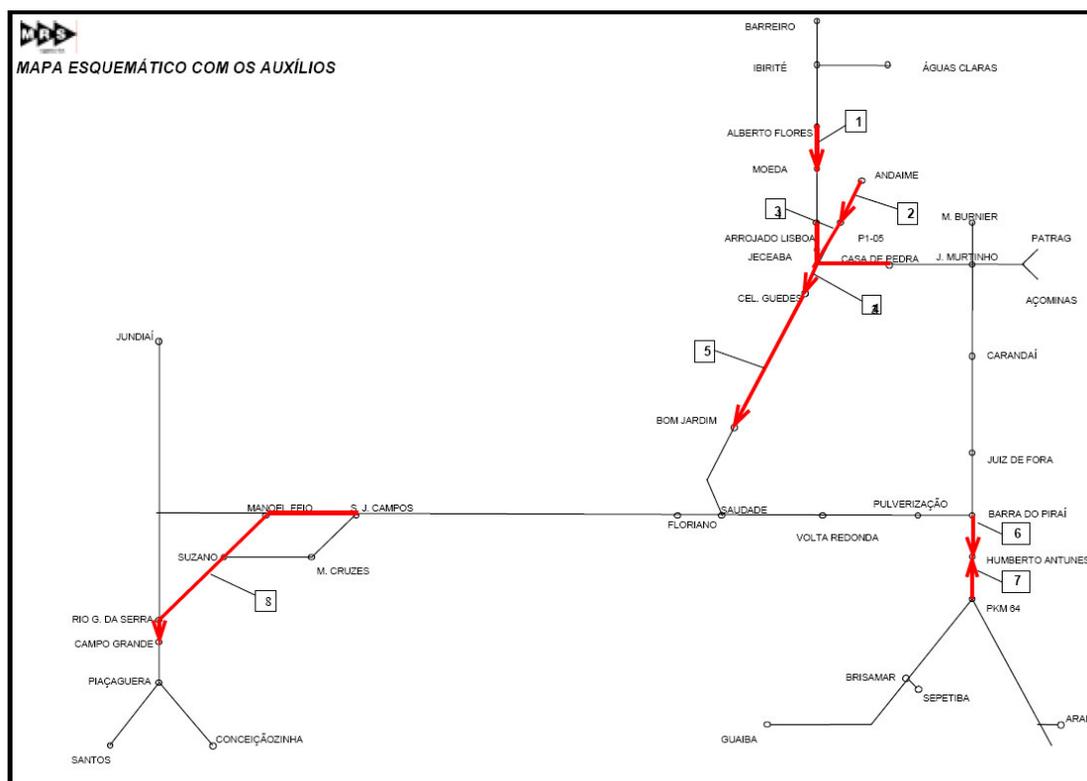


Figura 6.4 – Trechos da malha que requerem auxílio

Nesses trechos as locomotivas extras são engatadas e depois desengatadas, voltando ao ponto de origem do auxílio. A quantidade necessária de locomotivas para tracionar os trens é apresentada na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Quantidade de auxílios por local

| | ORIGEM | DESTINO | CICLO | TIPO | NÚMERO DE AUXÍLIOS |
|---|-------------------------------------|---------------------------------------|----------|------------|--|
| 1 | Pátio do Km 575 (FCC) | Pátio de Marinhos (FMS) | 2 horas | Fixo | 2 auxílios com 2 máquinas |
| 2 | Pátio de Arrojado Lisboa (FAL)* | Pátio de Coronel Guedes (FJC/P1-07) | 2 horas | Fixo | 2 auxílios com 2 máquinas |
| | Pátio de Caetano Lopes (FLP)* | Pátio de Coronel Guedes (FJC/P1-07) | 2 horas | Fixo | |
| 3 | Pátio de Otávio Dapievi (FOO/P1-03) | Pátio de Lagoa dos Porcos (FLO/P1-05) | 2 horas | Fixo | 1 auxílio com 3 máquinas |
| 5 | Pátio de Coronel Guedes (FJC/P1-07) | Pátio de Bom Jardim (FOJ) | 16 horas | Específico | 1 auxílio com 1 máquina + 14 auxílios com 2 máquinas |
| 6 | Pátio de Barra do Pirai (FBP) | Pátio de Humberto Antunes (FHA) | 2 horas | Fixo | 3 auxílios com 4 máquinas |
| | Pátio do Posto Km 64 (FQS) | Pátio de Humberto Antunes (FHA) | 3 horas | Fixo | |
| 7 | Pátio de São José dos Campos (FSJ) | Pátio de Campo Grande (ICG) | 16 horas | Específico | 1 auxílio com 1 máquina |

Os trens de auxílio serão suportados pelo modelo com suas características principais, conforme o algoritmo de locomotivas auxiliares descrito no tópico 5.5.

Já o trecho entre Paranapiacaba (IPA) e Raiz da Serra é caracterizado por uma rampa íngreme. Neste trecho o trânsito é realizado através do uso de um sistema denominado cremalheira, onde as locomotivas a diesel são substituídas por locomotivas especiais (elétricas de cremalheira). Assim que o trem percorre este trecho, ocorre novamente a troca de locomotivas.

A Cremalheira foi construída devido a características topográficas deste trecho, por apresentar uma inclinação elevada de 10% relativa ao desnível entre as regiões das cidades de Ribeirão Pires (IPA) e Cubatão. O sistema é composto por uma linha singela que apresenta entre seus trilhos uma cremalheira – um trilho especial dentado ao longo da linha com largura por volta de 60 cm – por onde circulam locomotivas especiais contendo além de eixos normais um sistema de

engrenagem que se acopla à cremalheira da via, sendo acionado por motor elétrico.

As Figuras 6.5 e 6.6 (Ramos, 2003) permitem visualizar suas características.



Figura 6.5 – Locomotivas descendo a Cremalheira



Figura 6.6 – Início da subida na Cremalheira

O fluxo na cremalheira ocorre em ambos os sentidos envolvendo vagões carregados e vazios. A MRS conta com um ativo de 10 locomotivas HITACHI adaptadas a este sistema sendo que destas apenas 8 estão disponíveis. Destas 8 disponíveis, 6 locomotivas ficam em operação 24 h/dia enquanto 2 vão para manutenção. A Cremalheira deverá ser modelada como uma personalização do modelo, visto que não é uma estrutura comum nas ferrovias em geral, especialmente as brasileiras.

6.2.4. Operação na Malha da CPTM

Os trens operados pela MRS Logística, a partir do Pátio de Engenheiro Manoel Feio (IEF), em direção aos Pátios de Suzano (OSU) ou do Brás (OBR), necessariamente adentram em trecho operado pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM). A partir de Manoel Feio, a MRS passa a ter de operar segundo as condições de compartilhamento acordadas com a CPTM.

Para cada uma dessas direções existem diferentes condições de operação que devem ser observadas pela MRS em seu modo de operação.

Manoel Feio – via Suzano: Ao sair de Manoel Feio, via Suzano, os trens da MRS podem operar nos horários de 9h às 15h30 durante o período do dia e de 21h às 4h durante o período da noite, nos dias úteis. Isto significa dizer que, no período do dia, os trens da MRS podem sair de IEF, via Suzano, a partir de 9h, observando-se que o limite de horário para que o último trem deixe o Pátio de Manoel Feio corresponde a 15h30min. Durante o período da noite, os trens da MRS podem sair de IEF, via Suzano, a partir de 22h, observando-se que o limite de horário para que o último trem deixe o Pátio de Manoel Feio corresponde a 3h30min – o trecho, às 4h, deve estar liberado para a operação da CPTM. Ademais, cumpre ressaltar que o tempo de duração entre IEF e OSU é estimado entre 20min e 30min.

Nos dias de sábado, os trens da MRS somente podem operar no trecho da CPTM, via Suzano, entre 9h e 11h e, depois, a partir das 15h até às 24 h. Nos dias de domingo e em feriados, a operação da MRS no trecho da CPTM é liberada pelo período de 24h. Deste modo, a MRS pode operar das 15h de sábado até as 4h de segunda-feira, ininterruptamente.

Manoel Feio – via Brás: Ao sair de Manoel Feio (IEF), via Brás (OBR), os trens da MRS podem operar nos horários de 10h às 13h30min durante o período do dia e de 22h às 2h30min durante o período da noite, nos dias úteis. Isto significa dizer que, no período do dia, os trens da MRS podem sair de IEF, via Brás, a partir de 10h, observando-se que o limite de horário para que o último trem deixe o Pátio de Manoel Feio corresponde a 13h30min. Durante o período da noite, os trens da MRS podem sair de IEF, via Brás, a partir de 22h, observando-se que o limite de horário para que o último trem deixe o Pátio de Manoel Feio corresponde a 2h30min – o trecho, às 4h, deve estar liberado para a operação da CPTM.

Nos dias de sábado, os trens da MRS somente podem operar no trecho da CPTM, via Brás, a partir das 18h. Nos dias de domingo e em feriados, a

operação da MRS no trecho da CPTM é liberada pelo período de 24h. Deste modo, a MRS pode operar das 18h de sábado até as 2h30min de segunda-feira, ininterruptamente. Estas restrições foram representadas conforme descrito anteriormente no Capítulo 5.

6.3 – Elaboração Parcial da Equação de Direcionamento

Uma vez desenvolvidos os algoritmos, o método adotado propõe o desenvolvimento inicial da equação de direcionamento, onde os fatores que influenciam a decisão são reunidos.

Excetuando-se a opção de direcionamento aleatório, as outras opções de direcionamento analisadas (decisão tomada pelo próprio modelo, e decisão realizada por ferramenta externa) requerem o equacionamento dos fatores de decisão. A equação inicial proposta para o caso da MRS está apresentada a seguir.

Como o objetivo é realizar a maior quantidade possível de carregamentos/descarregamentos de composição, o processo de decisão envolve os seguintes fatores:

- Distância/tempo de trânsito: Terminais mais próximos são mais interessantes, pois podem receber o trem mais rapidamente;
- Tempo de carga: Terminais capazes de carregar o trem em tempo menor são mais interessantes;
- Fila de trens: Deve-se minimizar a formação de fila de espera nos terminais. Portanto, quanto mais trens forem direcionados e ainda estiverem a caminho de um terminal (ou em fila), menos interessante ele se torna;
- Demanda: Cada terminal tem uma demanda que precisa ser atendida. Terminais cuja demanda foi pouco atendida se tornam mais interessantes do ponto de vista de decisão;

- Dedicção do terminal: Devido ao tipo do produto ou características da composição usada, alguns terminais não recebem alguns tipos de trens de ciclo. Portanto, um terminal que não possa receber o trem em questão não deve ser escolhido nunca. Mesmo que seja muito interessante segundo os outros fatores de decisão. Este fator pode ser considerado como uma restrição no processo de direcionamento.

Considerando-se todos estes fatores, a equação inicial proposta é a seguinte:

$$\text{Maximizar : } \left\{ \frac{C1}{tc} + \frac{C2}{td} + \frac{C3}{(Da/Do)} - [900.000 \times (Do = 0)] - (C4 \times Te) \right\}$$

Onde:

tc = Tempo de carregamento no terminal

td = Tempo de deslocamento até o terminal

Da = Demanda Atendida até o momento

Do = Demanda Objetivo

Te = Trens já encaminhados (que ainda não chegaram) ao terminal

$C1$ a $C4$ = Constantes que representam o peso de cada fator na equação, e que serão determinadas posteriormente.

O valor de Do é atualizado no início da simulação, recebendo o valor do número de carregamentos previstos para aquele mês. A cada mês decorrido, Do é incrementado novamente com este valor mensal.

A operação $[900.000 \times (Do=0)]$ serve para impedir a escolha deste terminal caso a sua demanda seja zero. A operação $(Do=0)$ tem resposta binária, e anula o peso de 900.000, caso a demanda não seja zero. Uma demanda zero

significa que os clientes atendidos pelo trem em teste não recebem nenhuma carga deste terminal. Portanto, ele não deve estar entre as opções de escolha do trem. O peso 900.000 garante que qualquer outro terminal que tenha demanda, por mais atendida que esteja, mesmo assim seja mais interessante que este terminal com demanda zero. Este fator da equação é de uso exclusivo pelo modelo em Arena, e será usada para a determinação das constantes e também na opção de direcionamento pelo algoritmo interno do modelo, conforme explicado anteriormente no Capítulo 2.

Na opção de decisão feita por ferramenta externa, o impedimento no uso de terminais sem demanda será representado através de uma restrição.

O valor de Da é atualizado a cada vez que um trem sai carregado do terminal. Ele inicia a simulação com valor zero. O valor de Te é incrementado a cada trem que sai a caminho deste terminal, e só é decrementado quando o trem entra no terminal e inicia o carregamento.

Esta equação de direcionamento é considerada parcial, pois ainda carece das constantes que representam a importância de cada fator no processo de decisão. Estas constantes serão determinadas experimentalmente com uma ferramenta de otimização através do procedimento de validação inicial. Este procedimento requer que o modelo já esteja pronto para poder ser aplicado.

6.4 – O Modelo Computacional

A etapa seguinte do método proposto consiste em fazer a tradução dos algoritmos para um modelo de simulação. Este modelo foi desenvolvido usando-se a ferramenta computacional escolhida, o Arena.

O código do modelo está apresentado no Anexo IX em formato de código SIMAN. O SIMAN é a linguagem de simulação integrada dentro do ambiente do Arena, ambiente este que serve apenas como interface amigável ao

usuário no desenvolvimento do modelo. Este formato de apresentação foi escolhido pois consegue expor todos os parâmetros de cada comando usado.

O Anexo VIII apresenta todas as variáveis usadas no modelo acompanhadas de suas respectivas descrições, e o Anexo VII apresenta todos os atributos usados pelas entidades do modelo.

Para facilitar o entendimento e acompanhar os eventos que ocorrem durante a simulação, foi desenvolvida uma interface animada da malha da MRS. Os elementos básicos desta animação estão apresentados na Figura 6.7.

Por esta figura, podem-se observar as seguintes estruturas:

- “Stations”: São os objetos retangulares. Servem para representar uma posição física do sistema na animação. São usadas para representar os pátios de cruzamento ou outros tipos de pátio;
- “Routes”: Linhas ligando as Stations. Durante a simulação, as entidades aparecem se movendo por estas linhas. Representam no modelo a linha férrea por onde passa o trem. Toda a malha foi construída com a animação de duas linhas paralelas, de forma que se possa representar qualquer parte da malha que tenha linha dupla;
- “Queues”: Ou filas. São os desenhos compostos por duas linhas perpendiculares posicionadas entre as Stations e ao lado delas. Tem como função reter o desenho da entidade quando esta está em espera. Neste modelo, são usadas para representar o trem quando este se encontra parado no pátio ou quando se encontra parado em uma das quatro seções de bloqueio entre os pátios.

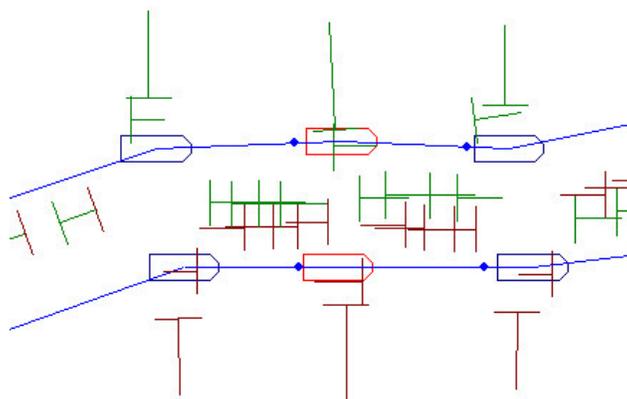


Figura 6.7 – Elementos de animação de um segmento da malha

A Figura 6.8 mostra uma parte da malha durante a simulação (entroncamento do pátio FQS), onde se podem observar os elementos adicionais de cenário, como a representação dos trilhos e o fundo colorido. São elementos apenas estéticos, com o propósito de auxiliar na compreensão do sistema. A Figura 6.9 apresenta o mapa completo da malha na animação do modelo.

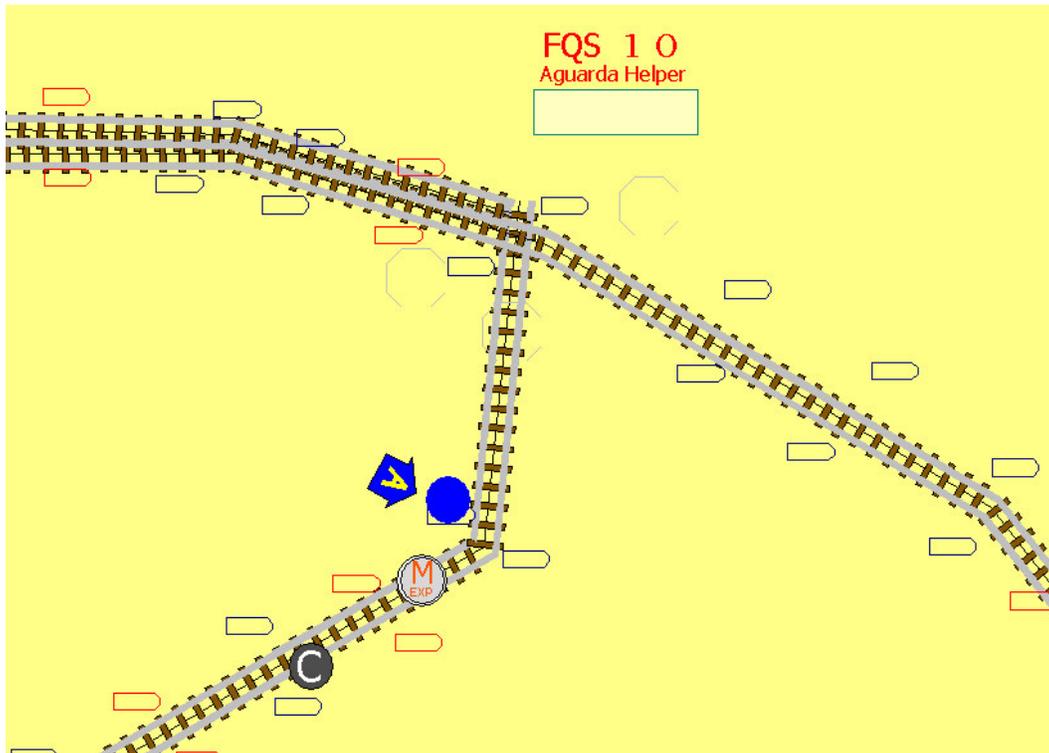


Figura 6.8 – Animação do modelo: Entroncamento de FQS



Figura 6.9 – Animação geral da malha

6.5 – Procedimentos para Validação do Modelo Computacional

A validação consiste em se comparar o modelo simulado com o sistema real, para certificar e mensurar a sua semelhança. Esta comparação deve ser feita segundo critérios claros. Deve-se determinar o melhor indicador e o critério adotado para a comparação.

6.5.1. Escolha do Indicador de Validação

A escolha do indicador para validar o modelo contou com o auxílio da própria MRS na orientação sobre sua representatividade, e na mensuração do sistema. Decidiu-se adotar como indicador principal a Tonelada Útil Gerada (TU), descrita anteriormente no Capítulo 5.

A própria empresa adota a TU como seu indicador de desempenho principal.

Segundo a MRS, este é um indicador seguro, pois sua conformidade revela que o sistema está realmente realizando o transporte de carga previsto. Como segurança adicional, decidiu-se comparar individualmente as TUs dos clientes principais da MRS. Esta medida tem como finalidade garantir que a composição da TU global esteja sendo feita corretamente.

A TU será adotada também como indicador de comparação do desempenho entre cenários dos experimentos simulados.

6.5.2. Critérios de Validação

Decidiu-se medir o indicador TU em base diária, à semelhança do que se faz na própria MRS. Optou-se por usar dados referentes ao mês de outubro de 2004, pois foi um período de funcionamento típico da malha, sem ocorrências excepcionais que interferissem nos indicadores da operação. Nesse mês, a empresa produziu uma média diária de 250.735,27 toneladas úteis. Deseja-se que o modelo permaneça em $\pm 10\%$ desse valor. O valor de 10% foi escolhido arbitrariamente, sendo um valor considerado adequado para a maioria dos estudos com simulação.

A duração do período de aquecimento do modelo deve ser determinada experimentalmente, mas espera-se que permaneça próxima de 3 a 4 dias, que é o tempo necessário para que o modelo coloque em circulação todos os trens de ciclo previstos.

O número de replicações (dias) simuladas será determinado conforme instruído por Freitas (2001), para uma confiança de 90%. Este procedimento é feito comparando-se o semi-intervalo h com 10% do valor da média. O semi-intervalo h é calculado por:

$$h = t_{n-1, 1-\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Onde:

S é o desvio padrão da amostra

n é o tamanho da amostra

$t_{n-1, 1-\alpha/2}$ é o valor tabulado para o grau de liberdade (α) desejado.

Esta tabela também é fornecida por Freitas (2001).

Portanto, o número de replicações será suficiente quando:

$$h_{90\%} < \frac{S}{10}$$

6.5.3. Validação Inicial

Uma vez que o procedimento de validação inicial por otimização tem por finalidade determinar os últimos parâmetros que faltam para completar o modelo, este precisa ser aplicado antes que se analisem os critérios apresentados no tópico anterior. Entretanto, a validação por otimização também necessita do número de replicações para que seu resultado seja adequado.

Para solucionar esta questão, será realizada a validação por otimização inicialmente com um tempo arbitrário, para que se obtenham os parâmetros de peso da equação de direcionamento.

Estes valores serão posteriormente inseridos no modelo e o mesmo será validado conforme os critérios apresentados no tópico anterior, com eventual ajuste na quantidade de replicações.

Caso haja dificuldade em se encontrar um número de replicações adequado para a margem de erro desejada, o experimento de validação inicial por otimização será feito com número maior de replicações.

Este procedimento se repetirá até que os valores encontrados pela validação inicial proporcionem resultados adequados segundo os critérios do tópico anterior.

6.6 – Cenário de Validação

As informações coletadas junto à MRS para uso no modelo estão descritas nas seções seguintes.

6.6.1. Dados dos pátios

As informações referentes a todos os pátios da malha simulada estão reunidos na tabela do Anexo XVII, onde se pode observar a quantidade de linhas de atividade, de carga e descarga de cada pátio.

Esta tabela também possui informações de restrição, como o comprimento útil do pátio, que limita a parada de trens maiores que esse valor, e a possibilidade de parada ou não de trens unitários carregados nesse pátio (representando limitações de rampa do pátio). O valor 1 indica que o trem unitário carregado pode parar no pátio. Um valor zero ou vazio indica que o trem carregado não pode parar no pátio.

6.6.2. Dados dos segmentos da malha

As linhas de ligação entre os pátios têm suas informações detalhadas na tabela do Anexo XVI. Esta tabela informa se o segmento é sinalizado ou não, quantas seções de bloqueio possui (caso seja sinalizado), a quantidade de linhas (1

para singela e 2 para dupla), o percentual de probabilidade de contingência neste segmento (por tipo de trem) e o seu comprimento total. Este comprimento é usado para calcular os indicadores de desempenho referentes a distância percorrida pelo trem (como o TKU detalhado anteriormente).

Os segmentos estão agrupados por trechos, os quais são numerados, conforme se pode observar na coluna “# Trecho” da tabela de segmentos. No diagrama de pátios da malha apresentado no Anexo IV os trechos estão numerados, permitindo observar sua posição em relação ao restante da malha.

O preenchimento da probabilidade de contingência encontrou obstáculo na ausência de dados específicos da MRS sobre interferências no movimento.

Adotou-se, portanto, que os 5% maiores valores de tempo de trânsito seriam considerados os tempos sob contingência. Foram então determinadas as distribuições probabilísticas usando-se 95% dos tempos de trânsito, as quais foram usadas como tempo de trânsito normal, e as distribuições probabilísticas dos 5% anteriormente separados, que constituíram os tempos de trânsito sob contingência.

Assim, apesar de haver a possibilidade de escolher individualmente este percentual, no cenário de validação da MRS todos os segmentos receberam o mesmo percentual de 5%.

6.6.3. Roteiros

O caminho exato a ser percorrido pelo trem é informado através da tabela de roteiros, apresentada no Anexo XXII. Os roteiros informam por quais trechos da malha o trem deve passar e em que ordem.

Ao se informar o primeiro trecho do roteiro, deve-se informar também para que sentido do trecho o trem se encaminhará. Este sentido usa como referência a ordem dos segmentos da tabela de segmentos (Anexo XVI). Se o trem seguirá os segmentos descendo a tabela, o sentido será crescente. Se o trem sobe a

tabela, o sentido será decrescente. Os trechos seguintes deverão ser consecutivos, caso contrário o próprio modelo acusa uma mensagem de erro informando que o roteiro está incorreto.

6.6.4. Grade de trens diretos

A grade de trens diretos usada no modelo foi a grade de trens que a MRS denomina como “Carga Geral”. Esta grade está apresentada no Anexo X. A MRS possui também outra classe de trens diretos, denominados “Expresso”. Estes têm prioridade sobre a movimentação dos outros trens diretos e trabalham com uma grade separada. O modelo também suporta estes trens usando a grade apresentada no Anexo XI.

6.6.5. Dados dos trens de ciclo

Os trens unitários representados no cenário de validação estão apresentados na tabela do Anexo XXIV. Estes trens unitários são os trens de ciclo, e esta tabela define o tamanho de cada frota e suas características individuais, como o tempo de descarga e o grupo de direcionamento.

Cada frota de unitário (linha da tabela) é dedicada a atender um dos clientes da empresa, ou seja, destina a carga a um pátio em cuja localidade há um cliente. Esse pátio é definido pelo grupo de direcionamento descrito a seguir no próximo tópico.

6.6.6. Dados de direcionamento dos trens de ciclo e terminais de carga/descarga

O direcionamento dos trens unitários (de ciclo) é feito com os dados da tabela de grupos de direcionamento apresentada no Anexo XXI. Esta tabela também contém a distribuição estatística referente ao tempo de carga desta composição especificamente em cada um dos terminais de carga disponíveis.

Além destas informações, os trens de ciclo usam também os dados das tabelas apresentadas nos Anexos IXX e XX, que contém os roteiros de ligação

entre os terminais de carga até os de descarga, e também dos terminais de descarga até os pontos zero.

O ciclo de roteiros se completa com a tabela do Anexo XVIII, que informa os roteiros que ligam os pontos zero até os terminais de carga. Esta tabela também informa o tempo de deslocamento médio do trem nesse percurso, dado que é usado na decisão do melhor terminal para onde enviar o trem.

Para o cenário de validação executado, foram considerados os ciclos de trens apresentados nas Figuras 6.10 a 6.17 a seguir. Cada um deles correspondente a um cliente da MRS.

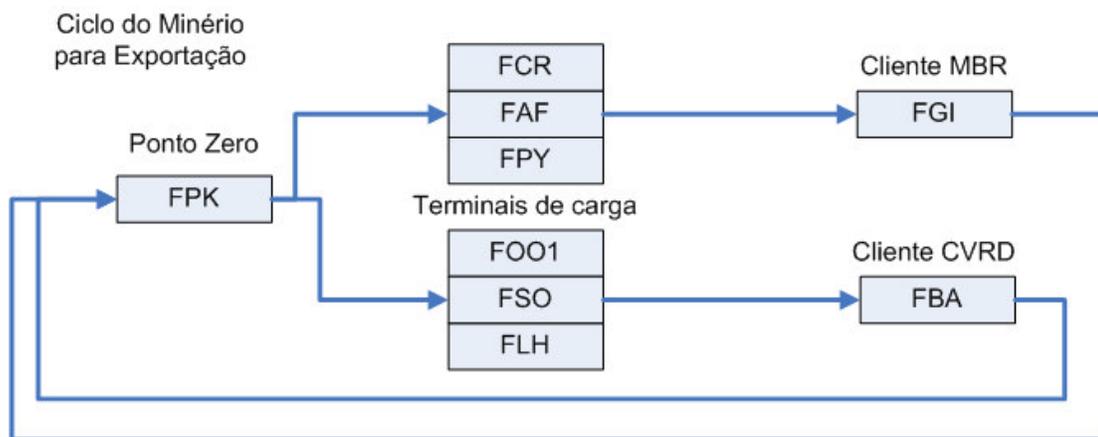


Figura 6.10 – Ciclo do transporte de minério para exportação

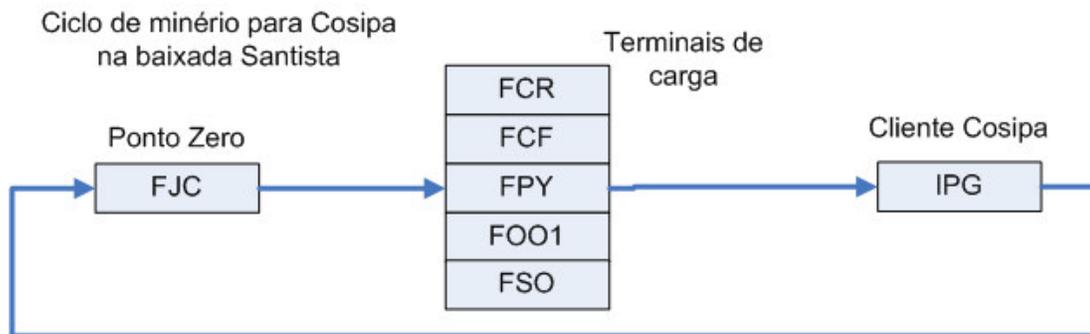


Figura 6.11 – Ciclo do transporte de minério diretamente para Cosipa

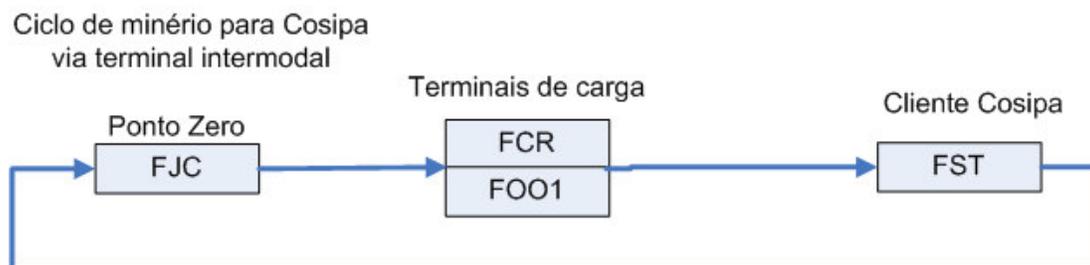


Figura 6.12 – Ciclo do transporte de minério para Cosipa via terminal intermodal

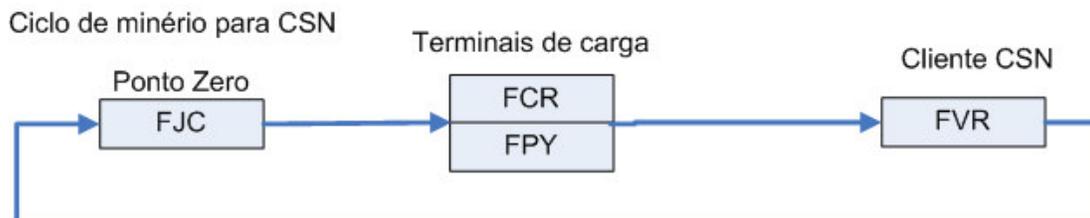


Figura 6.13 – Ciclo do transporte de minério para CSN

Ciclo de minério para Patrag

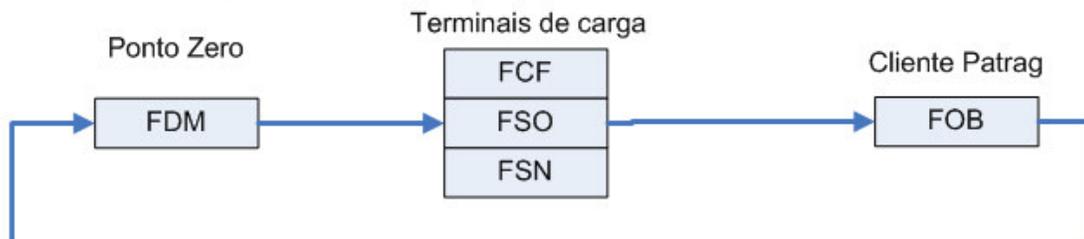


Figura 6.14 – Ciclo do transporte de minério para Patrag

Ciclo de minério para Açominas

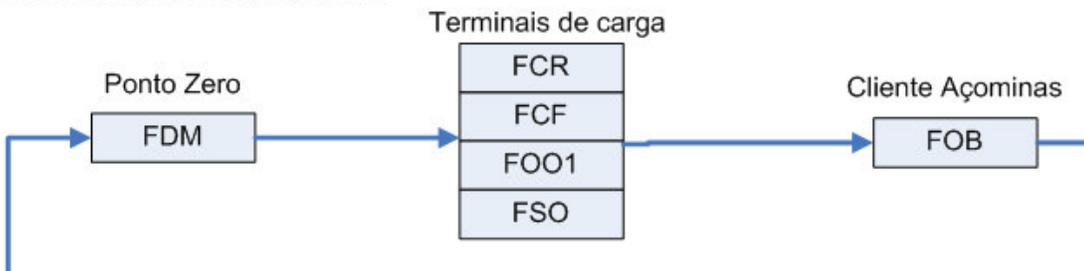


Figura 6.15 – Ciclo do transporte de minério para Açominas

Ciclo de Carvão/Coque



Figura 6.16 – Ciclo do transporte de Carvão/Coque



Figura 6.17 – Ciclo do transporte de Bauxita

Alguns ciclos têm certas peculiaridades. O ciclo de minério para exportação na verdade é composto por dois ciclos independentes para a MBR e CBRD. Entretanto, são contabilizados como um único indicador pela MRS. A Cosipa recebe minério através de dois ciclos distintos, mas para a MRS, a soma destes dois ciclos forma um indicador único para a Cosipa. Os ciclos de Açominas e Patrag têm o mesmo terminal de descarga, mas são contabilizados separadamente, pois são clientes independentes atendidos neste mesmo terminal. Os ciclos de carvão e bauxita não necessitam de um ponto zero para decidir o ponto de carga, pois há apenas um. Neste caso, o próprio ponto de carga é considerado o seu ponto zero, para fins de padronização na lógica de modelagem.

6.6.7. Probabilidades e Tempos de contingência em pátios

Conforme descrito anteriormente no algoritmo de movimentação, cada trem possui uma probabilidade de parada nos pátios devido a manutenção imprevista. Esse tipo de contingência segue as informações da tabela apresentada no Anexo XV. Esta tabela informa qual é essa probabilidade por tipo de trem (unitário, grade e expresso), e também qual é a distribuição estatística que representa o tempo de reparo (por tipo de trem).

6.6.8. Tempos de trânsito sob operação normal

O tempo de deslocamento de cada tipo de trem entre cada segmento da malha (linha entre dois pátios) está relacionado na tabela disponibilizada no Anexo XII. A tabela toma como referência o pátio onde se encontra o trem, e informa o tempo de deslocamento para o pátio seguinte e também para o pátio

imediatamente anterior. Desta forma o impacto das características topográficas do local pode ser representado corretamente.

6.6.9. Tempos de trânsito sob contingência

Esta tabela, apresentada no Anexo XIII, tem estrutura idêntica a dos tempos de trânsito sob operação normal. Os tempos retratados aqui se referem às situações em que o trem sofre uma contingência e realiza o movimento com maior lentidão.

Este tempo só é usado se o movimento do trem for considerado como contingência. A probabilidade de que isso aconteça está informada na tabela de informações sobre os segmentos, citada anteriormente no tópico 6.6.2.

6.6.10. Tabela de Pátios com Atividades dos Trens de Ciclo

Os trens de ciclo devem parar em determinados pátios para realizar atividades diversas, como reabastecimento, inspeção, manutenção preventiva, troca de tripulação, etc. Estas atividades estão retratadas no sistema como um tempo de espera.

A tabela apresentada no Anexo XXIII relaciona todos os pátios onde há atividades para os trens de ciclo. Ao atingir cada pátio durante seu movimento, o trem verifica se o pátio se encontra nesta lista (apenas a coluna referente ao seu estado, vazio ou carregado). Caso o pátio esteja na lista, o trem permanece parado pelo tempo indicado. Esse comportamento é detalhado no Capítulo 5.

6.6.11. Prioridade dos trens

O movimento dos trens por seções mais restritivas da malha requer que se decida qual trem deve avançar primeiro. A decisão sobre qual trem deve avançar depende do interesse estratégico da empresa que administra a malha. No caso da MRS, a prioridade dos trens é a apresentada a seguir, em ordem decrescente de prioridade:

Prioridade 1: Trem de minério carregado (trem de ciclo)

Prioridade 2: Trem de minério vazio (trem de ciclo)

Prioridade 3: Trem de Carvão ou Bauxita carregado ou vazio (trem de ciclo)

Prioridade 4: Trem expresso (Trem direto)

Prioridade 5: Trem grade (Trem direto)

6.7 – Plano de Experimentos para a Escolha da Melhor Opção de Direcionamento

Como informado anteriormente, adotaram-se para validação os resultados reais de tonelada-útil da MRS do mês de outubro de 2004. Estes resultados estão apresentados no Anexo XXV, agrupados por cliente da empresa (trens de ciclo) e também os trens expressos e grade (trens diretos).

Para se realizar a seleção da melhor opção de direcionamento, são necessários três experimentos:

- Experimento de direcionamento usando algoritmo programado dentro do código do próprio modelo de simulação;
- Experimento de direcionamento usando algoritmo de escolha aleatória;
- Experimento de direcionamento usando ferramenta externa para realizar a decisão;

Todos os experimentos devem ser realizados com o mesmo cenário e pelo mesmo período de tempo do sistema, pois neste caso já se dispõe dos indicadores de desempenho reais para comparação.

Nestes experimentos devem ser mensurados o tempo de execução computacional da simulação e o indicador de desempenho Tonelada Útil. A

configuração do equipamento usado nestes experimentos é a seguinte: Processador AMD Athlon X2 4200 dual core, 1Gb de memória RAM e disco rígido de 80Gb.

6.8 – Experimento de Validação para Direcionamento Realizado pelo Próprio Simulador (Código Interno)

Neste experimento, o modelo recebeu a implementação do algoritmo de direcionamento diretamente dentro de seu código de modelagem, capacitando-o a tomar essa decisão internamente.

Objetivo: Avaliar o desempenho do sistema para o indicador escolhido, frente ao mesmo indicador do sistema real, usando-se algoritmo de direcionamento programado dentro do código do modelo, usando-se a linguagem da ferramenta de simulação escolhida. Medição da duração do experimento.

6.8.1 – Determinação das Constantes da Equação de Direcionamento

Para concluir a equação de direcionamento com a determinação de suas constantes, realizou-se um experimento inicial, arbitrando-se o tempo em 1 mês de simulação. Cada replicação representa 1 dia, e os 4 primeiros dias foram considerados como tempo de aquecimento do sistema.

O modelo foi preparado com as variáveis C1, C2, C3 e C4 multiplicando os fatores da equação conforme mostrado no tópico 6.4, na elaboração inicial da equação de direcionamento. O modelo registra o resultado da produção mensal na variável “TU do Mes”.

O OptQuest foi configurado com as variáveis C1 a C4 como controles, podendo variar seus valores de 1 a 1000, conforme mostrado na Figura 6.18.

| Controls | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-----------|--------------|----------|-----------|-----------------|------------|------|-------------|
| Controls Summary | | | | | | | | | |
| Included | Category | Control / | Element Type | Type | Low Bound | Suggested Value | High Bound | Step | Description |
| <input checked="" type="checkbox"/> | User Specified | C1 | Variable | Discrete | 1 | 1 | 1000 | 2 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | User Specified | C2 | Variable | Discrete | 1 | 1 | 1000 | 2 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | User Specified | C3 | Variable | Discrete | 1 | 1 | 1000 | 2 | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | User Specified | C4 | Variable | Discrete | 1 | 1 | 1000 | 2 | |

Figura 6.18 – Controles Inseridos no Optquest

A produção mensal foi representada como uma resposta a ser analisada pelo otimizador, como mostrado na Figura 6.19.

| Responses | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-----------|------------|---------------|--|
| Responses Summary | | | | | |
| Included | Category | Data Type | Response / | Response Type | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | User Specified | Output | TU do mes | Output Value | |

Figura 6.19 – Resposta a ser monitorada pelo Optquest

A função objetivo é obter o menor valor da diferença entre a produção obtida pelo simulador e a produção real sob as mesmas condições (valor absoluto). Como a produção do mês inteiro em Tonelada Útil do cenário de validação foi de 7.522.058,18t, essa função foi representada como mostrado na Figura 6.20.

| Objectives | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------|-----------|----------|-------------|-----------------------------|--|
| Objectives Summary | | | | | | |
| Select | Name | Linear | Goal | Description | Expression | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | TU Simulado X Real | NonLinear | Minimize | | abs([TU do mes]-7522058.18) | |

Figura 6.20 – Função objetivo inserida no OptQuest

Após executar 352 iterações, o OptQuest convergiu para uma diferença de 1237 t entre o valor simulado e o real, equivalente a 0,016%. Os valores das constantes encontrados para este resultado foram:

$$C1 = 127, C2 = 209, C3 = 143, C4 = 999$$

Estes resultados estão apresentados na Figura 6.21 a seguir. A Figura 6.22 mostra o gráfico da evolução dos resultados. Nota-se que houve 5 melhorias na função objetivo ao longo do experimento. Este foi interrompido manualmente por se considerar que o resultado já era satisfatório.



Figura 6.21 – Resultados do OptQuest

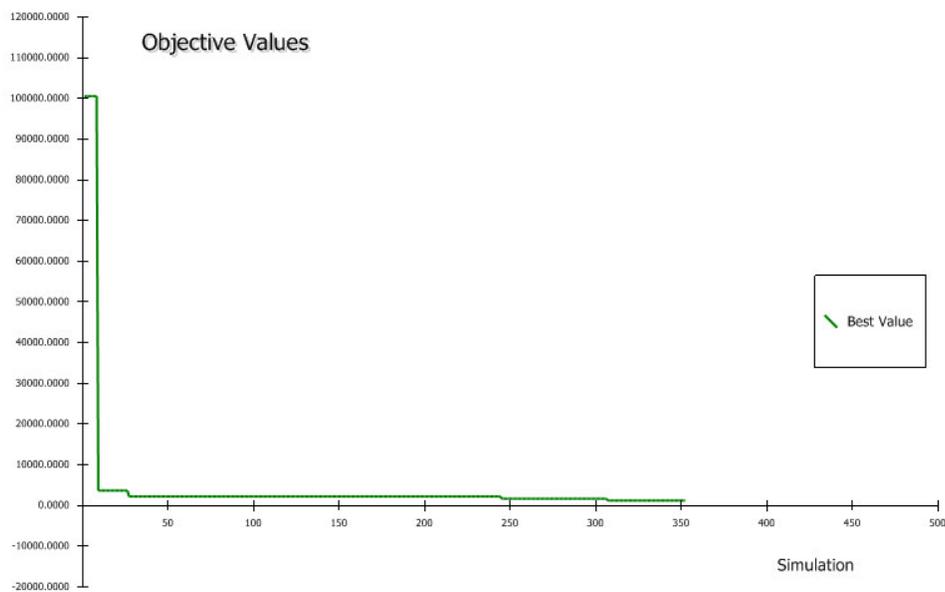


Figura 6.22 – Gráfico de evolução dos resultados

Desta forma, a equação de direcionamento final pode ser representada conforme a seguir:

$$\text{Maximizar : } \left\{ \frac{127}{tc} + \frac{209}{td} + \frac{143}{(Da/Do)} - [900.000 \times (Do = 0)] - (999 \times Te) \right\}$$

Para realizar a confirmação de que estes pesos são adequados e finalizar a validação, programou-se a equação completa no modelo e determinou-se a quantidade de replicações mais adequada, conforme apresentado a seguir.

6.8.1 – Determinação do número de replicações

Tomando-se o indicador tonelada útil total do dia, e simulando-se replicações de 1 dia, foram obtidos os resultados abaixo para 319 dias, excluindo-se os 4 primeiros dias para aquecimento do modelo, totalizando 315 dias:

Tonelada útil total por dia (média): 248.282,86

Desvio padrão da amostra: 24.700,18

10% do desvio padrão: 2.470,02

Para se determinar o nível de confiabilidade do modelo, foram calculados os valores de h conforme explicado no tópico 6.5.2, para 80%, 90% e 95% de confiança. Os resultados foram comparados com o valor de 10% do desvio padrão, obtendo-se o seguinte:

(95%) $h = 2.558,67 > 2.470,02$ (insuficiente)

(90%) $h = 2.153,98 < 2.470,02$ (adequado)

(80%) $h = 1670,97 < 2.470,02$ (adequado)

Confirmou-se, assim, que o modelo alcança 90% de confiabilidade executando-se 315 replicações.

6.8.2 – Validação frente ao sistema real

Para confirmar a aderência do modelo ao sistema real, comparou-se individualmente o indicador tonelada útil diária para cada cliente MRS (trens de ciclo, ou unitários) e também agrupados os trens diretos expresso e trens diretos grade.

Buscou-se uma aproximação de até 10% dos valores reais do período de validação. A simulação de 315 replicações apresentou os resultados da Tabela 6.1 apresentada a seguir.

Tabela 6.1 – Comparativo de Resultados entre Simulação e Sistema Real

| Cliente | Tonelada útil (média diária em toneladas) | | Diferença do Real (%) |
|--------------------|---|-------------------|-----------------------|
| | Real | Modelo | |
| Minério Exportação | 150.879,10 | 146.340,97 | -3,0 |
| Cosipa | 19.092,09 | 19.774,93 | 3,6 |
| CSN | 24.066,93 | 24.378,19 | 1,3 |
| Açominas | 6.464,82 | 6.870,47 | 6,3 |
| Patrag | 8.888,22 | 8.999,40 | 1,3 |
| Carvão | 10.451,67 | 11.000,00 | 5,2 |
| Bauxita | 4.598,54 | 4.709,14 | 2,4 |
| Trens de grade | 28.154,47 | 26.475,20 | -6,0 |
| TOTAL | 250.735,27 | 248.548,29 | -1,0 |

A tabela mostra que todos os indicadores individuais obtiveram uma diferença menor que 10% com relação ao sistema real. Portanto, o modelo usando a segunda opção de direcionamento foi considerado validado.

O valor final da última coluna da tabela apresenta a diferença percentual da TU média total. Entretanto, este indicador não é adequado para comparação com os outros cenários, pois as variações de atendimento individual de alguns clientes (alguns recebendo a mais e outros recebendo a menos) ficam ocultas neste indicador.

Para fins de comparação, será calculado um novo indicador de erro, tomando-se a média dos valores absolutos do erro para cada cliente. No caso deste experimento, este indicador resulta em:

$$(| -3| + |3,6| + |1,3| + |6,3| + |1,3| + |5,2| + |2,4| + | -6,0|) / 8 = \mathbf{3,6\%}$$

A cronometragem deste experimento obteve o tempo de **10,1 minutos**.

6.9 – Experimento de Validação para Direcionamento com Escolha Aleatória

O objetivo deste experimento é avaliar o desempenho do sistema para o indicador escolhido, frente ao mesmo indicador do sistema real, usando-se escolha aleatória dos terminais de destino. Será feita a medição da duração do experimento.

Para sua realização, substituiu-se a heurística de direcionamento por um sorteio com chances iguais para os terminais disponíveis. Terminais de carga que não possuam demanda para este trem serão considerados indisponíveis e o sorteio será refeito caso um destes terminais seja sorteado. Este algoritmo foi apresentado no Capítulo 5.

A simulação foi realizada usando-se o mesmo cenário e tempo de simulação do experimento anterior, ou seja, 319 dias com os 4 primeiros dias de aquecimento.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.2, onde são comparados com os indicadores reais do cenário usado para validação.

Tabela 6.2 – Resultado do cenário real X aleatório

| Cliente | Tonelada útil (média diária em toneladas) | | Diferença do Real (%) |
|--------------------|---|-------------------|-----------------------|
| | Real | Modelo | |
| Minério Exportação | 150.879,10 | 111.558,20 | -26,1 |
| Cosipa | 19.092,09 | 18.238,51 | -4,5 |
| CSN | 24.066,93 | 23.442,28 | -2,6 |
| Açominas | 6.464,82 | 5.030,20 | -22,2 |
| Patrag | 8.888,22 | 6.174,66 | -30,5 |
| Carvão | 10.451,67 | 11.073,83 | 6,0 |
| Bauxita | 4.598,54 | 4.775,59 | 3,9 |
| Trens de grade | 28.154,47 | 27.876,24 | -1,0 |
| TOTAL | 250.735,27 | 208.169,51 | -17,0 |

Nota-se que alguns clientes tiveram um percentual de erro significativo, acima dos 10% desejados. Isto indica que o procedimento de direcionamento aleatório não oferece representatividade suficiente para validar o modelo.

O cálculo do indicador de erro para este experimento resultou em:

$$(-26,1 + |-4,5| + |-2,6| + |-22,2| + |-30,5| + |6,0| + |3,9| + |-1,0|) / 8 = 12,1\%$$

A cronometragem deste experimento obteve o tempo de **9,92 minutos**.

6.9 – Experimento de Validação para Direcionamento com Decisão Realizada Externamente por Otimizador

O objetivo é avaliar o desempenho do sistema para o indicador escolhido, frente ao mesmo indicador do sistema real, usando-se como motor de decisão uma ferramenta externa acionada pelo modelo quando necessária. Deve ser realizada a medição da duração do experimento.

Para sua realização, desenvolveu-se um modelo de decisão em ferramenta externa (GAMS) e programou-se o modelo pra que acione esta ferramenta sempre que uma decisão seja necessária, estabelecendo a troca de dados conforme descrito anteriormente no Capítulo 4 (troca de dados via Excel e

arquivo texto). Para este experimento, foi utilizada a ferramenta GAMS, rodando um modelo de programação inteira binária.

O desenvolvimento do problema de otimização está apresentado a seguir:

Índices

i: índice da composição;

j: índice do terminal elegível;

Parâmetros (matrizes) de entrada

$$t = \left\{ \frac{127}{tc} + \frac{209}{td} + \frac{143}{(Da/Do)} - (999 \times Te) \right\} : \text{Soma dos fatores que}$$

influenciam a decisão do trem. Esta operação é realizada com a mesma equação já usada no experimento anterior, excetuando-se a operação booleana referente à demanda não existente. Onde:

tc = Tempo de carregamento no terminal

td = Tempo de deslocamento até o terminal

Da = Demanda Atendida até o momento

Do = Demanda Objetivo

Te = Trens a caminho do terminal

$T = \{t_{ij}\}$: Conjunto (matriz) da soma dos fatores que influenciam a decisão do trem.

$P = \{p_{ij}\}$: Matriz de incidência (permissão) binária. Identifica se a composição i pode ser atendida pelo terminal j em um dado instante; Se todos os terminais forem elegíveis, a matriz

deve ser preenchida com valor igual a 1. Os terminais não elegíveis deve receber valor igual a zero.

Variável de decisão

y_{ij} : Variável binária (0-1) de escolha do terminal j que atenderá a composição i .

Função-Objetivo:

TC (somatório dos fatores decisórios de todas as composições sendo otimizadas) O objetivo é maximizar esta função.

$$\max TC = \sum_j \sum_i y_{ij} t_{ij}$$

Restrições

1. $\sum_j y_{ij} = 1, \forall i$: dentre todos os possíveis terminais a serem selecionados apenas um e obrigatoriamente um deve ser escolhido para cada composição i .
2. $y_{ij} \leq p_{ij}, \forall i, j$: a variável binária deve ser no máximo igual ao parâmetro de incidência (permissão). Se o parâmetro p_{ij} for igual a zero, a variável binária assume obrigatoriamente o valor zero. Se o parâmetro p_{ij} for igual a 1 a variável binária poderá assumir tanto o valor 1 quanto o valor zero, dependendo do resultado da otimização.
3. $y_{ij} = \{0,1\}$: restrição básica de valor binário.

O modelo em GAMS está preparado para direcionar i trens, mas o modelo de simulação requisita o direcionamento de apenas um trem por vez. O código do modelo em GAMS está apresentado no Anexo XIV.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.3, onde são comparados com os indicadores reais do cenário usado para validação.

Tabela 6.3 – Resultado do cenário real X direcionamento externo

| Cliente | Tonelada útil (média diária em toneladas) | | Diferença % |
|--------------------|---|-------------------|-------------|
| | Real | Modelo | |
| Minério Exportação | 150.879,10 | 141.795,36 | -6,0 |
| Cosipa | 19.092,09 | 19.013,44 | -0,4 |
| CSN | 24.066,93 | 24.258,76 | 0,8 |
| Açominas | 6.464,82 | 7.101,55 | 9,8 |
| Patrag | 8.888,22 | 8.135,35 | -8,5 |
| Carvão | 10.451,67 | 10.786,82 | 3,2 |
| Bauxita | 4.598,54 | 4.527,91 | -1,5 |
| Trens de grade | 28.154,47 | 26.624,49 | -5,4 |
| TOTAL | 250.735,27 | 242.096,29 | -3,4 |

É possível observar que este procedimento representa adequadamente o sistema, pois o percentual de erro em todos os clientes foi abaixo de 10%. Portanto, ele atinge representatividade suficiente para validar o modelo.

O cálculo do indicador de erro para este experimento resultou em:

$$(-6,0 + -0,4 + 0,8 + 9,8 + -8,5 + 3,2 + -1,5 + -5,4) / 8 = 4,5\%$$

A cronometragem deste experimento obteve o tempo de **95,88 minutos**.

6.10 – Escolha da Melhor Opção para Representação do Direcionamento e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos pelos três experimentos realizados anteriormente estão relacionados na Tabela 6.4 a seguir:

Tabela 6.4 – Resultados dos Experimentos de Direcionamento

| Experimento | Diferença do Real (%) | Duração (min.) |
|--------------------|-----------------------|----------------|
| Código Interno | 3,6 | 10,10 |
| Aleatório | 12,1 | 9,92 |
| Otimizador Externo | 4,5 | 95,88 |

Conforme o método adotado, a escolha se dará em duas etapas. A primeira deve eliminar as alternativas que não são capazes de validar o modelo. Para isto são comparados os desempenhos em tonelada útil enviados a cada um dos clientes da MRS e também o indicador de erro médio para os clientes.

Este indicador deve apresentar diferença menor do que 10% em todos os indicadores individuais e também no consolidado. Segundo este critério, as alternativas recebem a seguinte avaliação mostrada na Tabela 6.5, onde se constata que a opção de direcionamento aleatória não atende a este requisito.

Tabela 6.5 – Resultados dos Experimentos de Direcionamento

| Experimento | Diferença do Real (%) | |
|--------------------|-----------------------|------------------|
| Código Interno | 3,6 | Aceitável |
| Aleatório | 12,1 | Eliminado |
| Otimizador Externo | 4,5 | Aceitável |

Como se pode observar nos resultados do experimento de direcionamento aleatório (Tabela 6.2), a heurística de decisão realmente tem impacto significativo nos resultados da simulação, que perde mais de 40.000 toneladas/dia sem o seu uso. Pode-se notar também que sua ausência causa maior impacto nos ciclos que possuem mais alternativas de direcionamento, como o minério exportação, Açominas e Patrag. O ciclo da Cosipa foi favorecido pelo fato de ser dividido em dois, diminuindo a quantidade de alternativas. Por outro lado, os ciclos de Carvão e Bauxita praticamente não sofreram impacto, visto que

usam apenas um terminal e por isso não fazem uso do procedimento de direcionamento.

Nota-se também que os trens diretos grade e expresso foram favorecidos, pois com a retenção dos trens de ciclo em fila nos terminais de carga, a malha se tornou menos congestionada. Além disso, a ausência dos trens de ciclo, cuja movimentação é prioritária em relação aos trens diretos, favorece ainda mais o seu movimento.

O critério seguinte para a escolha é o custo computacional, mensurado através da cronometragem dos experimentos. Como pode ser observado na Tabela 6.4, o experimento executado mais rápido foi o de direcionamento aleatório. Entretanto, este não atende ao requisito de validação do modelo.

Portanto, dentre os experimentos restantes, o que executou o experimento mais rápido foi o do direcionamento executado pelo código do modelo. Por este critério, esta opção de direcionamento é a que deve ser adotada para o estudo da malha em análise (MRS).

Nos experimentos seguintes, usou-se o modelo com esta opção de direcionamento já implementada.

Capítulo 7 – Análise de Desempenho de um Sistema Ferroviário Brasileiro

Este capítulo pretende ilustrar a aplicabilidade de um modelo de simulação de malhas ferroviárias contendo trens em ciclo fechado para um caso brasileiro, que esteja adequadamente validado.

No capítulo anterior, descreveu-se a modelagem de uma malha ferroviária brasileira (MRS Logística), e sua validação, obtida com a aplicação dos algoritmos e determinação da melhor representação de direcionamento. Este capítulo apresenta experimentos realizados com esse mesmo modelo. Portanto, as condições experimentais são as seguintes:

- O modelo adotado usa o direcionamento de trens de ciclo realizado internamente com o algoritmo implementado em seu próprio código de modelagem. Pois esta foi a alternativa de direcionamento escolhida;
- Todos os cenários dos experimentos foram elaborados a partir do cenário de validação, ou seja, tomou-se este cenário original e realizaram-se alterações em um ou mais de seus parâmetros;

- Os resultados destes experimentos foram comparados com os resultados obtidos pelo cenário de validação para o direcionamento escolhido. Neste caso, são os apresentados na Tabela 6.1 (direcionamento por implementação no código interno do modelo).
- Buscou-se elaborar experimentos que permitissem observar as interferências possíveis nos ciclos dos trens, e seu impacto no indicador de desempenho adotado (TU).

Ao final do capítulo, é discutida a possível aplicação dos algoritmos desenvolvidos em outras malhas ferroviárias brasileiras.

7.1 – Plano de Experimentos para Medição de Desempenho do Sistema

Entre os diversos fatores que interferem no ciclo de operação do trem, foram escolhidos os relacionados abaixo:

- Quantidade de vagões na composição: Os trens de ciclo têm sua capacidade de transporte diretamente relacionada ao seu número de vagões. Entretanto, a necessidade de tração adicional também aumenta com o número de vagões. Além disso, a quantidade de vagões define o tamanho do trem, e quanto maior o número de vagões, menor a quantidade de pátios de cruzamento capazes de acomodar o trem, gerando dificuldades de circulação;
- Número de composições no mesmo ciclo: A quantidade de composições no ciclo afeta diretamente a produção. Entretanto, ao atingir certa quantidade, a limitação de produção se transfere para os terminais de carga/descarga ou a própria malha, que não é capaz de acomodar todas as composições;

- Indisponibilidade de terminais: A indisponibilidade de terminais ou a ocorrência de problemas pode aumentar o tempo de carga ou descarga do trem, trazendo grandes conseqüências para o seu ciclo. Neste estudo, será considerado um cenário de greve portuária, provocando maior tempo de descarga nos terminais de exportação;
- Investimentos na malha: A ampliação da capacidade de circulação em determinados setores problemáticos da malha poderá favorecer a operação dos trens. Neste estudo, será adotado o cenário de implantação do ferroanel na cidade de São Paulo;

7.2 – Experimentos de Medição do Desempenho do Sistema

Cada experimento está detalhado nas próximas seções, onde são informados quais fatores foram alterados em cada cenário, e os resultados obtidos.

Os resultados de cada experimento são comparados com os resultados obtidos pelo cenário de validação, conforme anteriormente esclarecido. Assim como os experimentos de avaliação do direcionamento, todos os experimentos foram realizados também com 315 dias de simulação, e sua confiabilidade confirmada usando-se a mesma técnica usada para a validação.

7.2.2. Impacto do aumento no número de locomotivas nas composições, e operando sem locomotivas de auxílio

Objetivo: Avaliar os ganhos com investimento em tração. Uma alternativa ao uso das locomotivas de auxílio em certos trechos da malha é a anexação de uma locomotiva adicional em cada composição de trem unitário. Desta forma, todas as composições serão capazes de vencer os obstáculos topográficos do caminho sem nenhuma locomotiva adicional.

Implementação: Este cenário é obtido desligando-se a busca e liberação de locomotivas auxiliares nos trechos onde ela atualmente é necessária. Em contrapartida, uma locomotiva a mais é acrescida na quantidade de locos necessárias para a formação de cada trem.

Resultados: os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.2, onde são comparados com os resultados obtidos pelo cenário de validação.

Tabela 7.2 – Resultados do cenário com locomotiva adicional nas composições

| Cliente | Tonelada útil (média diária em toneladas) | | Diferença da Validação (%) |
|--------------------|---|-------------------|----------------------------|
| | Validação | Loco adicional | |
| Minério Exportação | 146.340,9 | 151.411,97 | 3,5 |
| Cosipa | 19.774,93 | 19.901,27 | 0,6 |
| CSN | 24.378,19 | 24.488,07 | 0,5 |
| Açominas | 6.870,47 | 6.703,69 | -2,4 |
| Patrag | 8.999,40 | 8.758,09 | -2,7 |
| Carvão | 11.000,00 | 10.981,54 | -0,2 |
| Bauxita | 4.709,14 | 4.767,28 | 1,2 |
| Trens de grade | 26.475,20 | 26.495,33 | 0,1 |
| TOTAL | 248.282,86 | 253.440,46 | 2,1 |

Os resultados mostram um ganho de pouco mais de 5000 toneladas diárias. É um ganho significativo que aparece principalmente nos ciclos que passam pelos trechos de auxílio, como o minério exportação. Outros terminais, entretanto, foram ligeiramente prejudicados pelo tráfego adicional gerado, como Açominas e Patrag. Estes dois clientes fazem uso de um terminal onde há intenso tráfego do minério exportação em direção às minas, por se situar logo após o ponto zero FPK.

Deve-se levar em conta que se necessita de 53 locomotivas adicionais. Uma para cada composição de trens unitários programados. A empresa já dispõe exatamente desta quantidade operando como auxílio nos setores específicos da

malha. Portanto, a contrapartida de implementação deste cenário será o custo adicional de combustível e manutenção destas locomotivas.

7.2.3. Impacto de uma greve portuária no ciclo dos trens unitários

Objetivo: Estudar o impacto de uma greve portuária no sistema. Os terminais de FBA (Brisamar) e FGI (Guaíba) são pontos de escoamento de minério para exportação. O terminal FBA também recebe e carrega carvão/coque. Este experimento pretende avaliar o impacto que um problema nestes terminais causaria nestes ciclos e no restante do sistema.

Implementação: Este cenário foi gerado considerando-se hipoteticamente que o tempo de carga e descarga nos terminais citados é cinco vezes maior do que atualmente, devido à ausência de material para carga ou de pessoal para operar os equipamentos de descarga. Este comportamento é obtido multiplicando-se o tempo de carga/descarga correspondente no cenário de validação.

Resultados: Neste cenário, o sistema sofreu grandes congestionamentos. A produção em tonelada útil do sistema sofreu grandes variações, como pode ser observado no gráfico da Figura 7.1. A Tabela 7.7 mostrada a seguir apresenta os resultados deste cenário comparados com os do cenário de validação.

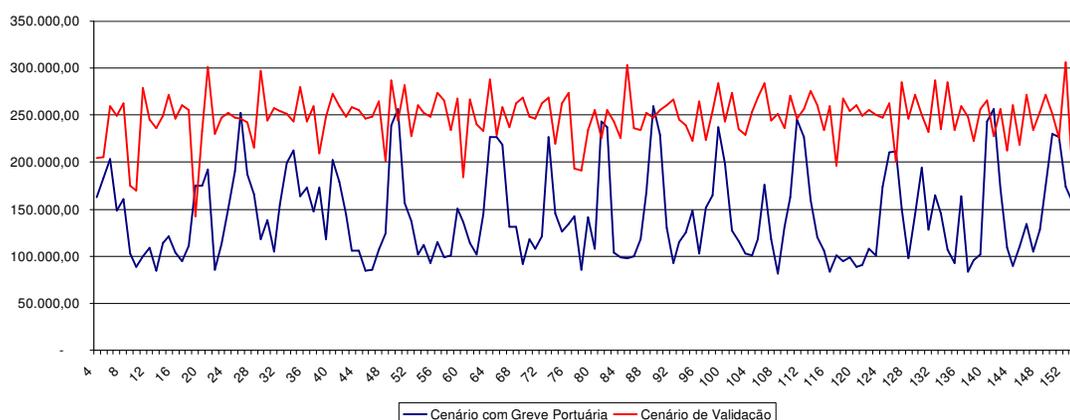


Figura 7.1 – Histórico de tonelada útil com deficiência de atendimento nos portos

Tabela 7.3 – Resultados do cenário com deficiência de atendimento nos portos

| Cliente | Tonelada útil (média diária em toneladas) | | Diferença da Validação (%) |
|--------------------|---|-------------------|----------------------------|
| | Validação | Cenário | |
| Minério Exportação | 146.340,97 | 62.400,85 | -57,4 |
| Cosipa | 19.774,93 | 20.136,19 | 1,8 |
| CSN | 24.378,19 | 23.822,40 | -2,3 |
| Açominas | 6.870,47 | 7.856,04 | 14,3 |
| Patrag | 8.999,40 | 9.865,27 | 9,6 |
| Carvão | 11.000,00 | 1.513,42 | -86,2 |
| Bauxita | 4.709,14 | 4.476,59 | -4,9 |
| Trens de grade | 26.475,20 | 25.685,07 | -3,0 |
| TOTAL | 248.282,86 | 120.171,22 | -51,6 |

Este comportamento era esperado, visto que a interferência do tempo adicional ficou vigente durante todos os dias da simulação, uma situação equivalente a uma greve de mais de 200 dias.

Nesta situação, observa-se o grande impacto que este fator provocou no ciclo do minério exportação, que descarrega nos terminais portuários, e o ciclo do carvão, que recebe sua carga nestes terminais. Por outro lado, outros ciclos foram

beneficiados pela ausência de trens circulando pela região dos terminais de carga (minas), como é o caso de Açominas e Patrag.

É importante observar que neste cenário o modelo não foi capaz de contornar o congestionamento formado. Depois de 150 dias de simulação, os ciclos dos trens de minério exportação e carvão cessaram de produzir, denotando grande acúmulo de trens nos ramais da malha que atende os portos.

7.2.4. Impacto do tamanho das composições de trens cíclicos

Objetivo: Avaliar o impacto do tamanho das composições dos trens de ciclo. Este experimento deverá mostrar a sensibilidade do modelo ao parâmetro do tamanho das composições, e também mostrar o impacto deste fator no sistema.

Implementação: Para este experimento, foi escolhido o ciclo dos trens de minério para exportação, por constituir a frota total mais numerosa. No cenário de validação, duas frotas são dedicadas a esse transporte: uma com 10 composições de 132 vagões e outra com 20 composições de 120 vagões, como pode ser observado no Anexo XXIV. Executou-se uma seqüência de simulações alterando-se o tamanho da composição, iniciando com uma composição menor do que a usada no cenário de validação, e terminando com uma composição maior. Os tempos de carga e descarga foram aumentados ou diminuídos proporcionalmente ao número de vagões.

Resultados: os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.4. A primeira coluna indica o quanto foi alterada a quantidade de vagões em cada cenário, em percentual. A Figura 7.2 a seguir apresenta um gráfico da evolução do minério exportação e tonelada útil total. Por razões de escala, o gráfico dos demais ciclos está apresentado em separado na Figura 7.3.

Na tabela e nos gráficos, o valor associado a 100% refere-se ao cenário de validação.

Tabela 7.4 – Resultados dos cenários com alteração no número de vagões

| % | Número de vagões | | Tonelada útil média diária (t) | | | | | | | | |
|------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------|---------|---------|----------|--------|---------|---------|---------|
| | Frota c/ 10 composições | Frota c/ 20 composições | Total | Min. Exp. | Cosipa | CSN | Açominas | Patrag | Carvão | Bauxita | Grade |
| 70% | 92 | 84 | 207931,6 | 106738,4 | 19581,0 | 24189,4 | 6557,7 | 8843,3 | 10981,5 | 4667,6 | 26438,3 |
| 80% | 105 | 96 | 221641,9 | 120147,3 | 19863,9 | 24207,3 | 6752,7 | 8985,2 | 11018,5 | 4634,4 | 26299,3 |
| 90% | 118 | 108 | 234779,5 | 132846,6 | 19570,9 | 24361,9 | 6861,1 | 9013,6 | 11018,5 | 4675,9 | 26431,0 |
| 100% | 132 | 120 | 248282,9 | 146341,0 | 19774,9 | 24378,2 | 6870,5 | 8999,4 | 11000,0 | 4709,1 | 26475,2 |
| 110% | 145 | 132 | 257339,0 | 155451,7 | 19597,3 | 24155,2 | 6898,7 | 9169,7 | 10963,1 | 4651,0 | 26452,4 |
| 120% | 158 | 144 | 252777,8 | 150476,0 | 19401,9 | 24276,6 | 6593,3 | 9297,5 | 11018,5 | 4734,1 | 27045,0 |
| 130% | 171 | 156 | 254105,6 | 152438,0 | 19300,8 | 24438,6 | 6786,2 | 9226,5 | 11055,4 | 4825,4 | 26418,7 |

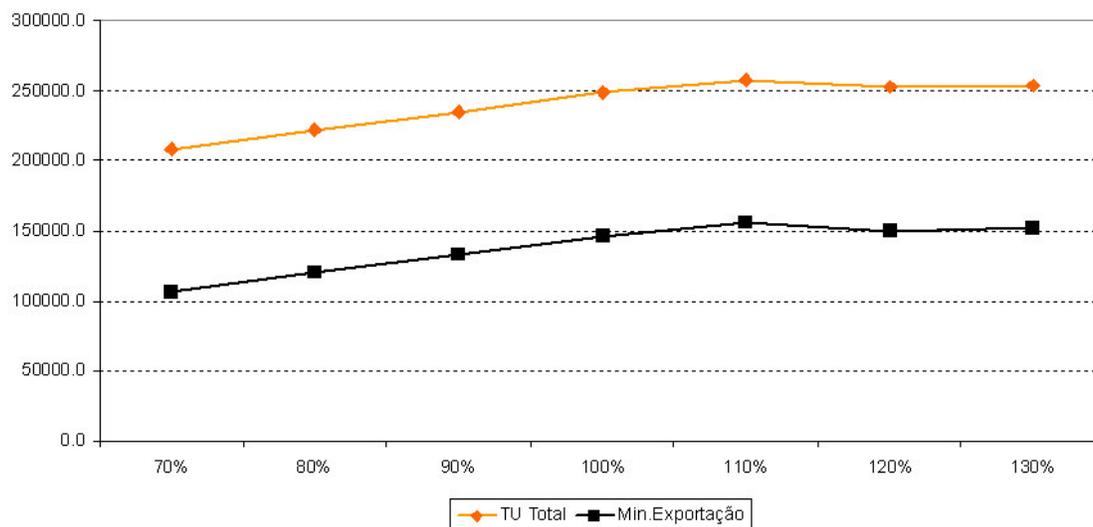


Figura 7.2 – Evolução da tonelada útil total e do minério exportação

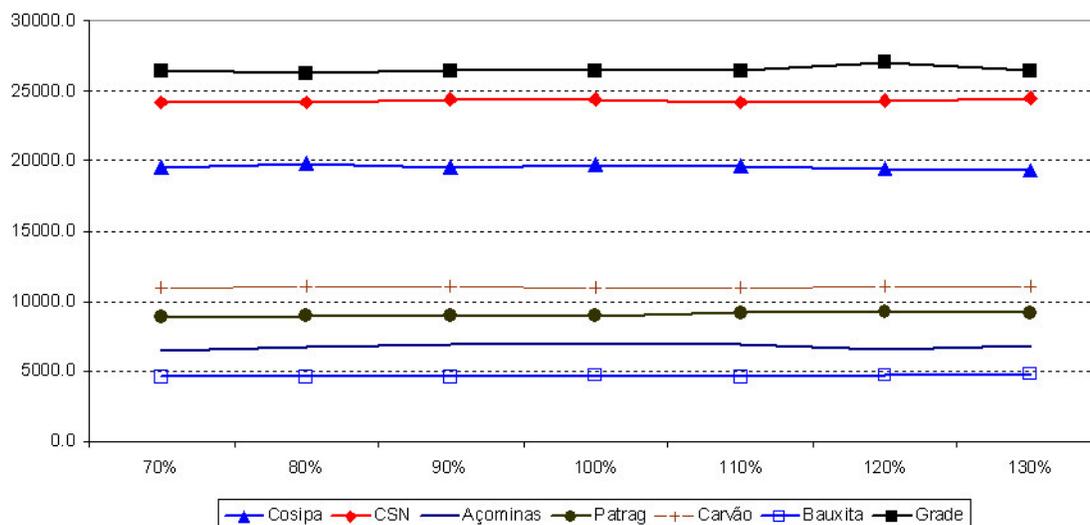


Figura 7.3 – Evolução dos demais ciclos

Pode-se observar pelos gráficos que o aumento de vagões nas composições efetivamente aumenta a capacidade de transporte do trem. Entretanto, a relação número de vagões/produtividade tem um limite. Observa-se que até 110%, o incremento na produção é linear, aumentando aproximadamente 13.000 toneladas a cada incremento de 10%. A partir de 110%, este valor começa a cair e oscilar, refletindo limitações de atendimento nos terminais e ocorrências de congestionamento devido à dificuldade de trânsito pelo sistema.

Nota-se, entretanto, que este fator provocou pouca alteração nos outros ciclos, demonstrando que a malha está preparada para suportar trens maiores do que os atuais.

7.2.5. Impacto do tamanho da frota de trens cíclicos

Objetivo: Avaliar o impacto do tamanho da frota de trens de ciclo. Este experimento deverá mostrar a sensibilidade do modelo à quantidade de composições em circulação para um determinado ciclo, e também mostrar o impacto deste fator no sistema.

Implementação: Para este experimento, também foi escolhido o ciclo dos trens de minério para exportação, por constituir a frota total mais numerosa. Frisando novamente que duas frotas são dedicadas a esse transporte: uma com 10 composições de 132 vagões e outra com 20 composições de 120 vagões. Executou-se uma seqüência de simulações alterando-se a quantidade de trens em circulação, iniciando com uma quantidade menor do que a usada no cenário de validação, e terminando com uma quantidade maior.

Resultados: s resultados obtidos estão apresentados na Tabela 7.5. A primeira coluna indica quanto foi alterada a quantidade de vagões em cada cenário, em percentual. A Figura 7.4 a seguir apresenta um gráfico da evolução do minério exportação e tonelada útil total. Por razões de diferença de escala, o gráfico dos demais ciclos está apresentado em separado na Figura 7.5.

Na tabela e nos gráficos, o valor associado a 100% refere-se ao cenário de validação.

Tabela 7.5 – Resultados do cenário com variação no número de trens

| % | Núm. de composições | | Tonelada útil média diária (t) | | | | | | | | |
|------|---------------------|---------------------|--------------------------------|-----------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| | Frota de 132 vagões | Frota de 120 vagões | Total | Min. Exp. | Cosipa | CSN | Açominas | Patrag | Carvão | Bauxita | Grade |
| 50% | 5 | 10 | 184023,1 | 78973,5 | 19904,6 | 24581,7 | 8097,7 | 10035,6 | 11036,9 | 4825,4 | 26567,7 |
| 70% | 7 | 14 | 210736,2 | 106629,3 | 19865,3 | 24360,3 | 7856,4 | 9737,5 | 11036,9 | 4750,7 | 26633,2 |
| 90% | 9 | 18 | 238132,8 | 135086,1 | 19700,2 | 24455,5 | 7267,8 | 9325,9 | 11000,0 | 4759,0 | 26670,6 |
| 100% | 10 | 20 | 248282,9 | 146341,0 | 19774,9 | 24378,2 | 6870,5 | 8999,4 | 11000,0 | 4709,1 | 26475,2 |
| 110% | 11 | 22 | 255853,0 | 155062,3 | 19710,8 | 24121,1 | 6546,3 | 8545,2 | 10963,1 | 4684,2 | 26418,4 |
| 130% | 13 | 26 | 249377,3 | 157456,0 | 19548,7 | 24736,3 | 6413,4 | 8502,6 | 10963,1 | 4543,0 | 26277,5 |
| 150% | 15 | 30 | 278662,4 | 181182,9 | 19393,7 | 24540,1 | 4691,3 | 6543,7 | 10963,1 | 4734,1 | 26743,6 |
| 170% | 17 | 34 | 282742,9 | 187055,0 | 19299,5 | 24583,3 | 4354,0 | 5692,0 | 10612,4 | 4634,4 | 26641,7 |

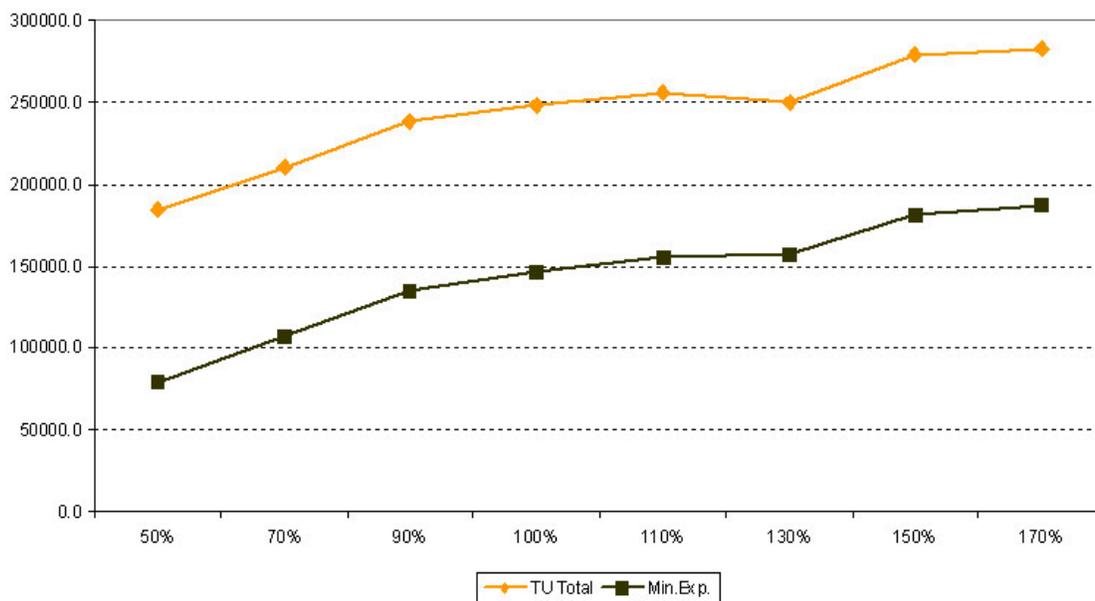


Figura 7.4 – Evolução da tonelada útil total e do minério exportação

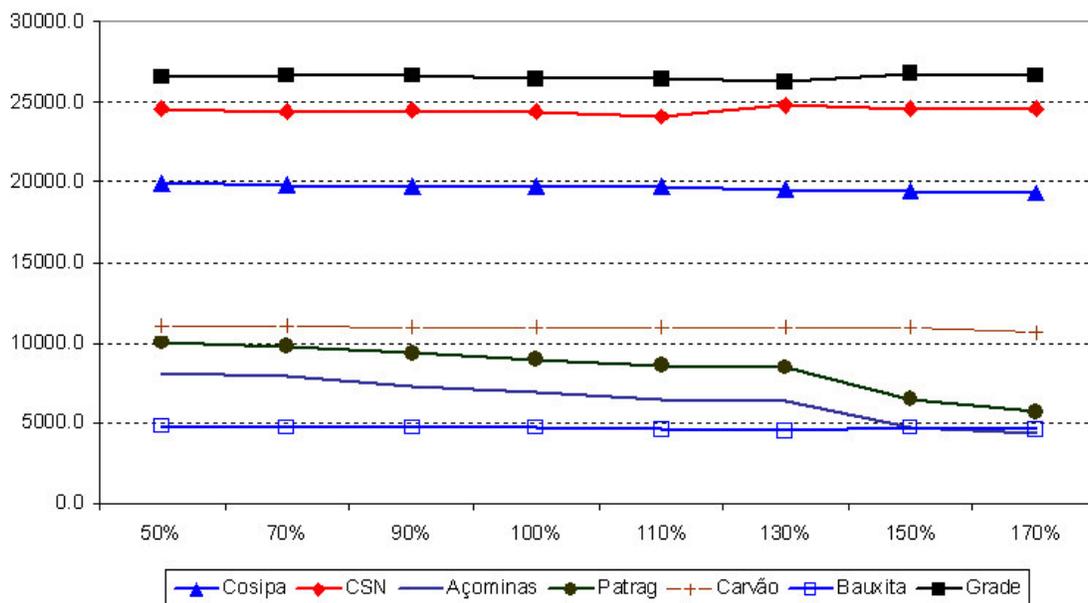


Figura 7.5 – Evolução dos demais ciclos

Assim como observado no experimento de alteração no número de vagões, observa-se uma relação direta entre o aumento de composições e a

produção do ciclo. De 50% até 100%, observa-se uma evolução quase linear, com incrementos de aproximadamente 10.000 toneladas a cada aumento de 10% no número de composições.

Entretanto, a partir de 100% esse valor começa a diminuir e oscilar, denotando a ocorrência de congestionamentos esporádicos pela malha. Nota-se também que este fator causa interferência nos outros ciclos, especialmente aqueles que atuam na região dos terminais de carga, como Açominas e Patrag. O aumento na quantidade de trens circulando por esta região prejudica a movimentação das composições destes ciclos. No cenário com aumento de 70% da frota atual, o ciclo de carvão também começou a ser prejudicado, visto que carrega no mesmo terminal onde os trens de minério exportação descarregam.

7.2.1. Impacto do Ferroanel

Objetivo: Confirmar e mensurar os benefícios trazidos pela implantação de um anel ferroviário contornando a grande São Paulo. Espera-se que este investimento em infra-estrutura traga muitos benefícios à circulação dos trens de carga por esta região. Atualmente há restrições diversas para a circulação destes trens, pois a malha se encontra sob administração da CPTM, a qual prioriza a circulação de seus trens de passageiros.

Implementação: Uma aproximação do impacto do ferroanel é obtida retirando-se do modelo atual as restrições de horário de circulação na malha de São Paulo. O experimento foi realizado usando-se os mesmos dados do cenário de validação.

Resultados: Os resultados obtidos mostraram pouca variação em relação ao cenário de validação, representando em média 133,07 toneladas/dia adicionais transportadas. Este resultado demonstra que o experimento não é conclusivo para avaliar este investimento.

A razão é que a MRS atualmente mantém um nível de circulação nessa região compatível com a presença dessa restrição, de forma que não ocorram grandes congestionamentos. No caso de implantação deste ferroanel, a empresa certamente iria alterar a sua grade e intensificar a circulação, aproveitando melhor esse recurso. Essa nova futura grade, caso exista, não foi disponibilizada para a realização do experimento.

7.3 – Representação de outras Malhas Ferroviárias Brasileiras

Complementando o estudo apresentado para a MRS Logística, este tópico realiza uma avaliação conceitual da representação de outras malhas usando-se a estrutura de dados apresentada. Isto é feito para se confirmar a aplicabilidade dos algoritmos propostos, buscando verificar se todas as características existentes nessas outras malhas encontram correspondente nas estruturas elaboradas para a modelagem.

As outras malhas avaliadas foram a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), sob concessão da Companhia Vale do Rio Doce, e a malha ferroviária que atende os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e parte de São Paulo, sob concessão da América Latina Logística – ALL Delara.

7.3.1 – Representação da malha da América Latina Logística (ALL)

A malha administrada pela ALL atende a toda a região sul do Brasil e tem ramificações nos países vizinhos e no estado de São Paulo. Toda a sua malha é singela. A empresa não trabalha com trens de ciclo, e sua frota de vagões é composta basicamente por vagões tanque, plataforma, gôndola e graneleiros.

A representação desta malha seria feita da seguinte forma:

- Cadastro de todos os segmentos da malha usando-se a mesma estrutura do Anexo XVI, indicando linha singela e não sinalizada para todos os segmentos;

- Cadastro de todos os pátios da malha e suas linhas de atividade como mostrado no Anexo XVII, deixando vazios os campos referentes a linhas de carga/descarga, pois estas são usadas apenas por trens de ciclo;
- Cadastro de toda a grade da empresa na estrutura mostrada no Anexo X;
- O cadastro de trens de ciclo deve ser deixado vazio, assim como o cadastro de suas atividades e as informações de direcionamento, já que não serão usadas pelo modelo.
- A tabela de roteiros mostrada no Anexo XXII deve ser preenchida com os roteiros usados pela ALL;
- Todos os tempos de trânsito em operação normal e sob contingência deverão ser cadastrados, assim como os percentuais de probabilidade de contingência para pátios e segmentos.

Com o correto cadastramento destes dados, o modelo de simulação seria capaz de informar todos os resultados referentes a trens diretos. Os indicadores de resultado dos trens de ciclo resultariam zerados.

7.3.2 – Representação da Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM)

Esta malha é usada pela Companhia Vale do Rio Doce para escoar minério das minas localizadas no interior de Minas Gerais até o terminal do porto de Tubarão no estado do Espírito Santo. Por esta malha, circulam trens de ciclo para o transporte de minério, e alguns trens de passageiros.

A malha tem grandes trechos de linha dupla e sinalizada, e alguns trechos de linha singela próximos das minas.

O cadastramento de dados para representação desta malha seria feito da seguinte maneira:

- Cadastro de todos os segmentos da malha usando-se a mesma estrutura do Anexo XVI, indicando linha dupla e sinalizada nos segmentos correspondentes, e linha singela sinalizada nos segmentos próximos das minas;
- Cadastro de todos os pátios da malha e suas linhas de atividade como mostrado no Anexo XVII, informando adequadamente os campos referentes a linhas de carregamento de minério nos pátios correspondentes a terminais das minas, e informando as linhas de descarga de minério nos terminais onde isso acontece;
- Cadastro dos trens de passageiros como trens diretos grade, na estrutura mostrada no Anexo X. Estes trens devem ser informados com tonelada útil zero, para que não sejam contabilizados na soma da tonelada útil total. A função destes trens será apenas provocar interferências no sistema;
- Cadastro de todas as informações dos trens de ciclo, com a quantidade de composições, tamanho de cada composição, tamanho e peso dos vagões, tempo de descarga, etc.
- Cadastro de todos os terminais de carga correspondentes às minas. Com seus tempos de carga e demanda;
- A tabela de roteiros mostrada no Anexo XXII deve ser preenchida com os roteiros usados pelos trens da EFVM;
- Cadastro de todos os roteiros usados para ligar os terminais de carga de minério aos terminais de descarga, estes aos terminais onde é feita a decisão de direcionamento (pontos zero) e destes últimos até os terminais de carga, fechando o ciclo;

- Todos os tempos de trânsito em operação normal e sob contingência deverão ser cadastrados, assim como os percentuais de probabilidade de contingência para pátios e segmentos;
- As prioridades de trens devem ser alteradas. O trem direto deve ser prioritário em relação a todos os outros, e o trem de minério carregado deve ser prioritário em relação ao trem vazio.

Com este cadastramento, o modelo será capaz de produzir indicadores de desempenho referentes aos trens de ciclo individualmente, como tonelada útil gerada e utilização dos terminais. Os indicadores de trens diretos poderão ser ignorados, pois se referem aos trens de passageiros, servindo apenas para interferir na circulação dos trens de ciclo.

Capítulo 8 – Conclusões e Recomendações

Este estudo foi motivado principalmente pela dificuldade em se validar modelos de simulação de malhas ferroviárias que contemplem composições circulando em ciclo fechado. A elevada sensibilidade do sistema a interferências no ciclo requer algoritmos de modelagem capazes de retratar corretamente seu comportamento, caso contrário, a simulação não é capaz de alcançar um nível de similaridade adequada frente ao sistema real. O problema se agrava com o fato de que, em malhas de maior complexidade, os trens de ciclo podem ter diferentes opções de destino, e um procedimento decisório deve ser realizado para que se escolha o melhor terminal, segundo os critérios da empresa que administra a malha.

Estes aspectos foram obstáculos desafiadores para o trabalho de modelagem e representação do sistema, pois se não fossem adequadamente retratados, o modelo não atingiria a validação, e seus resultados não teriam credibilidade para apoiar uma tomada de decisão sobre o sistema. A carência de estudos abortando simulação de malhas ferroviárias com trens em ciclo fechado confirma a relevância do tema escolhido.

O estudo dos trens cíclicos apresenta aspectos de comportamento e operação bastante distintos dos trens que são formados em um terminal e desmembrados em outro. A sua conservação dentro da malha causa impacto diferenciado no sistema ferroviário ao qual pertence, e sua grande importância no transporte de granéis como minério de ferro e bauxita torna relevante estudar este tipo de trem. Empresas concessionárias como a CVRD (Companhia Vale do Rio Doce) e MRS têm grande parte do seu faturamento proveniente da operação com estes trens.

Além do seu próprio comportamento cíclico, um aspecto de extrema importância é o do direcionamento destes trens. Este procedimento acontece em malhas mais extensas onde o trem pode optar por diferentes terminais de carga ou descarga para cumprir o seu ciclo. Nestes casos há um procedimento de decisão para que se escolha o terminal ideal, do ponto de vista da empresa que opera a malha, geralmente visando maior retorno financeiro.

O procedimento de escolha do terminal pode ser bastante complexo, com muitas alternativas e fatores a serem considerados. Geralmente é realizado por operadores humanos experimentados, com o auxílio de ferramentas computacionais. Devido à sua complexidade, este procedimento é de difícil representação computacional em um modelo de simulação.

Para comprovar a hipótese da Tese, foram desenvolvidos todos os algoritmos considerados necessários para a representação de uma malha ferroviária, com trens de ciclo e também composições que não se conservam, ou seja, são formadas na origem, mas desmembradas no destino (trenos diretos).

Os algoritmos desenvolvidos foram aplicados na modelagem da malha ferroviária da MRS Logística, concessionária da malha ferroviária que liga os estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. As principais estruturas da malha foram representadas no modelo de simulação. Um mês típico de operação

da MRS foi selecionado como cenário de validação para confirmar a correta representação do modelo.

O procedimento de direcionamento de trens adotado pela MRS foi representado com todos os seus fatores mais relevantes, entretanto, há dificuldade em se representar matematicamente o processo de decisão, pois não é possível quantificar empiricamente qual a exata relevância de cada fator na decisão. Esse problema foi contornado adotando-se o procedimento de validação inicial por otimização.

Para aplicar esse procedimento, um otimizador executou o modelo tendo como variáveis de entrada os pesos de cada fator da equação, comparando o indicador de desempenho resultante da simulação com o valor já conhecido do sistema real. Desta maneira, quantificou-se a importância de cada um destes fatores. O modelo foi então validado conforme o método descrito por Freitas (2001).

Para selecionar o melhor algoritmo de direcionamento, foram realizados experimentos usando-se o mesmo cenário de validação, mas variando-se somente o método de direcionamento. Os três métodos descritos foram avaliados, e constatou-se que o de menor custo computacional é o de escolha aleatória. Entretanto esta opção foi considerada inadequada, pois não alcança a similaridade necessária com o sistema real. As outras duas opções foram capazes de validar o modelo e, portanto, consideradas adequadas. Entre elas, concluiu-se que aquela onde a decisão é programada dentro do próprio modelo de simulação apresenta custo computacional menor, em relação à opção com acionamento de ferramenta externa. Escolheu-se, portanto, esta opção para ser usada no modelo.

Para ilustrar a relevância de um modelo validado capaz de representar adequadamente os trens de ciclo, foram realizados experimentos de desempenho, medindo os indicadores destes trens sob a interferência e variação de seus fatores específicos. Foram avaliados: o impacto da variação no número de vagões nas

composições, variação no número de composições operando no mesmo ciclo, desempenho do sistema sob indisponibilidade freqüente dos terminais de descarga e o benefício de se realizar expansões físicas na malha.

Estes experimentos confirmaram a sensibilidade do modelo aos fatores modificados, revelando que a estrutura modelada é capaz de retratar o comportamento real dos trens de ciclo adequadamente, e pode ser uma valiosa ferramenta de estudo para tomada de decisão neste tipo de sistema.

A análise conceitual de outras duas malhas brasileiras (Estrada de Ferro Vitória-Minas, administrada pela Vale, e a malha da região sul, administrada pela ALL) confirmou que as estruturas e algoritmos propostos são adequados para a sua representação da mesma forma como foi feito para a MRS.

Durante a elaboração e testes com o modelo, constatou-se a real dificuldade de se representar computacionalmente a grande quantidade de decisões envolvidas na movimentação dos trens em uma malha ferroviária. A abordagem escolhida de programação do algoritmo de direcionamento dentro do código do modelo mostrou-se suficientemente simples para não prolongar demais o tempo de simulação, mas bastante eficiente para representar este aspecto do sistema. Constatou-se também que sem a representação adequada do método de direcionamento, o modelo não pode ser validado, conforme sinaliza o experimento de escolha aleatória.

Mesmo sendo capaz de retratar o sistema, o modelo assume diversas premissas simplificadoras, como a presença de locomotivas suficientes sempre que um trem do tipo direto (ou grade) é formado e a sua quantidade ilimitada dentro do sistema. Com isso perde-se o impacto provocado pela circulação de locomotivas escoteiras e o impedimento de partida de trens devido à falta de tração. Esta simplificação é atenuada pela adoção do percentual de supressão nos trens de grade, e pelo fato de que locomotivas escoteiras têm movimentação com prioridade mais baixa, devendo a princípio interferir pouco no sistema como um

todo. O sistema também não considera em detalhe o fluxo dos vagões, assumindo que as grades de trens fazem circular corretamente os vagões carregados e vazios que não fazem parte das composições dos trens de ciclo.

A implementação também adota uma política de prioridades entre trens bastante simplificada e que penaliza excessivamente os trens menos prioritários. Dentro do modelo, caso haja um fluxo intenso de trens prioritários em um sentido, o trem menos prioritário que tente circular no sentido contrário permanecerá indefinidamente parado. Em uma situação real, o operador humano atuaria para que este trem avançasse em determinado momento, mudando sua prioridade.

É importante ressaltar também que o modelo de otimização elaborado para execução pelo GAMS no experimento de direcionamento por ferramenta externa é extremamente simples. Entretanto, o procedimento é válido, pois possibilita a representação do sistema mesmo em casos porventura mais complexos.

Apesar de possuir limitações, os experimentos realizados no estudo de caso demonstraram que a implementação dos algoritmos foi suficientemente detalhada para que se realizassem estudos sobre o sistema real. Os resultados obtidos confirmaram que a sensibilidade do modelo a variações em seus fatores mais importantes é a mesma do sistema real.

Atendendo ao objetivo principal desta Tese, conclui-se que o uso de algoritmos suficientemente detalhados e a representação adequada do processo de decisão de direcionamento dos trens de ciclo alcançam a validação de modelos de simulação estratégicos de ferrovia para trens em ciclo fechado.

A aplicação prática destes algoritmos em um modelo de malha ferroviária brasileira permitiu:

- Encontrar o melhor tamanho de composição dos trens de ciclo;

- Dimensionar e ajustar o tamanho das frotas de trens de ciclo para o melhor aproveitamento da capacidade da malha;
- Avaliação do impacto que uma nova grade de trens trará para o sistema;
- Estudar o impacto de investimentos em melhoria de terminais de carga ou descarga, e investimentos em capacidade de circulação da malha (linhas ou pátios);
- Avaliar o impacto de novas políticas de manutenção preventiva que reduzam o percentual de contingências de via ou pátio no sistema;

8.1. Recomendações

Para dar continuidade a este trabalho, podem-se recomendar os seguintes aprimoramentos:

- O modelo desenvolvido, apesar de adotar uma heurística de decisão interna para otimizar o direcionamento de trens vazios, não otimiza o sistema em si. Este modelo poderia servir como parte de um sistema de otimização que buscasse automaticamente a melhor combinação tamanho de frota/tamanho de composição para todos os ciclos do sistema, maximizando a tonelada útil gerada. Outros parâmetros suportados pelo modelo também poderiam ser otimizados usando-se uma ferramenta assim elaborada;
- Adoção de política de prioridade dinâmica entre trens, tornando sua operação mais eficiente. Um trem menos prioritário teria sua prioridade aumentada em caso de espera excessiva;

- Alteração dos algoritmos e do modelo para que este considere a frota de locomotivas e vagões e respeite a sua localização na malha. Uma implementação como esta seria uma valiosa ferramenta para ampliar ou mesmo otimizar o uso do material rodante da empresa;
- Os algoritmos e a estrutura de modelagem desenvolvida poderiam ser usados na elaboração de uma ferramenta com foco operacional, avaliando a melhor política de circulação/cruzamentos em um trecho da malha usando-se uma heurística como a apresentada ou mesmo acionando uma ferramenta externa de otimização;
- A técnica de validação inicial por otimização mostrou-se adequada para este tipo de estudo, onde o procedimento de decisão pode ser equacionado na forma de fatores que favorecem ou desfavorecem cada uma das opções, mas pode se mostrar limitada caso haja processos de decisão mais complexos. Um maior aprofundamento das limitações e aplicabilidade desta técnica poderia ser realizado através de um estudo mais detalhado, com outros tipos de processo ou sistemas;

Espera-se que este estudo contribua para a melhoria do transporte ferroviário no Brasil, norteando os melhores investimentos e auxiliando no uso mais eficiente da infra-estrutura existente.

Referências Bibliográficas

- AHUJA, R. K., Liu, J., Orlin, J. B., Sharma, D., Shughart, L. A., *Solving Real-Life Locomotive Scheduling Problems*, (Abril 2002). MIT Sloan Working Paper No. 4389-02;
- AHUJA, R. K., Cunha, C. B., Güvenç, S. (2005), *Network Models in Railroad Planning and Scheduling*. Tutorials in Operations Research, cap.3, p.54-101, Informs;
- AMARAL, A. (1991), *Um Método para Decisão de Concessão de Faixas de Trabalho em Ferrovias de Linha Singela*, Rio de Janeiro, 1991, 205 p. Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia;
- ARNOLD, P., Peeters, D., Thomas, I. (2004) ,*Modelling a rail/road intermodal transportation system*, Transportation Research Part E 40 (2004) p.256-270, Elsevier;
- ASSAD, A. A. (1982) ,*A Class of Train-Scheduling Problems*, Transportation Science v.16, n.3, p.281-310, august 1982;
- BANKS, J., Carson, J. S., Nelson, B. L. (1996), *Discrete Event System Simulation*; Ed. Prentice Hall: Upper Saddle River – New Jersey – E.U.A.;
- BESSLER, D. A., Fuller, S. W. (2000) ,*Railroad wheat transportation markets in the central plains: modeling with error correction and directed graphs*, Transportation Research Part E v.36 (2000) p.21-39, Elsevier

- CAMARGO Júnior, J. B., Junior, J. R. A., Coura, S. J. C. (1996), *Modelos para Gerenciamento de Redes Ferroviárias*, Congresso Internacional de Sistemas de Controle e Cargas Ferroviárias. Nov. 1996. São Paulo;
- CARR, M., Way, H. (1997) ,*Million Dollar Logistic Decisions Using Simulation*, Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Dec. 13-16, Atlanta - GA, E.U.A.;
- Confederação Nacional do Transporte (2002), Relatório Analítico “Pesquisa Ferroviária CNT – 2002”, Endereço Internet consultado em 10 de fevereiro de 20007: <http://www.cnt.org.br>;
- COOK, P. D., Das, S., Aeppli, A., Martland, C. (1999) ,*Key Factors in Road-Rail Mode Choice in India: Applying the Logistic Cost Approach*, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Dec. 5-8, Phoenix - AZ, E.U.A.;
- CORDEAU, J. F., Toth, P., Vigo, D. (1998), *A Survey of optimization models for train routing and scheduling*, Transportation Science v.32, n.4, p.380-404. Nov. 1998;
- CRAINIC, T. G., Laporte, G. (1997), *Planning Models for Freight Transportation*, European Journal of Operational Research, n.97, p.409-438;
- DALAL, M. A.; Jensen, L. P. (2001), *Simulation Modeling at Union Pacific Railroad*, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Dec. 09-12, Arlington - VA, E.U.A.;
- DENNIS, S. M. (1999) ,*Using spatial equilibrium models to analyze transportation rates: an application to steam coal in the United States*, Transportation Research Part E, v.35 (1999) p.145-154, Elsevier;
- DESSOUKY, M. M., Lu, Q., Leachman, R. C. (2002) ,*Using Simulation Modeling to Assess Rail Track Infrastructure in Densely Trafficked Metropolitan Areas*, Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. Dec. 05-08, San Diego - AZ, E.U.A.;
- DUDEWICZ, E. J., Karian, Z. A. (1985), *A Modern Design and Analysis of Discrete-Events Computer Simulations*, IEEE Computer Society Press, 1985, E.U.A.;
- FIORONI, M. M., Botter, R. C., Pompermayer, F. M., Franzese, L. A. G. (2004), *Estudo Estratégico de Dimensionamento da Infra-Estrutura do Pátio Ferroviário de Tubarão através de Simulação*, Anais do XVIII ANPET, p.969-976, 2004.
- FREITAS Filho, P. J.. (2001), *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas*, Ed. Visual Books, Florianópolis, SC, Brasil.

- GAMS Development Corporation, 2007, Endereço Internet: <http://www.gams.com> ;
- GLOVER, F., Laguna, M.(1997), *Tabu Search*, Ed. Kluwer Academic Publishers;
- GLOVER, F., Lokketangen, A., Woodruff, D.L. (2000), *OR Computing Tools for Modeling, Optimization and Simulation: Interfaces in Computer Science and Operations Research*, Eds. M.Laguna e J.L.Gonzales-Velarde, pp.299&Mac246;317.
- GUTTKUHN, R., Dawson, T., Trutschel, U., Walker, J., Moroz, M. (2003), *A Discrete Event Simulation for the Crew Assignment Process in North American Freight Railroads*, Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference. Dec. 07-10, New Orleans- LA, E.U.A;
- HE, S., Song, R., Chaudhry, S. S. (2000) ,*Fuzzy dispatching model and genetic algorithms for railyards*, European Journal of Operations Research, n.124 (2000), p.307-331. Elsevier;
- HE, S., Song, R., Chaudhry, S. S. (2002), *An integrated dispatching model for rail yards operations*, Computers & Operations Research, 2002. Elsevier;
- HE, S., Song, R., Hu, A. (1998). *Application of genetic algorithm in computer-aided dispatching problem for railyards operations*. Proceedings of International Conference on Artificial Intelligence for Engineering, Wuhan, China.
- HIGGINS, A., Kozan, E., Ferreira, L. (1996) ,*Optimal Scheduling of Trains on a Single Line Track*, Transportation Research Part E, v.30, n.2 (1996) p.147-161, Elsevier;
- HOMER, J. B., Keane, T. E., Lukiantseva, N. O., Bell, D. W. (1999) ,*Evaluating Strategies to Improve Railroad Performance – A System Dynamics Approach*, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Dec. 5-8, Phoenix - AZ, E.U.A;
- HOOGHIEMSTRA, J. S.; Teunisse, M. J. G. (1998), *The use of Simulation in the Planning of Dutch Railway Services*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Dec. 13-16, Washington - DC, E.U.A;
- IRELAND, P., Case, R., Fallis, J., Dyke, C. V., Kuehn, J., Meketon, M. (2003), *Perfecting the Scheduled Railway: Model-Driven Operating Plan Development*, Endereço Internet consultado em 10 de fevereiro de 20007: <http://www.multimodalinc.com/pdfs/Edelman.pdf>

- JULICH, P. M., Martin, C. G., Brazelton, S. L., Curtiss, D. F. (1999) *Evaluating the Potential Benefits of a Rail Traffic Movement Planning Algorithm*, Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference. Dec. 5-8, Phoenix - AZ, E.U.A.;
- KELTON, W. D., Sadowsky, R. P., Sadowsky, D. A. (1998), *Simulation with Arena*, Ed. McGraw-Hill. Boston, Massachusetts, E.U.A.;
- KRUEGER, H., Vaillancourt, E., Drummie, A. M., Vucko, S. J., Bekavac, J. (2000), *Simulation within the railroad environment*, Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference. Dec. 10-13, Orlando - FL, E.U.A.;
- KULICK, B. C., Sawyer, J. T. (2001) *The use of Simulation to Calculate the Labor Requirements in an Intermodal Rail Terminal*, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Dec. 09-12, Arlington - VA, E.U.A.;
- KWON, O. K., Martland, C. D., Sussman, J. M. (1998), *Routing and Scheduling Temporal and Heterogeneous Freight Car Traffic on Rail Networks*, Transportation Research Part E, v.34 n.2 (1998) p.101-115, Elsevier;
- LEAL, J. E., Medeiros, S. R. (1988) *Uma Abordagem para a Análise de Sequenciamento de Trens*, Anais do II ANPET, v.II, 1998.
- LEAL, J. E., Soares, A. C., Nunes, L. S. N. (2004), *Uma Abordagem Heurística para o Problema de Programação de Trens em Linhas Singelas*, Anais do XVIII ANPET, p.945-956, 2004.
- LEILICH, R. H. (1998) *Application of Simulation Models in Capacity Constrained Rail Corridors*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Dec. 13-16, Washington - DC, E.U.A.;
- LEWELLEN, M.; Tumay, K. (1998), *Network Simulation of a Major Railroad*, Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference. Dec. 13-16, Washington - DC, E.U.A.;
- MARTINELLI, D. R., Teng, H. (1996) *Optimization of Railway Operations Using Neural Networks*, Transportation Research Part C, v.4, n.1, p.33-49 (1996), Elsevier
- MATSUBA, I., Namatame, M. (2002) *Scaling behavior in urban development process of Tokyo City and hierarchical dynamical structure*, Chaos, Solitons & Fractals, v.16, p.151-165 (2003), Elsevier;
- MEDEIROS, S. R. (1989), *Simulação de Tráfego Ferroviário: Adaptação de um modelo (LSIM – Petersen/Taylor) para as Condições Brasileiras*, Rio de Janeiro,

- 1989, 111 p. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;
- MIDDELKOOP, D.; Bouwman, M. (2001), *SIMONE: Large Scale Train Network Simulations*, Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference. Dec. 09-12, Arlington - VA, E.U.A.;
- Multimodal Applied Systems Inc. Multirail Freight Edition System Description and Support Services, 2001, Endereço Internet: <http://www.multimodalinc.com> ;
- MURGEL, L. M. F., (1998), *Modelo para Formação de Composições Ferroviárias*, São Paulo, 1998, 171 p. Dissertação de Mestrado, POLI USP - Escola Politécnica de São Paulo;
- NACHTIGALL, K., Voget, S. (1997), *Minimizing waiting times in integrated fixed interval timetables by upgrading railway tracks*, European Journal of Operational Research, n.103, p.610-627;
- NUNES, L. S. N., (2004), *Sistema de Apoio à Decisão ao Centro de Controle Operacional no Gerenciamento do Tráfego Ferroviário*, Rio de Janeiro, 2004, 123 p. Dissertação de Mestrado, PUC – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;
- OptTek Systems Inc. Home Page, 2007, Endereço Internet: <http://www.opttek.com> ;
- PARK, J. J., Babcock, M. W., Lemke, K. (1999) ,*The impact of railroad mergers on grain transportation markets: a Kansas case study*, Transportation Research Part E, v.35 (1999) p.269-290, Elsevier
- PATER, A. J. G.; Teunisse, M. J. G. (1997), *The use of template-based methodology on the simulation of a new cargo track from Rotterdam Harbor to Germany*, Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Dec. 7-10, Atlanta, Georgia, E.U.A.;
- PIDD, M. (1998), *Modelagem Empresarial: Ferramentas para Tomada de Decisão*; Ed. Artes Médicas Sul: Porto Alegre - RS – Brasil;
- PORTO, Telmo Giolito (1992). *Do Planejamento à Implantação de Projeto de Modernização Ferroviária, um Processo Condicionado pelo Fator Técnico-Especializado*. Tese de Doutorado, POLI-USP, São Paulo-SP;
- PRADO, D. (2004), *Usando o Arena em Simulação*; Ed. INDG Tecnologia e Serviços: Nova Lima - MG – Brasil;

Rail Operations Simulations. Home Page, 2002, Endereço Internet:
<http://www.pcrail.com>;

RAMOS, J. A. C. (2003), *Análise Prospectiva da Capacidade de Processamento de Cargas pela Ferrovia no Porto de Santos*, São Carlos, 2003, 95 p. Dissertação de Mestrado, EESC USP - Escola de Engenharia de São Carlos;

RIZZOLI, A. E., Fornara, N., Gambardella, L. M. (2002) *A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals*, Mathematics and Computers in Simulation n.59 (2002) p.57-71. Elsevier;

Rockwell Automation Arena User Zone. Home Page, 2007, Endereço Internet:
<http://www.arenauserzone.com> ;

ROSSETO, C. F. (1997) *Modelo para Programação de Despachos de Trens em Vias Singelas*, 153 p. Dissertação de Mestrado, USP - Escola Politécnica de São Paulo;

SAAD, J. A. C. (1999), *Modelo para Análise da Operação de Trechos Ferroviários em Linha Singela*, São Carlos, 1999, 122 p. Dissertação de Mestrado, EESC USP - Escola de Engenharia de São Carlos;

Signal Computer Consultants. Train Dispatcher 3 User Manual, 2000, Endereço Internet: <http://www.softrail.com> ;.

Simsig. Simsig Signaling Software Manual, 2002, Endereço Internet:
<http://www.simsig.co.uk> ;