UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE LOCOMOTIVAS DE AUXÍLIO NOS TRENS DE CARGA: CASO MRS

Fabiane Teixeira de Landa

MONOGRAFIA SUBMETIDA À COORDENAÇÃO DE CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PRODUÇÃO.

Aprovada por:

_____

Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira, M.Sc.

_____

Prof. José Geraldo Ferreira, M.Sc.

_____

Prof. Romir Soares de Souza Filho, D.Sc.

JUIZ DE FORA, MG - BRASIL

DEZEMBRO DE 2007

LANDA, FABIANE TEIXEIRA DE

Utilização de Simulação e Eventos Discretos Para Análise da Operação de Locomotivas de Auxílio nos Trens de Carga: Caso MRS

[Minas Gerais] 2007

IX, 43 p. 29,7 cm (EPD/UFJF, Engenharia de Produção, 2007)

Monografia - Universidade Federal de Juiz de Fora, Departamento de Engenharia de Produção

1. Simulação de Eventos Discretos

I. EPD/UFJF II. Título (série)

Agradecimentos

Durante todo o percurso para me formar engenheira muitas pessoas contribuíram para que eu chegasse cada vez mais perto deste dia.

Agradeço aos meus pais por me apoiarem sempre incondicionalmente. Ao meu pai, Ivan, que sempre me mostrou diversos caminhos para eu escolher o melhor a seguir. À minha mãe, Idalice, que sempre me apoiou nos momentos difíceis: sem ela, com certeza, tudo isso teria muito menos brilho.

Agradeço a minha irmã, Aline, que esteve comigo nos momentos mais raros da faculdade, os de lazer! E ao Luck, por alegrar esses momentos.

Agradeço aos meus professores, que me ensinaram a ser engenheira na teoria.

Agradeço à North Carolina State University, que me acolheu por seis meses e me ensinou muito mais que engenharia.

Agradeço ao Ladislau, por me oferecer a minha primeira oportunidade de estágio e de aplicar a engenharia de produção na prática.

Agradeço aos meus colegas da MRS, com os quais aprendi muito do que está neste trabalho, em especial ao Zé Geraldo e ao Marcelo.

Agradeço ao meu orientador Fernando, que me auxiliou na elaboração deste trabalho para torná-lo um pouco melhor.

Agradeço a MRS Logística, sem a qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Agradeço por fim a todos que em algum momento contribuíram para que eu conseguisse o sonhado diploma de engenheira.

Resumo da monografia apresentada à Coordenação de Curso de Engenharia de Produção como parte dos requisitos necessários para a graduação em Engenharia Produção.

UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE LOCOMOTIVAS DE AUXÍLIO NOS TRENS DE CARGA: CASO MRS

Fabiane Teixeira de Landa

Dezembro/2007

Orientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira
Co-Orientador: José Geraldo Ferreira

Curso: Engenharia de Produção

A demanda por transporte ferroviário de carga tem aumentado significantemente nos últimos anos, principalmente depois da privatização do setor em 1996. Para atender a essa demanda crescente o aumento na eficiência do transporte é fundamental. Com esse objetivo este trabalho propõe análise de um novo modo de operar os auxílios (reforço de tração obtido com a inclusão de locomotivas) dos trens de carga entre o terminal de carregamento de Andaime, responsável por quase 50% dos trens de minério de ferro transportados pela MRS Logística, e o pátio de Bom Jardim de Minas. Apesar de complicadas por envolverem diversas variáveis, as formas de operação podem ser analisadas através do uso de simulação de eventos discretos sem que sejam necessários testes no sistema real. A simulação utiliza modelos computacionais para avaliar um sistema com base em dados representativos do sistema real. Informações fornecidas pela empresa tornaram possível desenvolver um sistema representativo de realidade e assegurar um ganho 3,53% no ciclo dos trens estudados.

Palavras-chaves: simulação, transporte ferroviário, locomotiva de auxílio, tempo de ciclo.

Abstract of Graduation Final Project presented to Production Engineering Department as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor in Production Engineering

USING DISCRETE EVENTE SIMULATION TO ANALYSE THE OPERATION OF FREIGHT TRAINS HELPERS: MRS CASE

Fabiane Teixeira de Landa

December/2007

Advisor: Fernando Marques de Almeida Nogueira
Co- Advisor: José Geraldo Ferreira

Department: Production Engineering

The demand for railroad freight transportation has been increasing significantly over the last few years, mainly after the privatization in 1996. To meet the rising demand it's extremely important to improve to transportation efficiency. With this purpose, this case study shows the analysis of a new way to operate the helpers of the freight train's which loads at Andaime, a loading terminal responsible for almost 50% of the ore iron trains transported by MRS Logística, and the yard Bom Jardim de Minas. Despite the complexity due to the large number of variables, the rail operation models can be analyzed by using discrete event simulation, without the need of testing with the real system. The simulation uses a computerized model to evaluate a system based on representative data from the real system. Based on the information MRS supplied, it was possible to develop a representative model and assure a 3,53% improvement on the cycle of the trains studied.

Key-Words: simulation, rail transportation, helper, cycle time.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO **1**

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS **1**
1.2. OBJETIVOS **1**
1.3. JUSTIFICATIVAS **2**
1.4. ESCOPO DO TRABALHO **2**
1.5. METODOLOGIA **3**

CAPÍTULO II – ESTADO DA ARTE **7**

2.1. INTRODUÇÃO **7**
2.1.1. BREVE HISTÓRICO 7
2.1.2. SIMULAÇÃO 7
2.1.3. QUANDO USAR 8
2.2. ELEMENTOS BÁSICOS DA SIMULAÇÃO **9**
2.2.1. ENTIDADES 9
2.2.2. ATRIBUTOS 9
2.2.3. VARIÁVEIS 9
2.2.4. RECURSOS 10
2.2.5. FILAS 10
2.2.6. EXEMPLO 10
2.3. SIMULAÇÃO MONTE CARLO **11**
2.4. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS **11**
2.5. ARENA **12**

CAPÍTULO III - DESCRIÇÃO **13**

3.1. FERROVIA **13**
3.2. MRS LOGÍSTICA S.A. **14**
3.3. OPERAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO **15**
3.4. TERMINAL DE ANDAIME **17**
3.5. FJC – PÁTIO CORONEL GUEDES (P1-07) **18**
3.6. OPERAÇÃO DE AUXÍLIO **19**

CAPÍTULO IV – SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS **22**

4.1. COMPREENÇÃO DO SISTEMA **22**
4.1.1. FORMA DE OPERAÇÃO ATUAL 22
4.1.2. FORMA DE OPERAÇÃO PROPOSTO 26
4.2. NÍVEL DE DETALHAMENTO **27**

4.3. LÓGICA DE CIRCULAÇÃO DE TRENS **30**
4.4. DADOS DE ENTRADA **32**
4.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO **36**
4.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE **38**
4.7. SUGESTÕES, PROPOSTAS E CONCLUSÕES **41**
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **43**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema das Operações de Auxílio Atual e Proposta 2
Figura 2: Metodologia de Simulação 4
Figura 3: Passos de um estudo de modelagem e simulação 5
Figura 4: Indicador Operacional anual da MRS em volume transportado 15
Figura 5: Pontos de carga e descarga de minério 16
Figura 6: Terminal Ferroviário de Andaime 17
Figura 7: Trechos com necessidade de auxílio 20
Figura 8: Passo a passo do carregamento no Andaime 23
Figura 9: Fluxograma da Forma de Operação atual 25
Figura 10: Fluxograma da Forma de Operação Modelo Proposto 27
Figura 11: Circulação de trem para linha dupla 30
Figura 12: Circulação para trecho de linha singela 31
Figura 13: Situação de travamento da linha 31
Figura 14: Circulação de trecho para pátio 32
Figura 15: Ajuste das curvas estatísticas 35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de sistemas e seus componentes 10
Tabela 2: Evolução do sistema ferroviário de acordo com fases cronológicas 14
Tabela 3: Atividades realizadas no pátio FJC 18
Tabela 4: Trechos com necessidade de auxílio 19
Tabela 5: Pátios Envolvidos no Modelo 22
Tabela 6: Inputs para o modelo 29
Tabela 7: Saídas do Modelo 29
Tabela 8: Dados de Entrada do Modelo 33
Tabela 9: Demanda diária de trens 36
Tabela 10: Resultados do Modelo 37
Tabela 11: Ganho de Produção 38
Tabela 12: Resultado da análise de sensibilidade da demanda 39
Tabela 13: Resultado de análise de dimensionamento de auxílio 40

Capítulo I
INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A demanda por transporte ferroviário de carga tem aumentado bastante nos últimos anos, principalmente depois da privatização do setor em 1996. Devido à falta de investimento em infra-estrutura ao longo dos anos e à maneira como as ferrovias brasileiras foram construídas no passado, sem um planejamento adequado, a malha ferroviária apresenta uma série de problemas logísticos. O investimento necessário para melhoria e expansão da malha é muito alto e pode não promover as melhorias esperadas, até mesmo piorando o desempenho do transporte.

Portanto, para atender à demanda sem correr os riscos e prejuízos de uma expansão mal planejada é necessário aumentar a capacidade de transporte otimizando o uso dos recursos disponíveis ao máximo. Alterações nas operações ferroviárias são alternativas para aumentar a utilização dos recursos disponíveis. Apesar de complicados por envolverem diversas variáveis de difícil mensuração, os modelos de operação podem ser analisados através do uso de ferramentas de simulação sem que sejam necessários testes no sistema real.

A simulação computacional é uma ferramenta poderosa que permite a análise de diversos sistemas, existentes ou não, sem a necessidade de teste em situações reais que podem resultar grandes prejuízos para a empresa. Pretende-se com este trabalho analisar a operação de locomotivas de auxílio no trecho entre P1-03 (pátio de acesso ao terminal de Andaime, cuja sigla é FOO) e P2-06 (Bom Jardim de Minas, cuja sigla é FOJ).

O terminal de carregamento do Andaime é responsável por quase 50% dos trens de minério de ferro transportados pela MRS Logística, uma melhoria no ciclo desses trens tem grande potencial para melhorar a eficiência do transporte da empresa.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é a análise da viabilidade de duas formas de operação das locomotivas de auxílio no trecho entre Andaime (FOO) e Bom Jardim de Minas (FOJ) através da elaboração de modelos de simulação. O esquema abaixo apresenta a os modelos atual e proposto, onde as setas indicam a operação do auxílio.

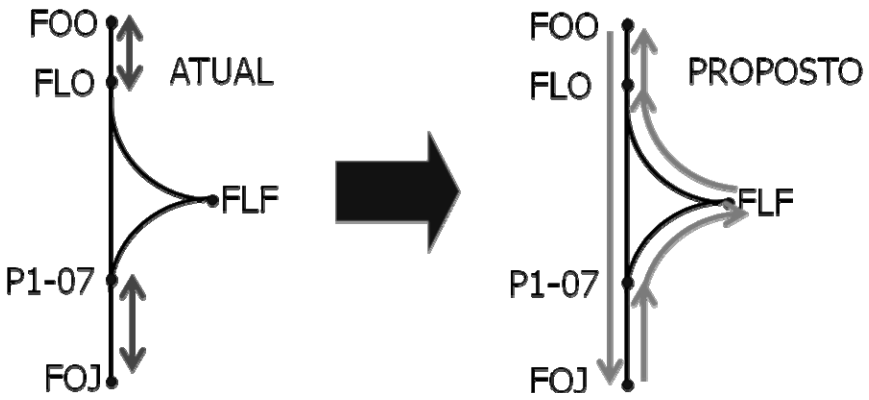


Figura 1: Esquema das Operações de Auxílio Atual e Proposta

Fonte: Autor (2007)

1.3. JUSTIFICATIVAS

A MRS Logística S.A. vem aumentando a cada ano sua produção. Em 2006 transportou 113,3 milhões de toneladas e espera ter um crescimento aproximado de 18% ao ano até atingir 300 milhões de toneladas em 2012. Atualmente o minério de ferro é responsável por cerca de 70% do faturamento da empresa, sendo que aproximadamente 50% do minério transportado tem origem no terminal de Andaime. Com a exploração cada vez maior de minas a tendência é que a demanda por transporte de minério de ferro continue crescendo.

A MRS já tem planos de investimentos em diversos projetos para atender à demanda e aliado a isso busca cada vez mais aumentar a capacidade e eficiência no transporte de cargas. Uma das oportunidades de ganho identificadas é a alteração na operação de auxílios nos trens que carregam no Andaime. Porém essa alteração não pode ser testada em escala real uma vez que são necessários investimentos e os resultados da nova forma de operação não são conhecidos e podem acarretar em custos não justificados e perdas na produção.

A simulação é, portanto, a ferramenta apropriada para a análise permitindo “prever” o comportamento de sistemas não existentes sem a necessidade de alteração no modelo real.

1.4. ESCOPO DO TRABALHO

O objeto da análise é o trecho da Ferrovia do Aço compreendido entre os pátios de Andaime e Bom Jardim de Minas, com foco nos trechos que necessitam do uso de auxílio de tração compreendidos entre FOO –FLO e FJC – FOJ. Será avaliada a possibilidade de

integração dos trechos de auxílio para os trens com origem no Andaime sendo o novo auxílio, portanto, entre FOO e FOJ.

Quanto ao nível de detalhes, serão considerados no modelo de simulação:

- Cruzamento de trens pátio-a-pátio;
- A operação de locomotivas de auxílio como é realizada no dia-a-dia;
- Interferência de trens com outras origens e destinos no trecho analisado;
- Todas as locomotivas possuem o sistema locotrol em funcionamento (sistema de controle da locomotiva de auxílio remota via rádio, sem necessidade de maquinista);

O modelo terá as seguintes limitações:

- Não será feito o dimensionamento automático de locomotivas de auxílio, pois o dimensionamento depende de número de trens que passam pelo local, e o mesmo varia de acordo com o cenário analisado;
- Não será considerada prioridade de circulação, pois não foi considerado um fator crítico para a análise realizada;
- Não serão representadas situações fora do padrão como contingências;
- Não será permitida ultrapassagem de trens;
- Não haverá limites quanto ao número de trens nos terminais
- Será considerado que qualquer trem pode ocupar um pátio independente de seu tamanho;

Para o dimensionamento das locomotivas de auxílio, será considerado que estarão disponíveis quantas locomotivas forem necessárias para atender à demanda de trens, a fim de permitir a definição da quantidade de locomotivas adequada à demanda de trens.

1.5. METODOLOGIA

Vários autores propõem metodologias para projetos de simulação envolvendo diferentes focos e níveis de detalhamento. Para a escolha da metodologia adequada ao trabalho algumas opções foram estudadas.

Para o desenvolvimento de projetos de simulação Chwif e Medina (2006) sugerem que sejam realizadas três etapas, sendo elas a concepção e formulação do modelo, a implementação do modelo e a análise dos resultados obtidos.

Na etapa de concepção o sistema deve ser claramente entendido, assim como seus objetivos. O nível de detalhamento e as premissas também são determinados e os dados necessários, coletados. Posteriormente deve ser elaborado um modelo conceitual da simulação. Durante a etapa de implementação o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional que deve ser validado através dos resultados gerados dentro dos

objetivos estipulados. A etapa de análise consiste em realizar os experimentos e, com base nos resultados gerados, gerar conclusões e recomendações.

O esquema abaixo representa esta metodologia:

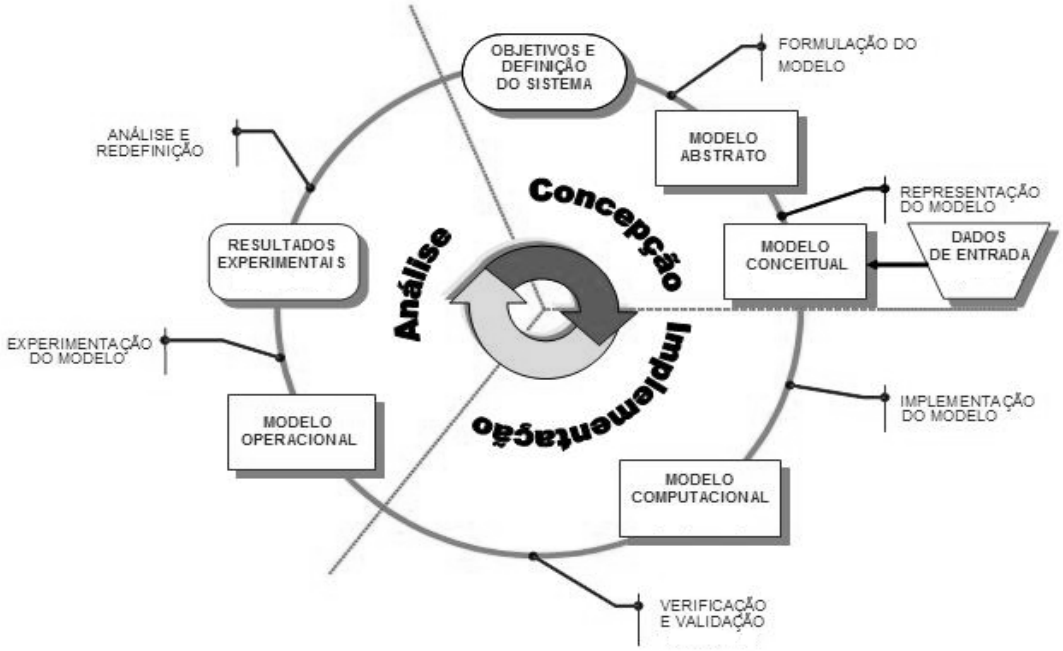


Figura 2: Metodologia de Simulação

Fonte: Chwif e Medina (2006)

Prado (2004) propõe duas etapas: planejamento e execução. O planejamento envolve a identificação do problema, sendo determinadas as metas e o escopo da simulação, incluindo a análise do fenômeno, onde os dados são coletados, a validação do problema, o desenvolvimento de um protótipo e, por fim, a elaboração de um cronograma de execução. Na etapa de execução devem ser modelados os sistemas atual, proposto e os resultados devem ser validados e apresentados sendo compilados em um relatório final.

A metodologia a ser usada no trabalho é proposta por Freitas (2001) com base em textos clássicos de Banks (1984), Pedgen (1990) e Kelton Sadowski (1998) sendo dividida em quatro macro etapas conforme a figura abaixo:

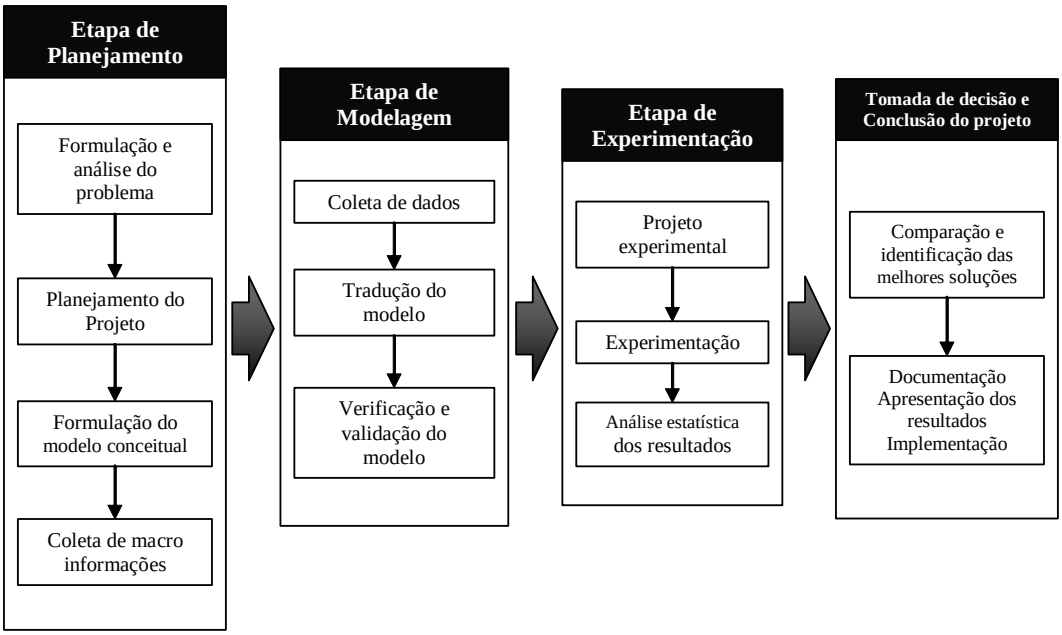


Figura 3: Passos de um estudo de modelagem e simulação

Fonte: Freitas (2001)

- Formulação e Análise do Problema: consiste em compreender o problema, o porquê ele está sendo estudado, o que deve ser considerado como premissa, quais os resultados esperados e como avaliar o sistema.
- Planejamento do Projeto: devem ser determinadas as necessidades de pessoal e recursos e definido um cronograma para o projeto. Além disso, devem ser definidos os cenários a serem considerados nas análises.
- Formulação do Modelo Conceitual: o modelo conceitual é um esboço do sistema, é nessa etapa que se define como o problema será tratado, determinando suas variáveis, parâmetros, componentes e interações lógicas. O nível de detalhamento do modelo conceitual será transferido para o modelo computacional, portanto deve-se ter muito cuidado na sua elaboração.
- Coleta de Macro-Informações e Dados: essa etapa consiste em coletar informações a fim de ser ter um embasamento que permita uma análise crítica do modelo. Os dados coletados serão usados para alimentar os parâmetros do modelo definidos na etapa anterior e devem ser tratados com muito cuidado. A qualidade dos dados está diretamente relacionada com a qualidade dos resultados emitidos pelo modelo.
- Tradução do Modelo: a tradução do modelo nada mais é do que a transcrição do modelo conceitual para uma linguagem de simulação.

- Verificação e validação: essa etapa é fundamental para a credibilidade do modelo, nela o modelo é testado para verificar e validar se os resultados que o mesmo gera são representativos dos resultados do modelo real.
- Projeto Experimental Final: consiste em projetar experimentos que irão gerar as informações desejadas e determinar como cada um dos processamentos computacionais no projeto será executado.
- Experimentação: executar as simulações dos cenários desejados a fim de se obter os dados para a realização das análises.
- Interpretação e Análise dos Resultados: com base nos indicadores gerados pelo modelo, analisar o resultado e verificar a necessidade de realizar mais rodadas do modelo a fim de conseguir maior precisão dos resultados.
- Comparação de Cenários e Identificação das melhores soluções: consiste na comparação dos cenários a fim de identificar a melhor alternativa.
- Documentação, Apresentação dos Resultados e Implementação: elaboração da documentação do sistema e resultados obtidos, seguidos pela apresentação dos mesmos para os clientes do projeto. Após a apresentação o projeto é implementado.

Capítulo II
ESTADO DA ARTE

2.1. INTRODUÇÃO

2.1.1. BREVE HISTÓRICO

O uso de simulação como é usada hoje começou no início dos anos 80 à medida que os computadores foram ficando mais rápidos e baratos. Segundo KELTON e SADOWSK *et al*. (2004) a simulação era usada principalmente como uma ferramenta para determinar a causa de acidentes e quem culpar.

Ao final dos anos 80, com a introdução de computadores pessoais no mercado e a possibilidade de realizar animações, facilitando a visualização dos resultados da simulação, esta começou ganhar terreno nas grandes empresas. Apesar de ainda ser usada majoritariamente para analisar sistemas com falhas em muitos casos a simulação passou a ser solicitada antes do inicio do funcionamento do sistema e, em algumas empresas maiores, passou a ser pré-requisito para grandes investimentos.

Atualmente, com *softwares* cada vez mais amigáveis no mercado, a simulação é usada como uma ferramenta padrão na maioria das empresas americanas. No Brasil a simulação ainda é pouco difundida, sendo usada principalmente por grandes empresas na análise de grandes investimentos para verificar sua viabilidade e potencial de retorno do investimento.

2.1.2. SIMULAÇÃO

A simulação foi definida por vários autores. Schriber (1974), citado por Freitas (2001), define a simulação como a "*modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo*". Pode-se perceber que Schriber não define como necessário para a simulação o uso de um computador, Freitas (2001) explica isso com o fato de que "na época, ainda era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para se estudar e analisar o comportamento de sistemas".

Em 2004 Kelton e Sadowsk *et al*. explicitaram a possibilidade do uso computadores quando definiram a simulação com sendo "*uma vasta coleção de métodos e aplicações para imitar o comportamento do sistema real, geralmente em um computador com o software apropriado*".

Com ou sem o uso de computadores, a simulação é uma ferramenta potente, mas possui algumas limitações. *"Os sistemas reais, geralmente, apresentam uma maior complexidade devida, principalmente, a sua natureza dinâmica e a sua natureza aleatória*" (CHWIF e MEDINA, 2006). Em seu *website* a Paragon, representante do *software* de simulação ARENA no Brasil, mostra que pode não ser possível a representação total de um sistema ao definir simulação como "*a técnica de estudar o comportamento e reações de um determinado sistema através de modelos, que imitam na totalidade ou em parte as propriedades e comportamentos deste sistema em uma escala menor, permitindo sua manipulação e estudo detalhado*" (http://www.paragon.com.br).

2.1.3. QUANDO USAR

Banks *et al.* (2004), Chwif e Medina (2006), Freitas (2001) e Kelton *et al*. (2004) citam que a simulação é comumente usada como ferramenta para responder a questões do tipo "*O que aconteceria se?*". Chwif e Medina notam que "*a lista de alternativas para este tipo de perguntas pode ser infinita*", e, portanto, um modelo de simulação é ideal por ser capaz de analisar diversos aspectos do sistema. Freitas diz que a grande vantagem do "*uso dessa ferramenta, é que tais questões podem ser respondidas sem que os sistemas sob investigação sofram qualquer perturbação*". Em algumas situações pode ser possível realizar experimentos no sistema real, porém, "*em muitos casos, é simplesmente muito difícil, caro, ou impossível realizar estudos físicos no próprio sistema*" (KELTON e SADOWSK *et al*., 2004).

Vários autores citam várias situações onde a simulação é indicada (BANKS e CARSON II *et al.*, 2004, FREITAS, 2001, KELTON e SADOWSK *et al*., 2004), abaixo estão algumas delas:

- <u>O sistema real ainda não existe</u>: não é possível determinar o melhor layout para uma fábrica, por exemplo, através de testes se a fábrica ainda não foi construída.
- <u>Experimentar com o sistema real pode ser dispendioso</u>: no caso do layout da fábrica, pode ser muito caro parar a produção para alterar o layout e testar todas as possibilidades.
- <u>Experimentar com o sistema real não é apropriado</u>: não é conveniente causar um desastre aéreo num aeroporto ou alterar os procedimentos de atendimento ou escala num hospital de emergência para ver o que acontece.
- <u>É muito difícil ou impossível:</u> aumentar o número de clientes em uma agência bancária é muito difícil por não se ter controle dessa variável.

Kelton *et al*. (2004) resumem na seguinte frase as vantagens da simulação: "*Ninguém se fere, e a sua liberdade de testar uma grande variedade de idéias com o modelo pode trazer a tona alternativas atraentes que não poderiam ser testadas no sistema real*".

No entanto, deve-se tomar muito cuidado na construção dos modelos, um modelo mal elaborado e com muitas simplificações pode não representar bem o sistema assim como um modelo muito detalhado. Segundo Freitas (2001), os erros mais comuns na abordagem da simulação são pouco conhecimento ou pouca afinidade com a ferramenta utilizada, objetivos com pouca clareza e definição, construção de modelo com níveis de detalhamento inadequado e a realização de conclusões em uma única replicação.

A definição dos elementos a serem considerados na simulação é muito importante, pois interfere na necessidade de dados de entrada e conseqüentemente nos resultados obtidos. A qualidade dos resultados da simulação esta diretamente relacionada com a qualidade dos dados de entrada, portanto a coleta de dados deve ser realizada com muito critério.

2.2. ELEMENTOS BÁSICOS DA SIMULAÇÃO

Banks e Carson II (2004) definem os elementos básicos da simulação como:

2.2.1. ENTIDADES

As entidades são as partes que "circulam" no modelo, elas têm seu estado alterado, afetam e são afetadas por outras entidades, ocupam recursos e filas, e interferem no estado do sistema. As entidades podem ser criadas individualmente ou em lotes.

2.2.2. ATRIBUTOS

Os atributos são características próprias da entidade, ele é comum a todas as entidades, porém pode assumir valores diferentes diferenciando cada uma. Um exemplo de atributo é o horário de entrada no sistema, cada entidade terá seu próprio horário de chegada.

2.2.3. VARIÁVEIS

As variáveis são informações que refletem algumas características do sistema, independente das entidades circulando. As variáveis podem ser números reais, vetores ou matrizes, de acordo com a necessidade de organizar as informações.

2.2.4. RECURSOS

Os recursos fornecem serviços às entidades. No geral as entidades competem entre si para ocupar os recursos que geralmente representam pessoas, máquinas ou espaço em área de estocagem.

2.2.5. FILAS

As filas são os locais ocupados pelas entidades enquanto elas esperam por um recurso ocupado com outra atividade ou entidade. A fila pode ser processada de acordo com diferentes regras como prioridades e ordem de chegada, entre outros.

2.2.6. EXEMPLO

A tabela abaixo apresenta exemplos dos elementos básicos de simulação para alguns sistemas:

Tabela 1: Exemplo de sistemas e seus componentes

SISTEMA	ENTIDADES	ATRIBUTOS	ATVIDADES	EVENTOS	VARIÁVEIS
Banco	Clientes	Saldo em conta	Realizar um depósito	Chegada; Saída	Número de caixas ocupados; número de clientes esperando
Trem bala	Passageiros	Origem e destino	Viajar	Chegada na estação; Chegada ao destino	Número de passageiros esperando em cada estação; número de passageiros em transito
Produção	Máquinas	Velocidade; capacidade; Taxa de quebra	Soldagem;	Quebra	Estado da máquina (ocupada, livre, quebrada)
Comunicações	Mensagens	Tamanho; destino	Transmissão	Chegada ao destino	Número esperando para ser transmitido
Inventário	Estoque	Capacidade	Saídas	Demanda	Nível de estoque; pedidos atrasados

Fonte: Banks e Carson II (2004)

2.3. SIMULAÇÃO MONTE CARLO

A utilização do Método Monte Carlo como uma ferramenta de pesquisa tem origem no trabalho de Von Neumann e Ulan, realizado em 1940, relacionado a bombas atômicas durante a segunda guerra mundial. Segundo Gavira (2003), nesse trabalho os pesquisadores associaram a expressão “Análise de Monte Carlo” com uma técnica que utilizaram para solucionar alguns problemas de blindagem de reatores nucleares, muito caros para uma solução experimental ou muito complicados para um tratamento analítico.

Saliby (1989) diz que a aplicação com método Monte Carlo originalmente voltava-se para a avaliação de integrais múltiplas, mas logo começou a ser aplicado para diversos outros problemas matemáticos complexos.

Com o desenvolvimento de computadores, o Método Monte Carlo pôde ser estendido para problemas probabilísticos mais genéricos. A partir daí verificou-se que seria possível simular um processo e estimar seus principais parâmetros de operação, dando origem a Simulação Monte Carlo.

A Simulação Monte Carlo, também conhecida como simulação estática, representa um sistema em um momento especifico, não considerando mudanças com a passagem do tempo (BANKS *et al.*, 2004). Ela é baseada na freqüência relativa de ocorrência do acontecimento de certo fenômeno que se aproxima da probabilidade matemática de ocorrência do mesmo fenômeno, quando a experiência é repetida um grande número de vezes.

O Método de Simulação Monte Carlo fornece soluções aproximadas de uma ampla variedade de problemas matemáticos através de experimentos de amostragens estatísticas em um computador. O método pode ser usado tanto para problemas sem conteúdo probabilístico como para problemas conhecidos de estrutura probabilística.

2.4. SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

De acordo com Chwif e Medina (2006) “*a Simulação de Eventos discretos é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em momentos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos*”. A simulação de eventos discretos, diferentemente da Simulação Monte Carlo, tem na passagem de tempo uma variável importante, e é usada para representar o comportamento de um modelo no decorrer do tempo.

Os modelos de simulação são “rodados”, criando um histórico artificial de um sistema. Com base nas considerações feitas e a partir das observações realizadas e coletada é possível estimar os indicadores do sistema real (BANKS *et al.*, 2004).

Como a simulação é baseada em modelos reais, contêm muitos dados e informações, sendo na maioria das vezes necessário o uso de computadores e *softwares* específicos para esta função. Entre os *softwares* mais conhecidos estão o Arena, AutoMod, QUEST, ProModel, SIMUL8 entre outros.

O *software* a ser usado no desenvolvimento do trabalho é o Arena e será apresentado a seguir.

2.5. ARENA

O *software* de simulação Arena foi lançado em 1993 pela empresa *System Modeling* e foi o sucessor de outros dois *softwares* de simulação, o SIMAN e o CINEMA. O SIMAN foi lançado em 1982 e em 1984 recebeu o CINEMA como complemento, adicionando ao software habilidades de animação gráfica. Em 1993 os dois programas foram unificados e aperfeiçoados, dando origem ao Arena.

Em 2000 a *System Modeling* foi comprada pela *Rockwell Software*, impulsionando o desenvolvimento do *software* através de lançamento de novas versões com cada vez mais recursos disponíveis. A versão disponível mais atual do Arena é a 11.0.

O Arena possui uma interface gráfica amigável utilizando módulos para descrever um sistema real. Tais módulos funcionam como comandos de uma linguagem de simulação e são estruturados de maneira que a construção do modelo seja muito similar à elaboração de um fluxograma do sistema, facilitando muito a construção do modelo computacional do sistema. Cada módulo possui uma série de parâmetros configuráveis de acordo com as especificações do modelo estudado.

Além de ser um *software* de simulação o Arena possui outras ferramentas muito úteis, sendo elas: o *Input Analyser*, que permite uma análise estatística dos dados coletados para determinar qual curva de distribuição melhor aproxima dos dados reais através de testes como o Qui-Quadrado e o Kolmogorov-Smirnov; o *Output Analyser*, que permite análises estatísticas dos resultados da simulação; e o OptQuest, que permite otimizar o modelo de acordo com os parâmetros desejados.

Capítulo III
DESCRIÇÃO

3.1. FERROVIA

A história da ferrovia no Brasil tem inicio em 1835, quando o governo passou a oferecer privilégios a quem construísse uma estrada de ferro do Rio de Janeiro (então capital) para as províncias de Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Bahia.

A primeira ferrovia brasileira, porém, só foi inaugurada em 30 de abril de 1854. Ela foi construída por Visconde de Mauá e ligava o porto de Mauá até a raiz da Serras da Petrópolis. Estrada de Ferro Mauá, permitiu a integração das modalidades de transporte aquaviário e ferroviário, introduzindo a primeira operação intermodal do Brasil. O pontapé inicial havia sido dado e as companhias ferroviárias brasileiras começaram a surgir.

Em 1922 o Sistema Ferroviário Brasileiro já contava com, aproximadamente, 29.000 Km de extensão, cerca de 2.000 locomotivas e 30.000 vagões em tráfego. Em 1930 Vargas iniciou um processo de revitalização das ferrovias através da encampação das empresas em má situação financeira. Assim, foram incorporadas ao patrimônio da União várias estradas de Ferro.

No início da década de 50 o Governo Federal decidiu pela unificação da administração das 18 estradas de ferro pertencentes à União, num total de 37.000 Km. Foi Criada em 16 de Março de 1957 a Rede Ferroviária Federal com a finalidade de administrar, explorar, conservar, reequipar, ampliar e melhorar o tráfego das estradas de ferro da União.

De 1980 a 1992, os sistemas ferroviários pertencentes à Rede Ferroviária Federal S.A. foram afetados de forma dramática com a redução dos investimentos em ferrovias. Na impossibilidade de gerar os recursos suficientes para continuar financiando os investimentos necessários, o Governo Federal colocou em prática ações voltadas à desestatização da malha ferroviária brasileira. O processo de privatização teve inicio em 1996 e foi concluído em 1999 dando origem as empresas de transporte ferroviário existentes hoje.

Pode-se concluir, portanto que, assim como a primeira ferrovia brasileira, o desenvolvimento ferroviário dependeu do incentivo governamental para emplacar. À medida que as políticas de governo apoiavam, ou não, a ampliação e modernização das ferrovias, o transporte ferroviário decaía, estagnava ou evoluía. O quadro abaixo mostra a evolução do sistema ferroviário de acordo com fases cronológicas.

Tabela 2: Evolução do sistema ferroviário de acordo com fases cronológicas

FASE	PERÍODO	DESCRIÇÃO
Fase I	Regência e Segundo Reinado (1835 - 1873)	Início da implantação de ferrovias no Brasil com desenvolvimento lento principalmente de empresas privadas.
Fase II	Segundo Reinado (1873 – 1889)	Expansão acelerada da malha ferroviária, através de empreendedores privados, estimulados pela garantia de juros.
Fase III	República Velha (1889 – 1930)	Expansão acelerada da malha; Devido a dificuldades financeiras o estado é obrigado a assumir o controle de várias.
Fase IV	Vargas e o pós-guerra (1930 – 1960)	Ritmo de expansão reduzido e um controle estatal de empresas antes privadas.
Fase V	Regime Militar (1960 – 1990)	Malha consolidada em poucas empresas públicas; Erradicação de ramais antieconômicos e implantação de projetos seletivos de caráter estratégico.
Fase VI	Nova República (1990 - ?)	Marcado pela privatização de todo o sistema ferroviário nacional; Retomada de investimentos em via e material rodante.

Fonte: www.dnit.gov.br (2007)

3.2. MRS LOGÍSTICA S.A.

A MRS Logística é a concessionária que controla, opera e monitora a Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal atuando desde o ano 1996. As linhas da MRS abrangem a região mais desenvolvida do país, onde se concentra cerca de 65% do PIB brasileiro, interligando as cidades de Belo Horizonte, São Paulo e Rio de Janeiro e com acesso a importantes portos brasileiros.

O foco de transporte da MRS é em cargas gerais, como minérios, produtos siderúrgicos acabados, cimento, bauxita, produtos agrícolas, coque verde e contêineres. Desde que assumiu a malha da região sudeste a MRS Logística tem aumentado constantemente sua capacidade de transporte.

A MRS Logística S.A. vem aumentando a cada ano a sua produção. Em 2006 transportou 113,3 milhões de toneladas, e espera ter um crescimento aproximado de 18%

ao ano até atingir 300 milhões de toneladas em 2012. Atualmente o minério de ferro é responsável por cerca de 70% do faturamento da empresa.

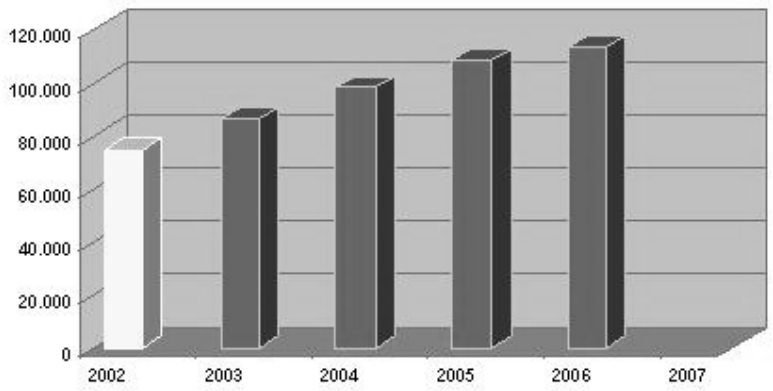


Figura 4: Indicador Operacional anual da MRS em volume transportado
Fonte: www.mrs.com.br (2007)

Devido à condição precária da malha ferroviária à época da privatização e à falta de mão de obra qualificada houve a necessidade de investimentos em recuperação da via permanente, melhoria das instalações, renovação da frota de locomotivas e vagões e treinamento dos profissionais desde o inicio da concessão.

O investimento em melhoria de via e ativos, no entanto, não elimina nem corrige alguns problemas operacionais oriundos de falta investimento em infra-estrutura ao longo dos anos e de planejamento na construção da ferrovia. A maioria desses problemas são devidos à geometria da via e ao traçado da malha, sendo limitadores de velocidade máxima de circulação, tamanho do trem e necessidade de auxílio tração entre outros. Com o aumento da demanda, tais limitações operacionais começaram a ficar evidentes e surgiu a necessidade de contornar tais problemas.

3.3. OPERAÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO

O minério de ferro transportado pela MRS é carregado em oito terminais localizados na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, sendo os terminais de Andaime e Pires localizados na Frente Norte da Ferrovia do Aço, os terminais de Olhos D'Água, Sarzedo, Sarzedo Novo, Souza Noschese, Córrego do Feijão e Alberto Flores no ramal do Paraopeba e o terminal de Casa de Pedra na Linha do Centro.

Os principais destinos de minério de ferro são CSN (Volta Redonda), COSIPA (Piaçaguera ou São Bento), Porto de Sepetiba, Porto da Ilha de Guaíba e outros com menor

volume de transporte mensal como Belgo (Juiz de Fora), Açominas e Patrag (Ouro Branco). A figura abaixo mostra a localização dos pontos de carga e descarga da MRS:

Figura 5: Pontos de carga e descarga de minério

Fonte: Autor (2007)

Atualmente o destino de carregamento de cada trem é decidido quando o mesmo passa pelo pátio FPK, localizado na cidade de Conselheiro Lafaiete, ou por Murtinho, para os trens da Açominas e Patrag. No caso dos trens da CSN, que carregam sempre em Casa de Pedra, não há necessidade de decidir o seu destino.

A grande concentração dos pontos de carga, apesar de facilitar na programação dos carregamentos por adiar a decisão quanto ao destino do trem a ser carregado, faz com que o fluxo de trens na região seja muito intenso. Considerando que todos os trens que circulam na região inserida neste estudo precisam da ajuda de auxílio de tração para vencer no mínimo um trecho, chegando a até três trechos com necessidade de auxílio, tal concentração se torna um problema à medida que os trens enfrentam dificuldade para circular devido a congestionamento de pátios e à necessidade de aguardar o retorno das locomotivas de auxílio para poder seguir.

Os atrasos na circulação devido a esses problemas causam prejuízos para a empresa de várias formas, pois, além do minério de ferro ser o carro-chefe e a maior fonte de lucro, os atrasos geram ociosidade para os clientes e faz com que o ciclo do trem (tempo

que demora para voltar a um mesmo ponto) aumente desnecessariamente sem agregar valor ao produto.

Para tentar reduzir o tempo de ciclo na região está sendo proposta uma alteração na operação dos trens com destino ao terminal de Andaime, que corresponde a cerca de 50% do minério de ferro para exportação transportado pela MRS. A proposta é integrar os dois trechos de auxílio em um só e evitar que o trem precise parar mais de uma vez por este motivo.

3.4. TERMINAL DE ANDAIME

Localizado em Rio Acima, o Terminal Ferroviário de Andaime, iniciou sua operação em julho de 1994, para atender à Mina do Pico, e atualmente também recebe o minério beneficiado na planta de Vargem Grande.

Figura 6: Terminal Ferroviário de Andaime
Fonte: www.mbr.com.br (2007)

O terminal de Andaime é de propriedade da MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S/A, recentemente incorporada pela Companhia Vale do Rio Doce), uma das cinco maiores produtoras e exportadoras de minério de ferro do mundo e a segunda do Brasil. A MRS Logística é responsável por transportar o minério do Andaime até o Terminal Marítimo da Ilha Guaíba, com capacidade de embarcar 25 milhões toneladas/ano.

O Terminal Ferroviário de Andaime é um dos principais pontos de carga da MRS, com capacidade nominal total de carregar até 12 trens de 132 vagões por dia, e sendo responsável por cerca de 50% dos carregamentos diários de minério de ferro para exportação.

O terminal possui duas linhas de carregamento, com capacidade de abrigar dois trens carregados e dois trens vazios simultaneamente, sendo que um carregamento só pode iniciar se a linha à frente do silo a ser utilizado estiver livre, ou seja, sem algum trem carregado esperando para circular.

3.5. FJC – PÁTIO CORONEL GUEDES (P1-07)

O pátio Coronel Guedes (FJC, é um dos principais pátios da MRS, sendo ponto de parada obrigatório para todos os trens que circulam na ferrovia do aço. São realizadas diversas atividades em FJC, sendo elas:

Tabela 3: Atividades realizadas no pátio FJC

	Atividade
1	Abastecimento de Óleo Diesel
2	Abastecimento de Areia
3	Limpeza da Cabine da Locomotiva
4	Revista de Manutenção
5	Anexação de Locomotivas de Auxílio
6	Adequação da Tração
7	Troca de equipagem (maquinista)
8	Enlace de Locotrol

Fonte: MRS Logística S.A. (2007)

O tempo estimado para que todas estas atividades sejam realizadas é de uma hora e meia, porém, devido ao atraso em algumas atividades, aos imprevistos, à necessidade de reparo nas locomotivas e principalmente ao tempo de espera pelo retorno das locomotivas de auxílio, o tempo no pátio chega a atingir três horas em alguns casos. Isso acaba tendo um efeito dominó, pois os trens não saem do pátio por falta de auxílio e não liberam linha para que os outros trens possam entrar no pátio, gerando fila e conseqüentemente congestionamentos e restrições para circulação.

Apesar de ter capacidade para receber quatro trens simultaneamente, o FJC é o principal gargalo para os trens que circulam na ferrovia do aço com destino ao Rio de Janeiro ou São Paulo. Atualmente passam cerca de 25 trens por dia no FJC e a redução no tempo de permanência dos trens neste pátio têm grande potencial para melhorar a operação e reduzir os efeitos do gargalo.

3.6. OPERAÇÃO DE AUXÍLIO

As ferrovias podem ser construídas por meio de dois sistemas: 1) simples aderência, no qual existe um contato simples e direto da roda para com o trilho; e 2) cremalheira, em que as locomotivas possuem uma roda central dentada e motora que se encaixa em um trilho suplementar, também dentado.

A aderência é a quantidade de “agarramento” que existe entre a roda e o trilho. Deste modo, no caso de rampas muito íngremes, os esforços para tracionar o veículo podem superar a aderência e, assim, as rodas começam a “patinar”, impedindo que o veículo ferroviário vença o percurso íngreme. Rampas com inclinação acima de 1,5% já começam a ser prejudiciais ao transporte ferroviário, muito embora alguns segmentos da ferrovia – construídos no passado – possuam valores consideravelmente mais elevados.

Nos trechos de simples aderência, é possível vencer rampas elevadas pela introdução de uma ou mais locomotivas de auxílio na cauda do trem, que ajudam a empurrá-lo no sentido ascendente. Essas locomotivas são exclusivas para esse serviço e retornam ao início da rampa tão logo tenham terminado de empurrar um determinado trem. Nesse retorno locomotivas de auxílio são chamadas de “escoteiras”.

A MRS possui os seguintes trechos com necessidade de auxílio, apresentados no esquema abaixo:

Tabela 4: Trechos com necessidade de auxílio

	ORIGEM	DESTINO
1	Km 575 (FCC)	Marinhos (FMS)
2	Arrojado Lisboa (FAL) Caetano Lopes (FLP)	Coronel Guedes (FCJ / P1-07)
3	Otávio Dapievi (FOO/P1-03)	Lagoa dos Porcos (FLO / P1-05)
4	Coronel Guedes (FCJ / P1-07)	Bom Jardim de Minas (FOJ)
5	Barra do Piraí (FBP) Posto Km 64 (FQS)	Humberto Antunes (FHA)
6	São José dos Campos (FSJ)	Campo Grande (ICG)

Fonte: MRS Logística S.A. (2007)

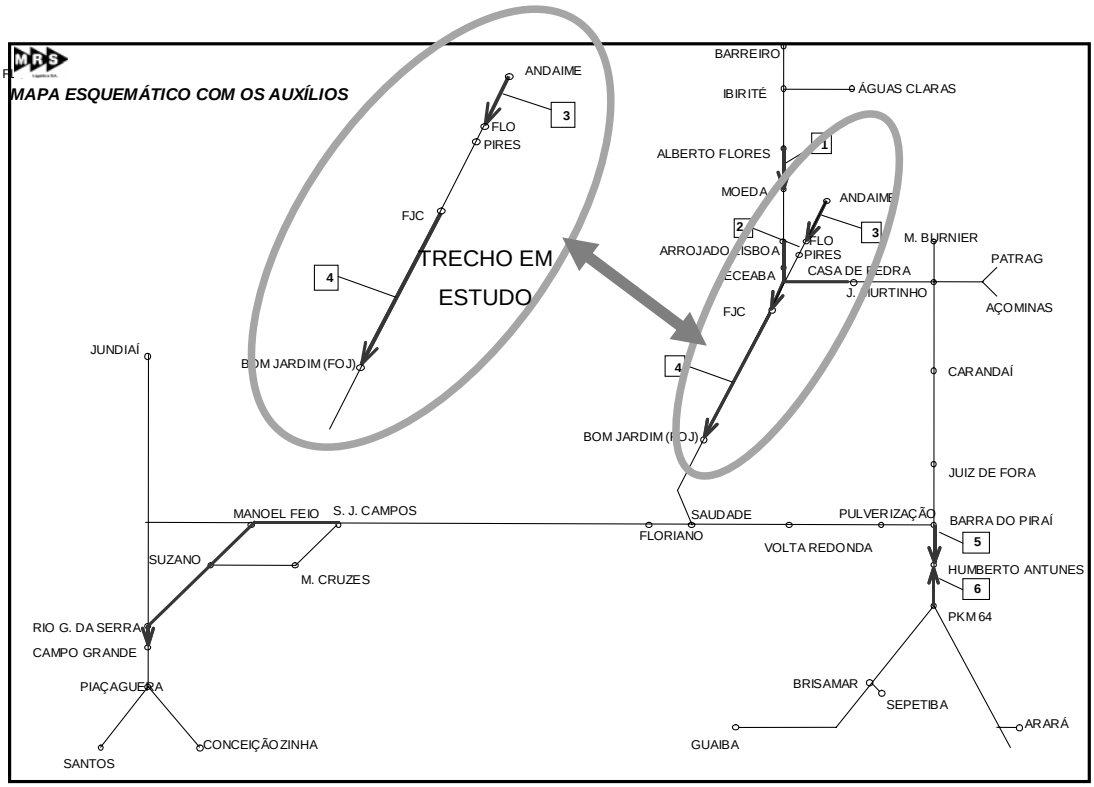


Figura 7: Trechos com necessidade de auxílio

Fonte: MRS Logística S.A. (2007)

Os trechos de auxílio de interesse para o estudo são:

- **FOO – FLO**

O auxílio é anexado ao trem no Pátio de Otávio Dapievi (FOO/P1-03) ou Terminal de Andaime. Uma vez anexadas as máquinas de auxílio, o trem segue até o Pátio de Lagoa dos Porcos (FLO / P1-05). Neste local o auxílio é desanexado e encerra, por conseguinte, a sua função, retornando ao Pátio de Otávio Dapievi.

O auxílio é fixo para esse trecho, sendo que somente um trio de locomotivas (maio de 2007) está disponível para essa operação. O tempo ideal de ciclo (FOO-FLO-FOO) estimado corresponde a duas horas, portanto com uma capacidade média de doze trens por dia. Esse ciclo, porém, representa uma situação ideal e isenta de anomalias – o que não reflete, em sua totalidade, a realidade da operação no trecho.

Dentre as atividades “fora de padrão”, que constituem anomalias, podemos citar a falta de equipagem, os acidentes com trens, os defeitos em locomotivas e vagões, os pátios congestionados e, ainda, a espera por reforço de tração (auxílio). Além disso, devido à necessidade de liberar linha no terminal para que outro trem possa começar a carregar, é retirada uma locomotiva do trem que vai iniciar o carregamento para auxiliar o trem

carregado até o pátio P1-04 (entre FOO e FBG) onde o trem aguarda o auxílio para vencer o trecho seguinte.

- **FJC – FOJ**

O pátio de origem do trecho deste auxílio é o Pátio de Coronel Guedes (FJC/P1-07). O trem realiza diversas atividade no pátio e depois de anexar as máquinas de auxílio, segue até o Pátio de Bom Jardim de Minas (FOJ). Neste local o auxílio é desanexado, encerrando a sua função e, portanto, retornando ao Pátio de Coronel Guedes.

O auxílio no FJC opera de maneira distinta do FOO, pois o número de locomotivas no auxílio pode variar de acordo com o tipo de trem, sendo necessária uma locomotiva para trens de carga geral e duas locomotivas para os trens de minério.

No retorno para Coronel Guedes – devido ao considerável número de máquinas que operam no trecho – as escoteiras (composições formadas somente por locomotivas) devem ser composta por, no mínimo, quatro locomotivas. O que ocorre na prática é o retorno de escoteiras com números mais elevados de locomotivas, pois os trens carregados têm prioridade de circulação em relação às locomotivas escoteiras de retorno do auxílio. Tal fato deve ser observado com cautela, uma vez que pode ocasionar defasagem de auxílios em FJC.

Capítulo IV
SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. COMPREENSÃO DO SISTEMA

Para que um modelo de simulação representasse fielmente a forma real da operação ferroviária neste trecho, foi elaborado um fluxograma com o detalhamento de cada etapa pela qual passam os trens que carregam no terminal de Andaime, assim como um fluxograma da operação proposta. Os fluxos dos modelos serão apresentados abaixo. Para elaborar os modelos foi considerado como ponto inicial o pátio Posto Alfa (ou FLF), pátio ferroviário situado na rota de passagem do trem vazio que se destina ao carregamento no terminal de Andaime, e como ponto final o mesmo pátio da operação atual, ou seja, o pátio de Bom Jardim de Minas (FOJ).

Para facilitar a compreensão, a tabela abaixo mostra o nome dos pátios envolvidos no modelo e como eles são conhecidos.

Tabela 5: Pátios Envolvidos no Modelo

SIGLA DO PÁTIO	NOME
FOO (P1-03)	Otávio Dapievi, Andaime
FBG (P1-04)	São Gonçalo do Bação
FLO (P1-05)	Lagoa dos Porcos
FPY	Terminal de Carregamento Pires
FJC (P1-07)	Coronel Guedes
FOJ (P2-06)	Bom Jardim de Minas
FLF	Posto Alfa

Fonte: Autor

4.1.1. FORMA DE OPERAÇÃO ATUAL

O terminal de Andaime comporta dois trens em carga, utilizando duas linhas paralelas para carregar os trens. Atualmente os trens que carregam no Andaime seguem para o terminal direto, parando somente em caso de necessidade de realizar cruzamento. Ao chegar ao terminal podem ocorrer três situações: não ter nenhum trem no terminal; ter um trem no terminal; ou ter dois trens no terminal. Caso não tenha nenhum ou tenha somente um trem no terminal, o carregamento pode ser iniciado. Caso tenha dois trens no terminal, é

necessário que um dos dois trens que estão em carga, termine o carregamento e saia do terminal para que o carregamento do trem na fila possa começar.

O carregamento é dividido em três etapas conhecidas por: antes da carga (AC), carga (CAR) e depois da carga (DC). O antes da carga consiste na preparação para o carregamento, nessa etapa ocorre a troca do maquinista do trem por outro que fará o carregamento, a inspeção da composição e o posicionamento do trem para começar a carga. A presença de um trem na linha à frente do carregamento não impede a realização do AC. Caso não tenha nenhum trem na linha à frente do silo onde o trem vai ser carregado, inicia-se o carregamento. Após o término da carga, é anexado o trio de locomotivas de auxílio, ocorre a troca de maquinista e, depois de receber a nota fiscal da mercadoria, o trem fica à disposição da circulação para seguir para a descarga.

Seqüência	Atividade	Se 1	
0	Início	-	
1	*Tem maquinista carregador na estação?*	Pára para trocar maquinista	**Antes da Carga**
2	*Deslocar até o ponto E*	-	
3	Aguardar no ponto E até receber instruções da MBR	-	
4	Deslocar o trem para o ponto A referente ao silo indicado pela MBR e mudar estado para "à disposição do cliente"	-	
5	Aguarda autorização para posicionar no silo	-	
6	Posiciona trem	-	
6	Altera estado para "entregue ao cliente"	-	
6	Abastece o Silo	-	
7	Carga e Asperção do produto	-	
7	Inspeção da composição pelo maquinista	-	**Carga**
8	Fim da carga	-	
9	Puxa o trem até o marco	-	
10/11	Prepara DCL (despacho)	-	**Depois da Carga**
10	*Auxílio disponível?*	Aguarda auxílio	
11	Anexa auxílio	-	
12	Trem pronto para partir	-	
13	Contato com CCO para licença	-	
14	Aguarda licença	-	
15	Partida	-	

Figura 8: Passo a passo do carregamento no Andaime

Fonte: MRS Logística (2007)

Em alguns casos, quando o trio de locomotivas de auxílio não está imediatamente disponível para o trem carregado e existe um trem na fila aguardando para iniciar o carregamento, é retirada uma das locomotivas do trem na fila para ser anexada ao trem

carregado. Com o auxílio de uma locomotiva o trem consegue vencer o percurso até o pátio FBG (entre FOO e FLO) e liberar o terminal para que possa iniciar um novo carregamento. Nesse pátio o trem aguarda o auxílio do trio de locomotivas, pois não consegue seguir com apenas uma locomotiva de auxílio até FLO e a locomotiva que foi emprestada pelo trem da fila retorna para o Andaime. Em qualquer dos casos apresentados o trem carregado pára em FLO para retirar as locomotivas de auxílio e, posteriormente, segue direto até o FJC. As locomotivas de auxílio retornam para o terminal de Andaime para auxiliar outro trem.

No pátio FJC, as locomotivas do trem passam por uma revista de manutenção, a cabine da primeira locomotiva é limpa, os tanques de combustível das três locomotivas do trem são abastecidos, assim como os tanques de areia. Além disso é feita a troca de equipagem e anexada a dupla de auxílio. O tempo do trem no pátio costuma se estender mais do que o planejado, pois, com freqüência, não existem locomotivas de auxílio no local e o trem precisa aguardar o retorno das mesmas para poder seguir viagem.

Depois de sair do FJC o trem segue para o pátio FOJ onde desanexa as locomotivas de auxílio, troca equipagem, faz teste de cauda e segue com destino ao terminal de descarga. As locomotivas de auxílio aguardam no pátio até que uma composição com no mínimo quatro locomotivas possa ser formada e então voltam para o FJC para auxiliar outros trens. Como em muitos casos os trens têm preferência de circulação em relação às locomotivas escoteiras, a formação para retorno das locomotivas geralmente ultrapassa o número de quatro locomotivas, aumentando a ociosidade das mesmas no pátio FOJ. Devido a este fato, freqüentemente, ocorre uma defasagem no número de locomotivas no FJC, aumentando o tempo de permanência dos trens neste pátio e gerando congestionamento em outros pátios anteriores a ele.

Atualmente existe um trio de locomotivas disponível para realizar o auxílio entre FOO e FLO e 28 locomotivas para o auxílio com origem no FJC e término em FOJ. Abaixo segue o fluxograma detalhado da forma de operação atual.

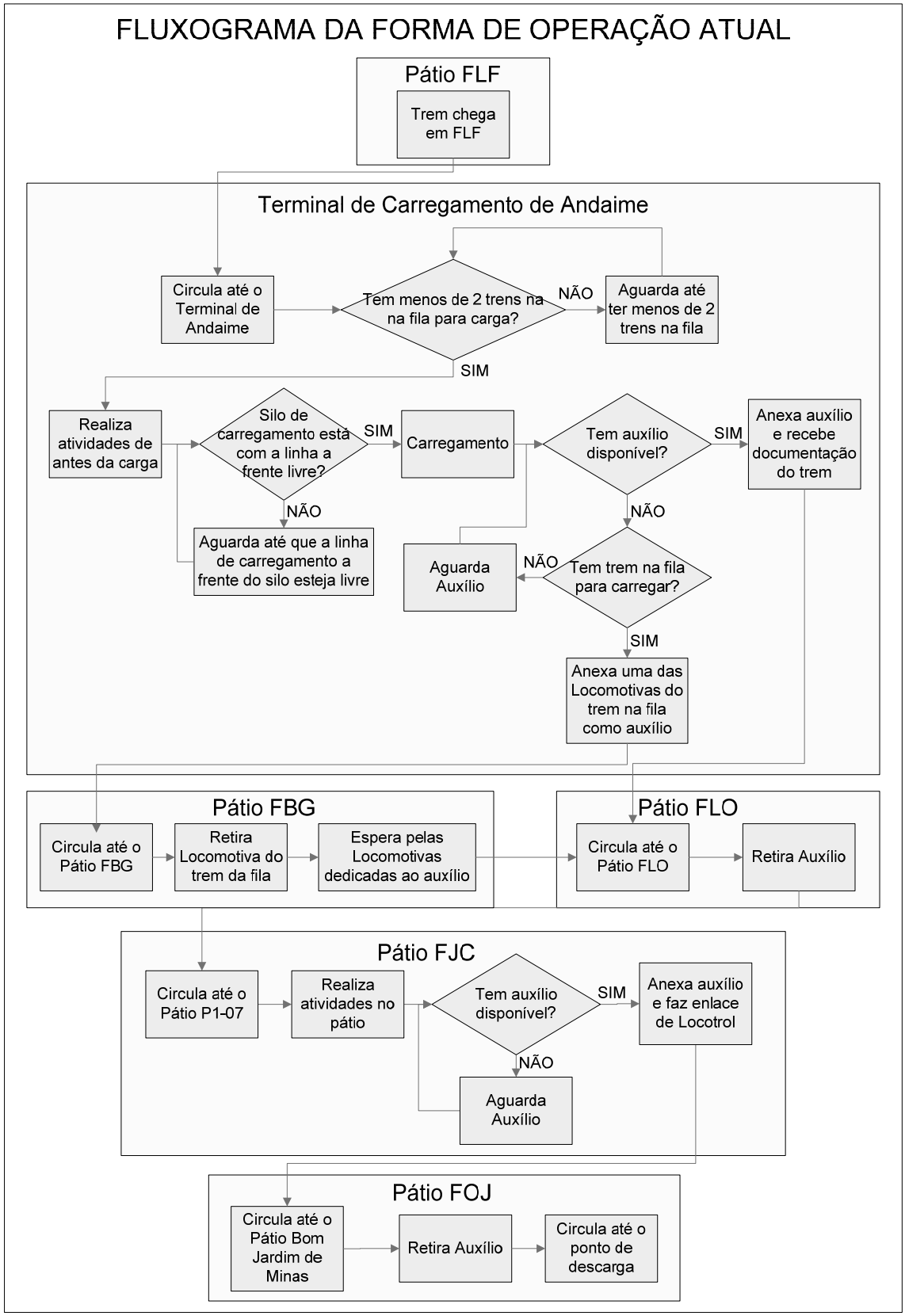


Figura 9: Fluxograma da Forma de Operação atual

Fonte: Autor (2007)

4.1.2. FORMA DE OPERAÇÃO PROPOSTO

Para viabilizar a redução no tempo de ciclo dos trens que carregam no Andaime foi proposto que, em substituição aos auxílios atuais, seja utilizado um único auxilio no trecho entre o pátio Posto Alfa e FOJ. Para tal, a operação no trecho deveria ser conforme apresentada abaixo.

O trem com destino ao Andaime, ao passar pelo Posto Alfa, receberá as duas locomotivas de auxílio na cabeça (frente) do trem. As locomotivas seguirão no trem desligadas e serão utilizadas somente nos trecho em que são necessárias. Depois de receber o auxílio o trem segue direto para o terminal de carregamento.

Ao chegar ao terminal de carga, antes de entrar no pátio do P1-03, duas das locomotivas são deslocadas para outra linha e o trem segue até o ponto de posicionamento para iniciar o carregamento. Logo que o trem estiver em posição de carregamento as duas locomotivas retiradas anteriormente e posicionadas em outra linha, seguem o trem até o fim do carregamento. Os procedimentos de antes da carga, carga e depois da carga continuam os mesmos, porém assim que termina o carregamento do trem as locomotivas de auxílio são anexadas e é feito o enlace de locotrol (link do sinal de rádio entre a primeira locomotiva do trem e a primeira locomotiva de auxílio, chamada de locomotiva remota). Ao sair de Andaime o trem segue direto para o FJC, sem parar em FLO para retirar o auxílio.

As atividades realizadas em FJC passam as ser somente o abastecimento de óleo diesel e a troca de equipagem. Em seguida o trem segue direto para FOJ onde deixa as locomotivas de auxílio, troca equipagem e faz o teste de cauda.

O procedimento para a formação das escoteiras continua o mesmo. Quanto ao dimensionamento do número de locomotivas necessárias para atender os trens do Andaime, a proposta é que a base de auxílios de FJC e do Posto Alfa sejam a mesma, pois os pátios são muito próximos. Para isso estima-se que seja necessário um aumento de aproximadamente 8 a 12 locomotivas para o auxílio.

Abaixo segue o fluxograma detalhado do modelo de operação proposto.

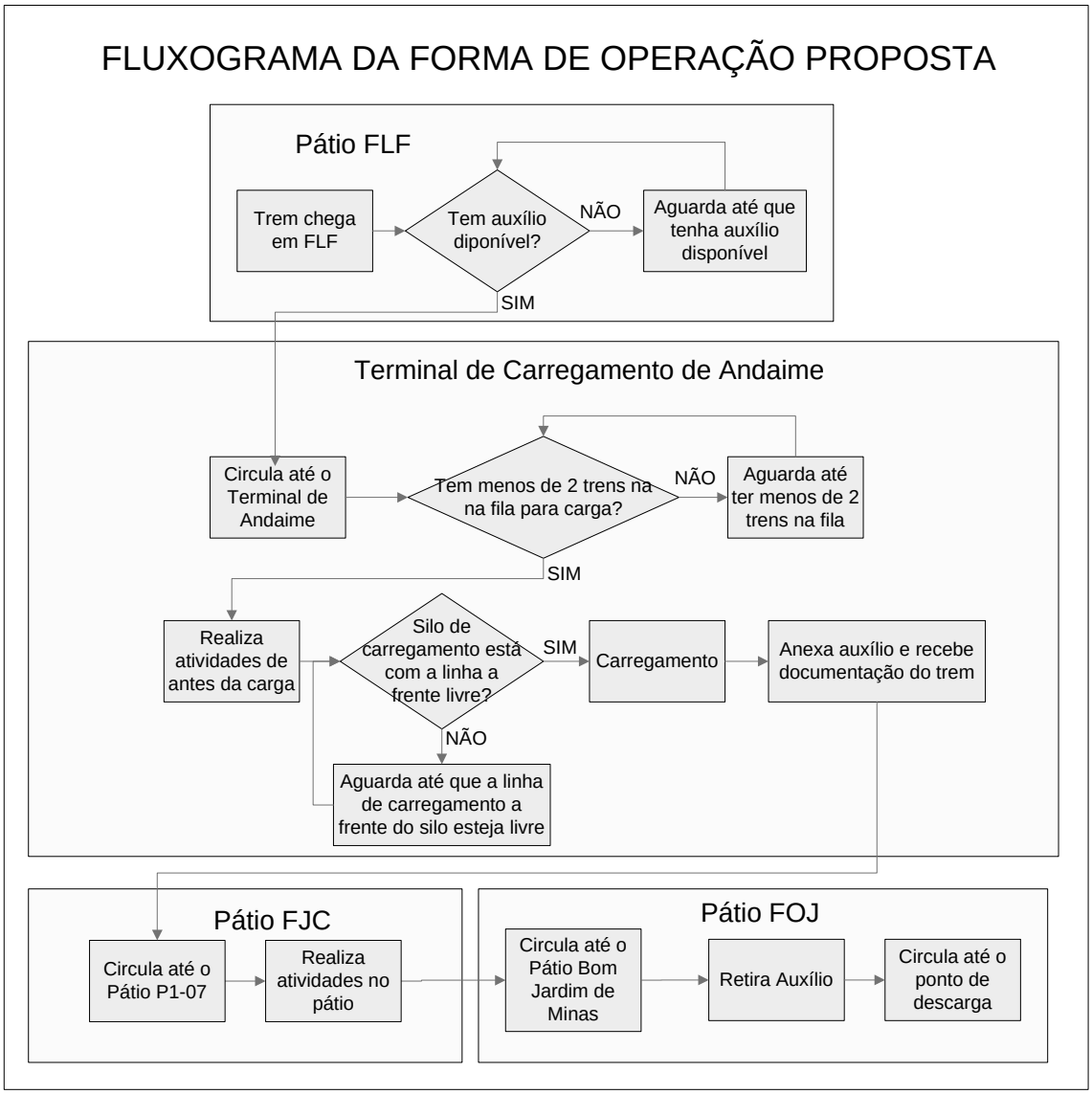


Figura 10: Fluxograma da Forma de Operação Modelo Proposto

Fonte: Autor (2007)

4.2. NÍVEL DE DETALHAMENTO

Para a elaboração de um modelo de simulação é necessário definir precisamente o que se quer analisar e qual o nível de detalhamento necessário para isso. No caso do modelo a ser estudado o objetivo principal é verificar se há uma melhoria no ciclo do trem devido à alteração da operação. Além disso, é possível analisar outros aspectos tais como a maneira como é feito o dimensionamento de auxílios e como o aumento da demanda afeta o ciclo do trem.

Em termos de simplificações frente ao sistema real alguns pontos devem ser ressaltados:

- A fim de avaliar o impacto da redução da necessidade de cruzamento devido à retirada do auxílio entre Andaime e Lagoa dos Porcos será desenvolvida no modelo uma lógica que permita o cruzamento de trens pátio a pátio.
- Para que o modelo computacional do sistema real melhor represente a realidade, as operações de auxílio fora do padrão no Andaime serão representadas.
- A interferência dos trens que carregam em outros pontos da malha também será considerada no modelo computacional.
- Para reduzir a complexidade do modelo será considerado que todas as locomotivas envolvidas com o transporte dos trens que carregam no Andaime possuem o sistema locotrol em funcionamento.
- Não é feito o dimensionamento automático de locomotivas de auxílio, sendo esta informação um dado de entrada para o modelo.
- No sistema real geralmente os trens vazios têm preferência de circulação sobre os trens carregados, assim como trens de carga têm preferência frente a escoteiras. Para simplificar o modelo, não será considerado nenhum tipo de preferência de circulação no modelo.
- Não foi incorporados no modelo situações de contingência como acidentes no trecho e parada para manutenção de qualquer tipo.
- Não é permitida a ultrapassagem de trens.
- Não há limitação quanto ao número de trens no terminal de Andaime.
- A capacidade de trens em FJC será de quatro trens por vez, porém haverá a reserva de no mínimo uma linha para os trens que carregam na Frente Norte da Ferrovia de Aço para evitar travamento no modelo.

Serão considerados como entradas do modelo as seguintes informações:

Tabela 6: Inputs para o modelo

INPUTS DO MODELO	TIPO
Freqüência de chegada de trens para o Andaime em FLF	Variável
Freqüência de chegada de trens para o Pires em FLF	Variável
Freqüência de chegada de trens com outras origens em FJC	Variável
Tempo de Antes de Carga no Andaime	Fixo
Tempo de Carga no Andaime	Variável
Tempo de permanência do Terminal do Pires	Fixo
Tempo das atividades realizadas no FJC	Fixo
Tempo de circulação entres os pátios do trecho em estudo	Fixo
Quantidade de Locos para auxílio em cada ponto	Fixo

Fonte: Autor (2007)

Como saídas do modelo serão coletados os seguintes dados:

Tabela 7: Saídas do Modelo

OUTPUTS DO MODELO
Tempo de Ciclo entre FLF e FOO
Tempo de Ciclo entre FOO e FJC
Tempo de Ciclo entre FJC e FOJ
Tempo de Ciclo entre FOJ e FJC
Tempo de Ciclo entre FLF e FOJ
Tempo de permanência no Andaime
Tempo de permanência em FJC
Tempo aguardando auxílio em FLF, FOO e FJC
Quantidade de locomotivas de auxílio em uso

Fonte: Autor (2007)

Os outputs serão usados tanto para a análise final quanto para validar o modelo, comparando dados obtidos pelo modelo com dados reais para verificar se são compatíveis com a realidade.

As saídas que serão usadas como principais indicadores do modelo serão o tempo de ciclo entre FLF e FOJ, o tempo de permanência no Andaime e em FJC e o tempo aguardando auxílio em FLF, FOO e FJC.

4.3. LÓGICA DE CIRCULAÇÃO DE TRENS

Para que o modelo pudesse ser implementado foi necessário desenvolver um algoritmo de circulação a fim de evitar um possível travamento, impedindo que um trem possa seguir viagem. O algoritmo foi criado com base nas regras usadas pelo centro de controle operacional para auxiliar na decisão de autorizar ou não a circulação de um trem, tendo sido melhorado com base em testes no modelo para verificar sua eficiência em evitar travamentos. As regras básicas usadas pelo centro de controle são:

- Em cada linha não sinalizada (linhas do pátio ou seguimento do trecho) só pode haver um único trem, parado ou em movimento;
- Um trem só pára em um ponto da circulação (linhas de pátio ou trechos) por problemas de trânsito (trem parado no seguimento ou pátio seguinte, ou de acordo com a regra de circulação desenvolvida);
- Para trechos com linha dupla ou tripla, como no caso dos pátios de cruzamento, pode haver dois trens trafegando simultaneamente, desde que em sentidos opostos.

Os passos apresentados devem ser seguidos até que o trem atinja o pátio de seu destino final. Os passos a serem seguidos na simulação são:

- Caso 1: Trem encontra-se em um pátio com destino a um trecho de linha dupla:

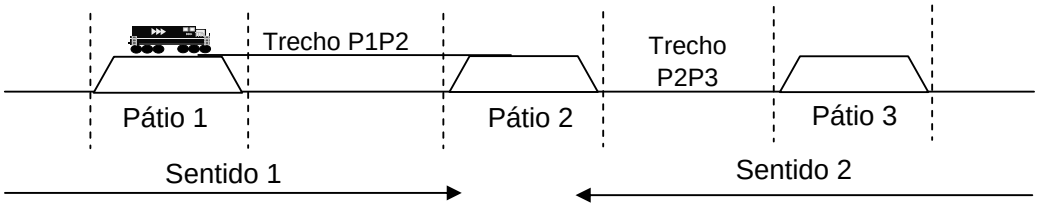


Figura 11: Circulação de trem para linha dupla

Fonte: Autor (2007)

<u>Passo 1: Antes de sair do Pátio 1 o trem deve verificar:</u>

a. Se existe algum trem ocupando a linha destinada ao seu sentido de circulação no trecho à frente. Caso tenha o trem deve esperar que trecho de destino esteja liberado;

b. Caso a linha de circulação destinada ao sentido de circulação do trem esteja desocupada o trem pode sair do pátio.

Passo 2: Para sair do Pátio 1 o trem:

a. Verificadas as condição do Passo 1, reserva o trecho P1P2 destinado as seu sentido de circulação;
b. Ocupa o trecho de destino
c. Determina o tempo de deslocamento entre os pátios;
d. Libera o pátio onde estava para ser ocupado por outro trem.

- Caso 2: Trem encontra-se em um pátio com destino a um trecho de linha singela:

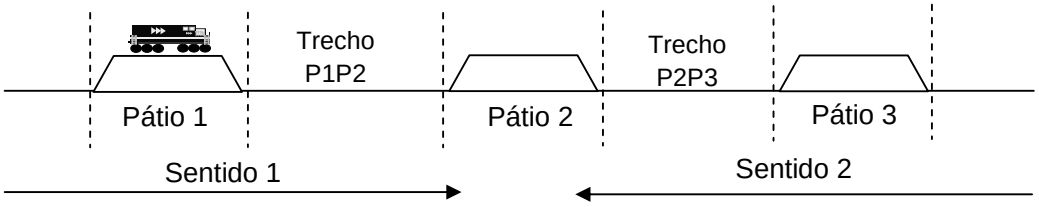


Figura 12: Circulação para trecho de linha singela

Fonte: Autor (2007)

Passo 1: Antes de sair do Pátio 1 o trem deve verificar:

a. Se não existe nenhum trem no seu sentido de movimento (Sentido 1) no Trecho P1P2 e no Pátio 2 e se a quantidade de trens no sentido de movimento oposto (Sentido 2) nos Trechos P1P3 e P2P3 e nos Pátios 2 e 3 somadas é menor que 2.
b. Se a quantidade de trens no seu sentido de movimento nos Trecho P1P2 e P2P3 e nos Pátios 2 e 3 somadas é menor que 2.
c. Se o Trecho P1P2 esta liberado.
d. Caso todas as condições acima não sejam satisfeitas, o trem deve aguardar a movimentação e cruzamento de outros trens. É importante que todas as condições sejam atendidas para evitar que algum trem possa ficar bloqueando a linha após a movimentação, provocando travamento na circulação, como mostra a figura abaixo.

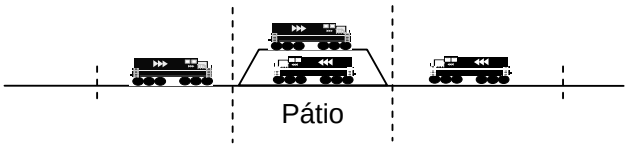


Figura 13: Situação de travamento da linha

Fonte: Autor (2007)

Passo 2: Para sair do pátio o trem:

a. Verificadas as condição do Passo 1, reserva o trecho P1P2 para o seu sentido de circulação;
b. Ocupa o trecho de destino
c. Determina o tempo de deslocamento entre os pátios;
d. Libera o pátio onde estava para ser ocupado por outro trem.

- Caso 3: Trem encontra-se em um trecho com destino a um pátio

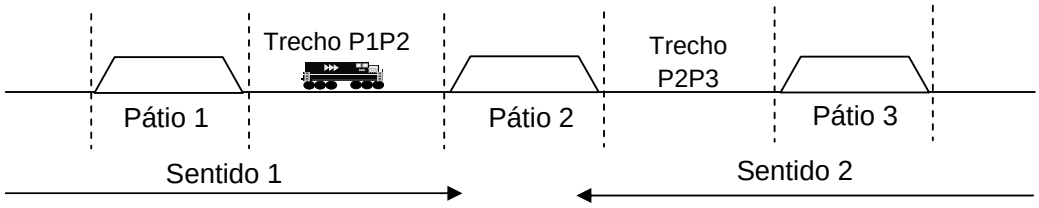


Figura 14: Circulação de trecho para pátio
Fonte: Autor (2007)

Passo 1: Antes de sair do Trecho P1P2 o trem deve verificar:

a. Se a linha do pátio dedicada ao seu sentido de circulação está disponível;
b. Caso não esteja, o trem deve aguardar a movimentação e cruzamento de outros trens.

Passo 2: Para sair do pátio o trem:

a. Verificadas as condição do Passo 1, reserva a linha do seu sentido de movimento do pátio seguinte;
b. Ocupa o pátio de destino;
a. Libera o trecho onde estava para ser ocupado por outro trem.

4.4. DADOS DE ENTRADA

Para coletar os dados de entrada para os modelos, a MRS Logística disponibilizou dados de circulação, carregamento e tempo das atividades nos pátios envolvidos no estudo do período de abril a maio de 2007.

Foram retirados da amostra, aqueles dados muito discrepantes e posteriormente foi feito o cálculo da média dos mesmos, para servir como dado de entrada para os modelos. Os valores obtidos são apresentados na tabela seguir. Para os tempos de circulação entre

pátios o primeiro valor se refere ao tempo de circulação no sentido apresentado e o segundo ao tempo no sentido oposto. O trecho entre FJC (P1-07) e P1-08 é duplicado.

Tabela 8: Dados de Entrada do Modelo

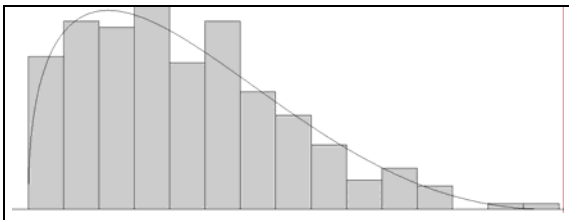
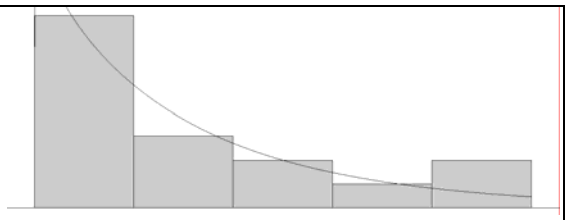
Inputs do modelo	**Tempo (h)**
Tempo de anexação e desanexação de auxílio	0.12
Tempo de antes de carga (AC) no Andaime	0.25
Tempo de permanência do Terminal do Pires	5.58
Tempo de permanência em FJC	1.5
Tempo de permanência em FJC para os trens do Andaime no cenário proposto	0.42
Tempo de circulação entre FJC e FLF	0.08 / 0.13
Tempo de circulação entre FOO e FBG	0.58 / 0.43
Tempo de circulação entre FBG e FLO	0.50 / 0.37
Tempo de circulação entre FLO e FPY	0.12 / 0.10
Tempo de circulação entre FPY e P1-06	0.55 / 0.42
Tempo de circulação entre P1-06 e FLF	0.32 / 0.28
Tempo de circulação entre FLF e FJC	0.13 / 0.08
Tempo de circulação entre FJC e P1-08	0.62 / 0.30
Tempo de circulação entre P1-08 e P1-09	0.28 / 0.27
Tempo de circulação entre P1-09 e P1-10	0.32 / 0.25
Tempo de circulação entre P1-10 e P1-11	0.43 / 0.22
Tempo de circulação entre P1-11 e P1-12	0.33 / 0.23
Tempo de circulação entre P1-12 e P1-13	0.33 / 0.22
Tempo de circulação entre P1-13 e P1-14	0.45 / 0.25
Tempo de circulação entre P1-14 e P1-15	0.32 / 0.23
Tempo de circulação entre P1-15 e P2-01	0.32 / 0.23
Tempo de circulação entre P2-01 e P2-02	0.32 / 0.25
Tempo de circulação entre P2-02 e P2-03	0.30 / 0.38
Tempo de circulação entre P2-03 e P2-04	0.42 / 0.32
Tempo de circulação entre P2-04 e P2-05	0.35 / 0.15
Tempo de circulação entre P2-05 e FOJ	0.40 / 0.30

Fonte: Autor (2007)

A quantidade de locomotivas de auxílio utilizada para o modelo atual será 28, com base no dimensionamento para o mês de maio de 2007. Para o modelo proposto serão analisados cenários com o número de locomotivas de auxílio variando de 30 a 40 a fim de definir o número mais adequado para um bom desempenho do sistema.

Para os dados de entrada cuja variabilidade foi considerada necessária na análise do sistema de maneira fiel, foi realizada uma análise dos dados disponibilizados. Após uma análise preliminar, os dados foram ajustados às curvas que melhor aderiram ao observado. Para isso foi utilizado o *Input Analyser*, módulo do *software* Arena. Este *software* permite importar dados externos e analisar os dados históricos estatisticamente, permitindo encontrar a curva que melhor se adapte aos dados, baseada em uma distribuição estatística empírica. Como forma de atestar a aderência da curva aos dados, o programa emite um relatório com o resultado de alguns testes estatísticos. A figura a seguir apresenta as curvas de aderência dos dados de entrada usados no modelo, juntamente com o seu respectivo erro quadrado (soma do quadrado da diferença das observações esperadas da distribuição ajustadas em relação à curva da distribuição).

Para melhor representar a realidade, os dados de chegada de trens no Andaime foram divididos em trens de minério exportação, trens de minério para consumo interno que passam pela ferrovia do aço e trens de minério que não passam pela ferrovia do aço. Pelo mesmo motivo a chegada de outros trens em FJC foi dividida em trens que necessitam de uma locomotiva de auxílio e trens que necessitam de duas locomotivas de auxílio. O tempo de carregamento também foi dividido para trens de minério exportação e outros trens para a etapa de carregamento no Andaime.

	
Intervalo entre chegadas de trem de minério para exportação no Andaime	Intervalo entre chegadas de trem de consumo interno para no Andaime que passam pela Ferrovia do Aço
Curva ajustada: -0.001 + 12 * BETA(1.41, 3.32)	Curva ajustada: 10 + WEIB(42.5, 0.94)
Erro quadrado: 0.001901	Erro quadrado: 0.010153

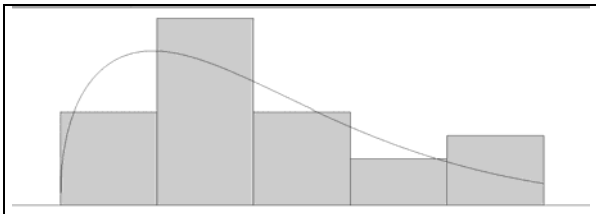
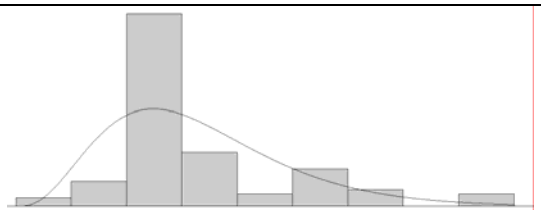
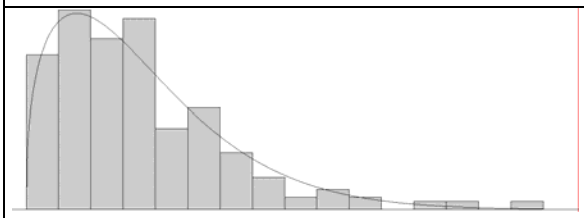
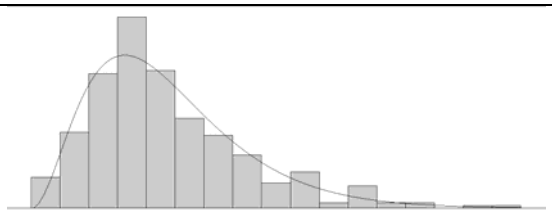
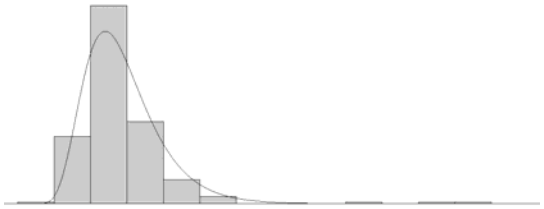
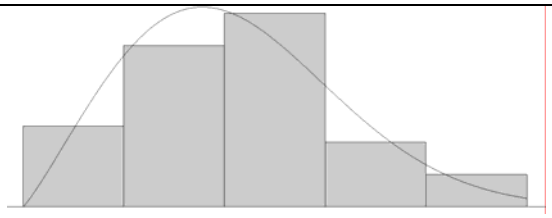
	
Intervalo entre chegadas de trem para o Andaime que não passam pela Ferrovia do Aço	Intervalo entre chegadas de trem para o Terminal do Pires
Curva ajustada: 3 + WEIB(38.3, 1.4)	Curva ajustada: 1 + ERLA(2.3, 4)
Erro quadrado: 0.020527	Erro quadrado: 0.105328
	
Intervalo entre chegadas de trem de uma locomotiva de auxílio em FJC	Intervalo entre chegadas de trem de duas locomotiva de auxílio em FJC
Curva ajustada: WEIB(3.71, 1.38)	Curva ajustada: GAMM(0.889, 3.15)
Erro quadrado: 0.003438	Erro quadrado: 0.003641
	
Tempo de Carregamento do trem de minério exportação no Andaime	Tempo de Carregamento dos outros trens no Andaime
Curva ajustada: 2 + LOGN(1.62, 0.584)	Curva ajustada: 1.1 + WEIB(1.32, 2.14)
Erro quadrado: 0.011454	Erro quadrado: 0.006521

Figura 15: Ajuste das curvas estatísticas

Fonte: Autor (2007)

A demanda utilizada para a análise do modelo foi baseada nos dados de transporte diário dos meses de abril e maio de 2007. A demanda em quantidade de trens dia para cada ponto de interesse é apresentada na tabela abaixo:

Tabela 9: Demanda diária de trens

	Qtd de trens por dia
Trens 2 Auxílios em FJC	8,54
Trens 1 Auxílio em FJC	7,12
Trens de FOO para Ferrovia do Aço	7,2
Trens de FOO para Outros Locais	0,64
Trens de FPY	2,35

Fonte: Autor (2007)

4.5. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Para atingir o volume de transporte de 300 milhões de toneladas em 2012 a MRS precisará melhorar muito a sua capacidade de transporte, por isso a redução no ciclo dos trens é de grande importância para os objetivos da empresa. A alteração na operação dos auxílios do Andaime, e possivelmente em outros trechos depois desse, podem ter um papel fundamental para que a meta de transporte seja atingida.

Através da simulação foi possível analisar os impactos reais da alteração da operação dos auxílios. Os resultados apresentados no quadro abaixo foram obtidos a partir de uma rodada de simulação de 2000 dias com cinco replicações cada, tanto para o modelo atual quanto para o modelo proposto. Para a primeira análise foi considerada a mesma freqüência de chegada e tempos de carregamento para os dois modelos, diferindo apenas nos tempos e pontos relativos à anexação e retirada de auxílio, de acordo com o cenário atual ou proposto.

Tabela 10: Resultados do Modelo

Indicador	Unidade	Cenário Atual	Cenário Proposto					
			30 locos	32 locos	34 locos	36 locos	38 locos	40 locos
Qtd Locos Dimensionadas FJC	locos	28	30	32	34	36	38	40
Qtd Locos Dimensionadas FLF/FLO	locos	3	-	-	-	-	-	-
Qtd Locos em Utilizacao FJC/FLF	locos	20,4	26,65	26,69	26,78	26,73	26,88	26,75
Qtd Locos em Utilizacao FOO - FLO	locos	1,37	-	-	-	-	-	-
Tempo de ciclo do trem FLF-FOO-FOJ	**h**	**17,44**	**16,01**	**15,53**	**15,37**	**15,32**	**15,35**	**15,3**
Ciclo Total Auxílio FLF	h	-	21,69	21,22	**21,05**	21,01	21,05	21
% Trens que Aguardam Auxilio no FJC	**%**	**7,41**	**40,76**	**21,54**	**11,71**	**5,87**	**2,6**	**1,39**
Tempo Trens Aguardando Auxilio no FJC	h	0,05	0,66	0,28	0,13	0,06	0,02	0,01
% Trens Aguardando Auxilio FLF / FOO	**%**	**37,72**	**47,07**	**25,53**	**13,87**	**7,39**	**3,36**	**1,39**
Tempo Aguardando Auxilio FLF / FOO	h	0,18	0,88	0,37	0,16	0,08	0,03	0,01
% Trens Fora de Padrão FOO	%	13,72	-	-	-	-	-	-
Tempo espera para carregar	h	1,07	0,52	0,56	0,61	0,66	0,72	0,7
Tempo em FOO	h	5,05	4,56	4,6	4,65	4,7	4,76	4,74
Qtd Locos Ociosas em FJC	locos	6,76	3,05	4,61	7,89	8,34	9,82	13,75
Tempo Loco Ociosa em FJC	h	3,68	1,39	2,42	3,41	4,5	5,48	6,63
Tempo de Trem em FJC	**h**	**2,09**	**2,2**	**1,89**	**1,77**	**1,71**	**1,69**	**1,68**
Tempo trem do Andaime em FJC	**h**	**2,09**	**0,71**	**0,69**	**0,69**	**0,68**	**0,69**	**0,68**

Fonte: Autor (2007)

Como pode ser percebido pelos dados acima, o modelo mostrou que a alteração na operação proposta gera resultados positivos. Quanto ao tempo de ciclo, foi computado um ganho médio de aproximadamente de 2,12 horas no trecho entre FLF e FOJ para os trens que carregam no Andaime, se considerarmos 36 locos para auxílio. Através da análise dos dados percebe-se que o ganho de ciclo ocorreu principalmente devido à redução do tempo desses trens no terminal de carregamento e no FJC. Quanto maior a quantidade de locomotivas disponibilizadas para auxílio, menos trens precisam aguardar o auxílio e menor é o tempo médio de espera pelos mesmos. Conseqüentemente, o número de auxílios influencia diretamente nos ganhos do novo modelo.

Porém, quando se compara os tempos de ciclo para 34, 36, 38 ou 40 locos é notável que o mesmo se estabiliza em aproximadamente 13,35 horas. Isso ocorre porque chega a um limite quando um percentual muito baixo do volume de trens precisa esperar auxílio, e quando precisam, o fazem por pouco tempo. Dessa forma, o ganho de ciclo com as locomotivas adicionais passa a ser muito pequeno, não justificando acréscimo no investimento, apesar do percentual de trens que aguardam auxílio continuar reduzindo. Com

base nas observações apresentadas se sugere que o número de locomotivas alocadas para auxílio seja de 36.

Para ter a real dimensão do ganho, foi calculado o quanto os trens que carregam no Andaime poderiam produzir a mais mensalmente. Para isso foi considerado que, das 38 tabelas de minério exportação (trens circulando na malha fazendo transporte de minério para exportação), metade estaria dedicada para carregar no Andaime. Com isso, foi possível calcular o ganho de produção médio para os estes trens. Os resultados são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 11: Ganho de Produção

	ATUAL	PROPOSTO
Ciclo Médio Praticado (dias)	2,50	2,41
Ciclos por Tabela por Mês	12	12,44
Volume Transportado por Tabela por Mês	155.232	160.918
Produção Total Por Mês (19 tabelas)	2.949.408	3.057.437
Ganho Percentual		**3,53%**

Fonte: Autor

Um ganho de 3,53% pode parecer pequeno, porém, quando se trata de uma empresa que lida com faturamento na casa dos bilhões, faz uma grande diferença nos resultados apresentados. Além de disso, o melhor desempenho proporcionado pela nova forma de operar melhora indiretamente o ciclo de outros trens que passam por FJC, através da redução de congestionamento no pátio FJC e até mesmo do melhor dimensionamento de auxílio para estes trens.

É importante ressaltar que a quantidade de 36 locomotivas para auxílio é indicado para o cenário de demanda estudado. No caso de aumento na demanda de trens para o Andaime ou para outros trens que também utilizam auxílio na Ferrovia do Aço é necessário que se faça um novo dimensionamento para adequar a disponibilidade do auxílio nos pontos onde são necessários.

4.6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Para verificar como a variação da demanda influencia no dimensionamento de locomotivas para auxílio no cenário proposto, foram feitas algumas análise com demandas maiores do que as atuais.

No cenário estudado observava-se uma média de 7,2 trens por dia para carregar no Andaime. Outros dois cenários de demanda foram analisados, com 8,5 e 9,9 trens por dia no terminal em estudos. Os resultados obtidos são apresentados na tabela a seguir.

Indicador	Unidade	7.2 Trens FOO F. do Aço	8.5 Trens FOO F. do Aço	9.9 Trens FOO F. do Aço
Qtd Locos Dimensionadas FJC	locos	36	36	36
Qtd Locos em Utilização FJC/FLF	locos	26,73	29,6	33,21
Tempo de ciclo FLF FOJ	**h**	15,32	**16,01**	**18,36**
Ciclo Total Auxílio FLF	h	21,01	21,74	24,11
% Trens Aguardando Auxilio FJC	**%**	5,87	**16,65**	**54,43**
Tempo Trens Aguardando Auxilio FJC	h	0,06	0,2	0,97
% Trens Aguardando Auxilio FLF	**%**	7,39	**19,24**	**60,05**
Tempo Trens Aguardando Auxilio FLF	h	0,08	0,26	1,23
Tempo espera para carregar	h	0,66	1,01	2,2
Tempo em FOO	**h**	4,7	**5,09**	**6,3**
Qtd de Trem em FJC	trem	1,8	1,99	2,68
Tempo de Trem em FJC	h	1,71	1,79	2,3
Tempo trem FOO em FJC	h	0,68	0,7	0,74

Tabela 12: Resultado da análise de sensibilidade da demanda

Fonte: Autor (2007)

A tabela acima mostra que, caso não seja feito um redimensionamento de acordo com a demanda, o tempo de ciclo aumenta. A maior causa desse aumento é a falta de auxílio. Sem a quantidade de auxílio adequada, a quantidade de trens que aguardam auxílio e o tempo de espera crescem exponencialmente, juntamente com o tempo de permanência no FJC.

É importante ressaltar que o acréscimo de tempo no terminal de carregamento se deve à maior freqüência de chegada de trens, Já que não é mais necessário aguardar auxílio para sair do pátio, a quantidade de auxílio não interfere na permanência dos trens no terminal. Como a capacidade de carregamento permanece constante, os trens passam a esperar mais tempo antes de começar a carga, aumentando assim o tempo total no terminal.

Para demonstrar quanto o dimensionamento afeta o desempenho do sistema foram simulados diversos cenários para a demanda de 9.9 trens por dia, com variadas quantidades de locomotivas, até que os tempos de espera e percentuais de trens aguardando auxílio chegassem ao mesmo nível obtido no cenário proposto com 36 locomotivas. Os resultados do cenário ideal para a maior demanda de trens são apresentados na tabela abaixo:

Tabela 13: Resultado de análise de dimensionamento de auxílio

Indicador	Unidade	7.2 Trens FOO F. do Aço	9.9 Trens FOO F. do Aço	
			36 Locos	45 Locos
Qtd Locos Dimensionadas FJC	locos	36	36	45
Qtd Locos em Utilização FJC/FLF	locos	26,73	33,21	33,47
Tempo de ciclo FLF FOJ	**h**	15,32	**18,36**	**17,59**
Ciclo Total Auxílio FLF	h	21,01	24,11	23,35
% Trens Aguardando Auxilio FJC	**%**	5,87	**54,43**	**5,08**
Tempo Trens Aguardando Auxilio FJC	h	0,06	0,97	0,06
% Trens Aguardando Auxilio FLF	**%**	7,39	**60,05**	**5,5**
Tempo Trens Aguardando Auxilio FLF	h	0,08	1,23	0,07
Tempo espera para carregar	h	0,66	2,2	2,64
Tempo em FOO	**h**	4,7	**6,3**	**6,75**
Qtd de Trem em FJC	trem	1,8	2,68	1,94
Tempo de Trem em FJC	h	1,71	2,3	1,67
Tempo trem FOO em FJC	h	0,68	0,74	0,72

Fonte: Autor (2007)

Como pode ser percebido, apesar da quantidade de trens que aguardam auxílio ser até menor do que no primeiro cenário analisado e o tempo de espera ser praticamente igual, o tempo de ciclo continua maior que o obtido inicialmente. Isso ocorre porque, devido à maior demanda de trens por dia, o fluxo de trens no trecho aumenta, aumentando assim a necessidade de cruzamento, o tempo de trânsito e o tempo de ciclo total.

Outro fator que contribui para um ciclo maior é o tempo no terminal de carregamento, que como já foi explicado acontece devido à maior freqüência de chegada no terminal e à limitação de capacidade no mesmo. É importante ainda citar que o aumento no tempo de terminal no cenário de 9,9 trens e 36 locomotivas de auxílio para o de 45 acontece pois, com a maior disponibilidade de auxílio, os trens passam a esperar menos tempo em FLF e, por conseguinte, aumentam a freqüência de chegada para carregamento no terminal.

É possível inferir, portanto, que a capacidade de produção do sistema FLF – Andaime – FOJ vai ser limitada pela capacidade de carregamento do terminal. Quanto maior é o tempo de permanência do trem no terminal mais próximo do limite de capacidade. Isso pôde ser provado por testes com o modelo. Quando uma freqüência maior de trens por dia, de 11,3, foi inserida no modelo, o mesmo travou, apresentando valores absurdos de tempo de ciclo e com tempo e tamanho de fila no terminal de Andaime crescente e proporcional ao tempo de simulação. Somando-se a isso uma utilização de 99,9% do terminal, ficou claro

que à medida que a demanda crescer, o primeiro ponto de gargalo a ser tratado deve ser o terminal de Andaime.

4.7. SUGESTÕES, PROPOSTAS E CONCLUSÕES

O desenvolvimento do modelo de simulação propiciou a análise da operação de auxílio atual e proposta, apresentando ganhos consideráveis e resultados coerentes, comprovando a viabilidade das alterações propostas. Portanto, o trabalho cumpriu a sua função, tanto a acadêmica, quanto a de contextualização prática do conteúdo estudado em sala de aula.

O trabalho, contendo uma etapa de pesquisas, a fim de permitir um melhor embasamento teórico do tema, cumpriu sua função acadêmica, permitindo uma auto-aprendizagem no que diz respeito ao desenvolvimento de técnicas de pesquisa e avaliação de diversas bibliografias. Quanto à fase de aplicação dos conhecimentos adquiridos e contextualização prática, o trabalho permitiu uma maior aproximação com a realidade das empresas, possibilitando a vivência no campo de atuação do engenheiro de produção.

Além dos objetivos acadêmicos, os resultados práticos também foram atingidos. Em uma análise crítica dos indicadores dos modelos foram percebidos resultados coerentes com a realidade. Resultados confiáveis dificilmente poderiam ser obtidos sem o uso de simulação devido à complexidade do sistema de transporte ferroviário. Dessa forma foi possível atestar o bom desempenho da nova forma de operação sem interferir no sistema real.

Quanto ao modelo de simulação, com base nos resultados apresentados, a implementação da forma de operação modelo proposta é altamente recomendada. O modelo comprovou que existe um ganho de produção de 3,53 % caso a operação de auxílios seja alterada. Com tamanho ganho de produtividade, os investimentos necessários para colocar em prática o novo modelo serão rapidamente recuperados e convertidos em um maior faturamento para a empresa.

Porém deixa-se claro que, para um bom desempenho do sistema, é necessário o redimensionamento constante do número de locomotivas disponibilizadas para auxílio. Para isso sugere-se que seja feito um cálculo das horas de locomotivas de auxílio necessárias para atender a todos os trens planejados para passar pelo trecho no mês.

Os valores de ciclo do auxílio apresentados na tabela 9 (resultados do modelo) devem ser multiplicados pela quantidade de trens diária no fluxo. Aconselha-se a utilização de um coeficiente de disponibilidade das locomotivas para evitar subdimensionamento, que pode variar de acordo com a confiabilidade das locomotivas para auxílio. Após o cálculo do número de horas de auxílio necessárias, divide-se o valor encontrado pelo número de horas

de operação diária, no caso 24 horas. O valor obtido será um número próximo da quantidade de locomotivas ideal para a demanda apresentada.

Para variações muito grandes, porém, podem ser necessárias outras análises de simulação uma vez que a eficiência da circulação e dos terminais pode diminuir, dado o maior volume, aumentando assim o ciclo base do auxílio.

Como o estudo apresentou ganhos consideráveis, comprovando a viabilidade do uso de um único auxílio ao invés de vários, propõe-se a realização de estudo semelhante para outros trechos da malha ferroviária, como, por exemplo, o ramal do Paraopeba, onde se localizam outros cinco pontos de carregamento e dois trechos de auxílio. Para esta região o potencial de ganho é ainda maior por existir mais atrasos devido à necessidade de aguardar auxílio e congestionamentos causados por essas e outras causas.

Por fim, conclui-se que o desenvolvimento do trabalho, além de proporcionar o aprofundamento teórico no tema objeto do trabalho e permitir a sua aplicação no ambiente empresarial, apresentou resultados favoráveis à implantação real do projeto e criando condições para que tenha seus resultados comprovados na prática.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANKS, J., CARSON II, J. S., 1984, *Discrete-Event System Simulation*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.

CHWIF, L., MEDINA, A. C., 2006, *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações*, São Paulo, Editora Bravarte.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura em Transporte, Disponível em <http://www.dnit.gov.br> , Acesso em: 28 de maio de 2007.

FREITAS FILHO, P. J., 2001, *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena*, 1 ed, São Paulo, Visual Books.

GAVIRA, M. O., 2003, *Simulação Computacional como uma ferramenta de Aquisição de Conhecimento*, Tese de M.Sc, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

KELTON, W. D., SADOWSKI, R. P., SADOWSKI, D. A., 2004, *Simulation with ARENA. 3 Ed*, New York, McGraw-Hill Companies Inc.

MRS Logística, Disponível em <http://www.mrs.com.br>, Acesso em: 5 de junho de 2007.

PARAGON, Disponível em < http://www.paragon.com.br> , Acesso em 28 de maio de 2007.

PRADO, D., 2004, *Usando o ARENA em simulação*, Belo Horizonte, MG, INDG.

SCHRIBER, T. J., 1974, *Simulation Using GPSS*, New York, Wiley.