



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**AVALIAÇÃO DOS REFLEXOS DA OPERAÇÃO DO  
VIRADOR DE VAGÕES EM PRODUÇÃO E NA FILA DE  
TRENS PARA DESCARGA DE PRODUTOS**

**WILLAM FARIA GUACHALLA**

Belo Horizonte, 13/04/2012.

Willam Faria Guachalla

**AVALIAÇÃO DOS REFLEXOS DA OPERAÇÃO DO  
VIRADOR DE VAGÕES EM PRODUÇÃO E NA FILA DE  
TRENS PARA DESCARGA DE PRODUTOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Transportes

Orientadora: Profa. Dra. Leise Kelli de Oliveira

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2012

G896a Guachalla, Willam Faria  
Avaliação dos reflexos da operação do virador de vagões em produção e na fila de  
trens para descarga de produtos [manuscrito] / Willam Faria Guachalla. — 2012.  
101 f. , enc. : il.

Orientadora: Leise Kelli de Oliveira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de  
Engenharia.

Anexos: f. 96-101.  
Bibliografia: f. 90-95.

1. Engenharia de transportes – Teses. 2. Transporte ferroviário de cargas – Teses.  
I. Oliveira, Leise Kelli de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de  
Engenharia. III. Título.

CDU: 656.2 (043)



FOLHA DE APROVAÇÃO

"Avaliação dos reflexos da operação do virador de vagões em produção e na fila de trens para descarga de produto"

*Willam Faria Guachalla*

Dissertação defendida e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Senhores:


  
Profa. Dra. Leise Kelli de Oliveira

  
Prof. Dr. Martín Gómez Ravetti

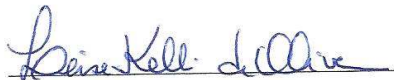
  
Prof. Dr. Ricardo Saraiva de Camargo

  
Prof. Dr. Nilson Tadeu Ramos Nunes

Aprovada pelo Colegiado do Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

  
Prof. Gustavo Ferreira Simões  
Coordenador

Versão Final aprovada por



Profa. Leise Kelli de Oliveira  
Orientadora

Belo Horizonte, 13 de abril de 2012.

Dedico este trabalho aos meus pais, Willam e Gessi,  
às minhas irmãs, Simonny e Samira,  
aos meus amigos  
e, em especial, a minha esposa, Lara.  
Sem vocês nada disso seria possível.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que participaram deste trabalho em todos os momentos de sua elaboração.

De forma especial, agradeço:

À Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade da realização do curso de Mestrado.

A todos os profissionais de Mineração e Logística que, de forma direta ou indireta, contribuíram com discussões e suporte técnico de alta qualidade na elaboração deste trabalho.

À Paragon do Brasil, no auxílio do desenvolvimento do modelo de simulação.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE GRÁFICOS .....	vii
LISTA DE TABELAS E QUADROS .....	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....	ix
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
RESUMO .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1 INTRODUÇÃO .....	14
1.1 Objetivo .....	16
1.2 Objetivo específico .....	16
1.3 Delineamento do trabalho .....	16
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	18
2.1 Justificativa para pesquisa .....	18
2.2 Trens de Ciclo .....	22
2.3 O que é simulação? .....	23
2.3.1 Aplicação da simulação .....	26
2.3.2 Vantagens e desvantagens da simulação .....	27
2.3.3 Etapas da simulação .....	29
2.3.4 Pesquisas com o uso de simulação .....	31
2.3.4.1 Pesquisas realizadas no Brasil .....	32
2.3.4.2 Pesquisas realizadas no exterior .....	36
3 METODOLOGIA .....	39
3.1 Coleta de dados .....	39

3.1.1 Coleta de dados da descarga – SGOP .....	39
3.1.1.1 O trem .....	40
3.1.1.2 O virador de vagões (VV) .....	41
3.1.1.3 Braço posicionador (BP) .....	42
3.1.1.4 Alimentadores (AS) .....	42
3.1.1.5 Correias transportadoras (TE/TD/TR) .....	43
3.1.1.6 <i>Stacker Reclaimer</i> (ER) .....	44
3.1.1.7 Carregador de navios (CN) .....	44
3.1.2 Coleta de dados de ciclo de trens – MRS .....	49
3.2 Tratamento de dados .....	52
3.3 Parâmetros de distribuição .....	57
3.4 Testes de aderência .....	58
4 O MODELO DE SIMULAÇÃO .....	60
4.1 Modelagem conceitual .....	60
4.2 Modelagem computacional .....	62
4.3 Criar entidades – Trens de ciclo .....	63
4.4 Terminais de carga .....	64
4.5 Entrada dos trens no porto .....	64
4.6 A descarga .....	65
4.7 O módulo de falhas .....	66
4.8 Saída do porto e retorno dos trens para terminais de carga .....	67
4.9 Fila total.....	67
5 RESULTADOS .....	68
5.1 Validação do modelo .....	68
5.1.1 Quantidade de minério descarregada .....	69



5.1.2 Fila de trens para descarga .....	70
5.2 Cenários .....	71
5.2.1 Cenário 1 .....	75
5.2.2 Cenário 2 .....	77
5.2.3 Cenário 3 .....	79
5.2.4 Cenário 4 .....	81
5.3 Impacto tarifário .....	83
5.3.1 Custos fixos .....	83
5.3.2 Custos variáveis .....	83
5.3.3 Custos de remuneração de capital .....	84
5.3.4 Obtenção dos custos unitários .....	84
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	87
REFERÊNCIAS.....	90
ANEXO A .....	96
ANEXO B .....	97
ANEXO C .....	100

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 Representação de trens em ciclo .....	23
FIGURA 2.2 Diagrama das etapas de simulação .....	30
FIGURA 3.1 Representação esquemática de estrutura portuária .....	40
FIGURA 3.2 Formação do trem .....	41
FIGURA 3.3 Detalhe do Giro do virador de vagões .....	41
FIGURA 3.4 Detalhe do Braço posicionador .....	42
FIGURA 3.5 Representação esquemática do Silo e Alimentadores .....	43
FIGURA 3.6 Correias transportadoras .....	43
FIGURA 3.7 <i>Stacker Reclaimer</i> .....	44
FIGURA 3.8 Correias transportadoras .....	45
FIGURA 3.9 Sistema de Gestão de Operações Portuárias .....	45
FIGURA 3.10 Consulta SGOP .....	46
FIGURA 3.11 Abrangência da operação .....	49
FIGURA 3.12 Ilustração das etapas de ciclo .....	51
FIGURA 3.13 Esquema do fluxo de transporte de uma cadeia integrada .....	52
FIGURA 3.14 Histograma de falhas do virador – 2011 .....	53
FIGURA 3.15 Funcionalidade <i>Fit All</i> do <i>Input Analyzer</i> .....	53
FIGURA 3.16 Falhas elétricas diretas .....	55
FIGURA 3.17 Falhas mecânicas diretas .....	56
FIGURA 3.18 Falhas elétricas indiretas .....	56
FIGURA 3.19 Falhas mecânicas indiretas .....	56
FIGURA 4.1 Fluxograma de atividades do trem no modelo .....	61
FIGURA 4.2 Lógica de geração de trens .....	63
FIGURA 4.3 Lógica de carregamento do trem .....	64
FIGURA 4.4 Lógica de entrada no porto .....	65
FIGURA 4.5 Lógica do modelo para as atividades no virador .....	65
FIGURA 4.6 Lógica do módulo de falhas .....	66
FIGURA 4.7 Detalhe do módulo de falhas .....	66
FIGURA 4.8 Lógica de saída do trem após descarga .....	67
FIGURA 5.1 Configurações dos parâmetros para a simulação do modelo .....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 2.1 Densidade do transporte ferroviário .....	19
GRÁFICO 2.2 Matriz de transportes no mundo .....	20
GRÁFICO 2.3 Produção ferroviária – Brasil .....	20
GRÁFICO 2.4 Preço internacional do minério de ferro .....	21
GRÁFICO 2.5 Investimentos em ferrovias no Brasil .....	21
GRÁFICO 3.1 Estratificação das atribuições das falhas .....	55
GRÁFICO 5.1 Validação da tonelage m descarregada .....	70
GRÁFICO 5.2 Validação fila para descarga .....	71
GRÁFICO 5.3 Variação da tonelage m descarregada – Cenário 1 .....	76
GRÁFICO 5.4 Variação do ciclo e etapas – Cenário 1 .....	76
GRÁFICO 5.5 Variação da tonelage m descarregada – Cenário 2 .....	78
GRÁFICO 5.6 Variação do ciclo e etapas – Cenário 2 .....	78
GRÁFICO 5.7 Variação da tonelage m descarregada – Cenário 3 .....	80
GRÁFICO 5.8 Variação do ciclo e etapas – Cenário 3 .....	80
GRÁFICO 5.9 Variação da tonelage m descarregada – Cenário 4 .....	82
GRÁFICO 5.10 Variação do ciclo e etapas – Cenário 4 .....	82
GRÁFICO 5.11 Impacto da redução do ciclo em tarifa .....	86

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

TABELA 2.1 Concessionárias ferroviárias – Brasil.....	19
TABELA 3.1 Modelo consulta SISLOG .....	51
TABELA 3.2 Análise estatística das falhas .....	54
TABELA 5.1 MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário base .....	73
TABELA 5.2 MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 1 .....	75
TABELA 5.3 MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 2 .....	77
TABELA 5.4 MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 3 .....	79
TABELA 5.5 MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 4 .....	81
TABELA 5.6 Resumo das reduções de ciclo .....	85
QUADRO 3.1 Código das paradas – Falhas elétricas .....	47
QUADRO 3.2 Código das paradas – Falhas mecânicas .....	48
QUADRO 3.3 Descrição das etapas de ciclo .....	50
QUADRO 3.4 Resultados estatísticos das falhas do virador .....	57
QUADRO 3.5 Teste de aderência .....	58
QUADRO 5.1 Grupo de custos e variáveis explicativas .....	85

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

USGS	<i>Geological Survey National Minerals Information Center</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
<i>IMF</i>	<i>International Monetary Fund</i>
RFFSA	Rede Ferroviária Federal S.A
PND	Programa Nacional de Desestatização
FERROBAN	Ferrovias Bandeirantes S.A.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento
SGOP	Sistema de Gestão de Operações Portuárias
GDT	Vagão tipo gôndola
GPS	<i>Global Positioning System</i>
MTBF	<i>Mean time between failure</i>
MTTR	<i>Mean time to repair</i>
OEE	<i>Overhaul Equipment Effectiveness</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i>
TPS	<i>Toyota Production System</i>
ED	Eventos discretos (Classificação de simulação)
EC	Eventos contínuos
MC	Monte Carlo
THP	Trem Hora Parado
VV	Virador de vagões
BP	Braço posicionador
AS	Alimentadores
TE	Transportador de correia ( <i>stacker</i> )
TD	Transportador de correia ( <i>car dumper</i> )
TR	Transportador de correia ( <i>reclaimer</i> )
ER	Equipamentos de empilhamento/recuperação

CN	Carregador de navios
TTV	Tempo de trânsito vazio
VVC	Fila de trens vazios no trecho
ACC	Fila de trens vazios nos terminais de carga
ACM	Tempo de manobra nos terminais de carga
CAR	Tempo de carga
DCM	Tempo depois da carga
TTC	Tempo de trânsito carregado
VCC	Fila de trens carregados no trecho
ADC	Fila de trens carregados no porto
ADM	Tempo de manobra no porto
DES	Tempo de descarga
DDM	Tempo depois da descarga
MO	Manutenção de oportunidade
MP	Manutenção preventiva
MC	Manutenção corretiva
IM	Implantação melhorias
km	Quilômetro
TKU	Toneladas transportadas por quilômetro útil
TKB	Toneladas brutas transportadas por quilômetro
TU	Tonelada útil
TB	Tonelada bruta
TK Tara	Toneladas de tara transportadas por quilômetro
MU	Movimento uniforme
V	Velocidade média do fluxo
S	Distância
T	Ciclo do fluxo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta T$	Intervalo de tempo
$\alpha$	Nível de significância
=	Igual
>	Maior
$\Sigma$	Somatório
x	Multiplicação
/	Divisão
+	Adição
$\geq$	Maior ou igual

## RESUMO

O uso de simulação em estudos de aumento de capacidade tem sido mais intenso na última década. Em tese, esta ferramenta atua como plataforma para o desenvolvimento de análises de viabilidade que precedem os investimentos a serem realizados. Esta dissertação apresenta a construção de um modelo genérico para aplicação à cadeias integradas de mineração baseadas em trens de ciclo, com aplicação em um estudo de caso de uma grande mineradora Brasileira. O objetivo é avaliar os reflexos operacionais quando simuladas melhorias de desempenho no virador de vagões – principal gargalo de uma cadeia integrada mina-ferrovia-porto. O modelo utiliza o *software* Arena versão 13.0 como plataforma de simulação e quantifica as variações de tonelagem descarregada e fila de trens para descarga, a partir da redução das falhas do gargalo, mapeadas durante o ano de 2011. A utilidade da pesquisa proposta é confirmada quando constatada uma lacuna de estudos com foco em problemas relacionados à descarga do transporte ferroviário, cujo real entendimento dos impactos gerados pode apoiar empresas na tomada de decisão. Os resultados obtidos comprovam a eficiência do modelo proposto, uma vez que foi possível mensurar os reflexos de cada tipo de paralisação do sistema em produção e fila de trens para descarga. Com base nos cenários propostos foi possível identificar o plano de melhoria que proporciona melhores benefícios para o desempenho da mineradora no ano em estudo.

***Palavras-chave:*** Simulação, Transporte Ferroviário, Descarga, Filas, Minério de Ferro.



## ABSTRACT

The use of simulation on increase capacity studies has been more intense over the past decade. In theory, this tool serves as a platform for the development of feasibility analyzes that precede the investments to be made. This dissertation presents the construction of a generic model for application in integrated chains based mining cycle trains, with application in a case study of a large Brazilian miner. The objective is to evaluate the consequences when simulated operational performance improvements in a car dumper - that is the main bottleneck of a chain integrated mine-railroad-port. The model uses Arena software version 13.0 as a platform for simulation and quantifies the variations of tonnage unloaded and queue of trains to discharge from the reduction of failures of the bottleneck, mapped during the year of 2011. The usefulness of the proposed research is confirmed when it is observed a lack of research focusing on issues related to the discharge of the railway, which knowledge can assist companies in their decision making. The results prove the efficiency of the proposed model, since it was possible to measure the consequences of each type of system downtime - in production and queue for unloading trains. Based on the proposed scenarios it was possible to identify the improvement plan that provides benefits for the best performance of the mining company during the year studied.

**Keyword:** *Simulation, Railway Transportation, Car Dumper, Queue, Iron Ore.*

# 1 INTRODUÇÃO

As principais matérias-primas utilizadas na indústria siderúrgica são o minério de ferro e seus subprodutos. A produção mundial, em quase sua totalidade, é consumida na produção de aço. Dessa forma, seu preço está diretamente relacionado ao setor siderúrgico e é fortemente influenciado pelo crescimento econômico mundial.

Com o objetivo de atender essa demanda, as mineradoras brasileiras necessitam de uma logística eficiente de exportação de minério de ferro, da origem ao destino final, atendendo às expectativas dos clientes nos mais variados aspectos como qualidade, custos e prazos.

Segundo o *Geological Survey National Minerals Information Center* (USGS, 2011), organização científica americana que fornece informações relevantes sobre o uso de recursos naturais e ecossistema a nível mundial, em 2009, a China importou quase dois terços do total das exportações mundiais de minério de ferro e produziu cerca de 60% de ferro-gusa do mundo. Esses indicadores chave comprovam a dependência da expansão da indústria internacional de minério de ferro e do consumo chinês.

De acordo com o Ministério do Desenvolvimento (2011), no período de janeiro a novembro de 2011, as exportações brasileiras totalizaram 462 milhões de toneladas, sendo que destas, 297 milhões de toneladas foram de minério (64%). Conforme o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2011), em 2010 a China foi responsável por 49% das exportações brasileiras de minério, economia que cresceu 9,4% em 2011 e possui uma perspectiva de crescimento de 9,2% em 2012.

Quanto melhor a qualidade do minério de ferro, medida com base em especificações físicas e químicas, maior a qualidade do aço produzido. Em 2010, o Brasil foi o segundo maior produtor de minério com produção de 372 milhões de toneladas, representando 15% da total mundial. No que tange a qualidade, é referência devido ao alto teor de ferro encontrado nos minérios Hematita (60% de Ferro), predominante no Pará, e Itabirito (50% de Ferro) predominante em Minas Gerais (IBRAM, 2011).

O preço do minério de ferro é revisado trimestralmente. Segundo o *International Monetary Fund* – IMF (2011), os preços de venda dos três primeiros trimestres de 2011 ultrapassaram o patamar de US\$ 170 por tonelada, acima da média de US\$ 146 por tonelada obtida em 2010.

O mercado aquecido induz as cadeias produtivas ao limite de operação dos seus ativos, onde a agilidade na identificação e a correta tomada de decisão para eliminação ou redução dos gargalos operacionais garantem melhores resultados em uma operação de larga escala. Esse processo envolve milhões de toneladas em transporte através do modo ferroviário, atuando como um elo entre as minas e os portos.

Segundo Christopher (1999, p. 157), gargalo é “a atividade mais lenta em uma cadeia e embora ele possa, na maioria das vezes, ser uma máquina, pode também ser uma parte do fluxo de informações, como o processamento de um pedido”. Nesse sentido, é todo e qualquer ponto dentro de um sistema industrial que limita a capacidade final de produção.

Em se tratando de sistemas integrados mina-ferrovia-porto de mineração são inúmeras as possibilidades de gargalos operacionais, da produção à expedição do minério para o cliente. Podem ocorrer no processo produtivo do minério, na carga, no transporte ferroviário, na descarga ou na logística portuária.

A partir da literatura pesquisada foi observada uma lacuna referente a modelos integrados com foco em problemas relacionados à descarga do transporte ferroviário que busquem o real entendimento dos impactos gerados e possam suportar empresas em tomadas de decisão. É nesse contexto que o trabalho se apresenta, visando contribuir com o aumento do conhecimento da comunidade científica para a operação de transporte mais impactante no PIB brasileiro, analisando cenários e contribuindo para diminuir os custos logísticos da movimentação de carga do Brasil.

Esta dissertação foca em um ponto comum a todas as operações integradas de minério de ferro por ferrovia: o virador de vagões, que consiste em um equipamento mundialmente utilizado para a operação de descarga de vagões carregados de minério de ferro. São equipamentos de grande porte e forma tubular podendo acondicionar simultaneamente de um a três vagões carregados. Realizam as viradas girando em torno de um eixo central, descarregando o minério em um silo (estrutura metálica colocada abaixo do virador que recebe o material) seguindo através de correias transportadoras para o pátio de estocagem ou diretamente para o embarque dos navios.

Os viradores possuem taxas diferentes de operação, variando de cinco a noventa vagões por hora, dependendo do fabricante. Esses equipamentos são interligados a uma complexa rede que pode ter a sua operação comprometida por falhas diretas ou indiretas, que por sua vez, paralisa ou restringe sua taxa operacional, impactando em perdas de tonelagem descarregada e acréscimo de filas de trens para descarga.

Diante deste problema, nesta dissertação é proposta a construção de um modelo de simulação genérico para ser aplicado a qualquer cadeia integrada de mineração baseada em trens de ciclo, avaliando as interferências na tonelage descarregada e fila de trens para descarga. Como estudo de caso o modelo será aplicado ao virador de vagões do porto da mineradora, localizado na cidade de Itaguaí, no estado do Rio de Janeiro, baseado em informações coletadas em 2011, a fim de avaliar a melhor alternativa (em termos de custo – benefício) de melhorias no gargalo operacional.

### **1.1 Objetivo**

Desenvolver um modelo de simulação para analisar a operação de descarga de uma cadeia integrada mina-ferrovia-porto de uma grande mineradora brasileira e avaliar os reflexos na tonelage descarregada e fila de trens para descarga, quando simuladas melhorias no desempenho do virador de vagões – principal gargalo dessa cadeia.

### **1.2 Objetivo específico**

Para se alcançar o objetivo principal, este estudo apresentou os seguintes objetivos específicos:

- Desenvolver um modelo de simulação que avalie a operação dos viradores de vagões;
- Descrever a construção do modelo;
- Validar o modelo, comparando dados reais com os obtidos através do modelo;
- Analisar cenários e os reflexos da alteração do desempenho do gargalo operacional do sistema, em termos de tonelage descarregada e a fila de trens para descarga.

### 1.3 Delineamento do trabalho

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

- Capítulo 1 - Introdução: apresentam-se as motivações do estudo e o contexto atual do modo ferroviário no Brasil. Além disso, são apresentados o objetivo geral e específico e a organização do conteúdo da dissertação;
- Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: apresenta a justificativa para a elaboração do trabalho, conceitos fundamentais de trens de ciclo e simulação, vantagens e trabalhos relacionados ao uso da ferramenta no Brasil e no mundo;
- Capítulo 3 – Metodologia: descreve os processos de coleta e tratamento estatístico dos dados, estimação dos parâmetros das distribuições de probabilidade representativas do sistema e validação dos resultados obtidos através do simulador, comparando com os resultados reais. Nesse capítulo, o objetivo da dissertação recebe maior detalhamento;
- Capítulo 4 – Aplicação do Modelo: são apresentados a modelagem conceitual, a lógica que dá suporte para a análise que o modelo irá fornecer, os conceitos básicos para elaboração de modelagem computacional e a construção do modelo propriamente dito;
- Capítulo 5 – Análise de cenários: quantifica os resultados obtidos a partir da alteração do desempenho de virador de vagões em termos de tonelage descarregada e redução de fila para descarga. Também é realizada uma análise adicional na redução do custo do transporte ferroviário;
- Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações: reapresenta de forma sumária o conteúdo da dissertação, fazendo uma análise dos resultados obtidos, as conclusões do estudo como um todo, bem como recomendações para continuidade e trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

Neste capítulo são apresentados a justificativa para pesquisa e os conceitos de Trens de Ciclo e Simulação. Em relação à simulação, apresentam-se os tipos, as aplicações, as vantagens e desvantagens dessa técnica. Além disso, são apresentados estudos já elaborados sobre simulação no Brasil e no mundo.

### **2.1 Justificativa para pesquisa**

A Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) teve sua constituição autorizada pela Lei nº 3.115 de 16/03/1957, com a finalidade de administrar, explorar, conservar, ampliar e melhorar o tráfego das estradas de ferro da União a ela incorporadas. Na primeira metade da década de 1980, a RFFSA encontrava-se com sério desequilíbrio técnico-operacional, decorrente da degradação de via permanente e postergação de manutenção de material rodante.

Aliado a crise internacional do mercado de empréstimos, o Governo Federal, impossibilitado de gerar os recursos necessários para continuar financiando os investimentos, em 1990, criou a lei nº 8.031 (atualmente revogada pela lei nº 9.491/97), que instituiu o PND (Programa Nacional de Desestatização). A RFFSA foi incluída em 1992, pelo decreto nº 473/92, com os objetivos de desonerar a União, fomentar investimentos e aumentar a eficiência operacional.

Dessa forma, a partir de 1996 estabeleceu-se a divisão do sistema operado pela RFFSA em sete malhas regionais, sendo elas: Oeste, Centro-Leste, Sudeste, Tereza Cristina, Sul, Nordeste e Paulista. Foram estabelecidos 25.599 km em malha ferroviária, outorgados por um período de 30 anos e prorrogável por igual período (TAB. 2.1).

TABELA 2.1  
Concessionárias ferroviárias – Brasil

Malhas regionais da RFFSA	Data do leilão	Concessionárias	Denominações após concessão	Início da operação	Extensão (km)
Oeste	05/03/1996	Ferrovia Novoeste S.A.	América Latina Logística Malha Oeste S.A.	01/07/1996	1.162
Centro-Leste	14/06/1996	Ferrovia Centro-Atlântica S.A.	Ferrovia Centro-Atlântica S.A.	01/09/1996	7.080
Sudeste	20/09/1996	MRS Logística S.A.	MRS Logística S.A.	01/12/1996	1.674
Tereza Cristina	26/11/1996	Ferrovia Tereza Cristina S.A.	Ferrovia Tereza Cristina S.A.	01/02/1997	164
Sul	13/02/1996	Ferrovia Sul-Atlântico	América Logística Malha Sul S.A.	01/03/1997	6.586
Nordeste	18/07/1997	Campanha Ferroviária do Nordeste	Transnordestina Logística S.A.	01/01/1998	4.238
Paulista	10/11/1998	FERROBAN – Ferrovias Bandeirantes S.A.	América Latina Logística Malha Paulista S.A.	01/01/1999	4.236
				Total	25.599

Fonte: Pesquisa CNT de ferrovias (2011).

Atualmente, o Brasil possui 30.051 km de malha ferroviária. Conforme dados do Censo 2010 publicado pelo IBGE, o Brasil é o quinto maior país em extensão territorial, com 8.515.692,27 km<sup>2</sup> de área, tem a décima colocação na densidade do transporte ferroviário, com apenas 3,5 km de infraestrutura ferroviária por 1000 km<sup>2</sup> de área, ficando atrás de países como o Chile e a Argentina (GRAF. 2.1).

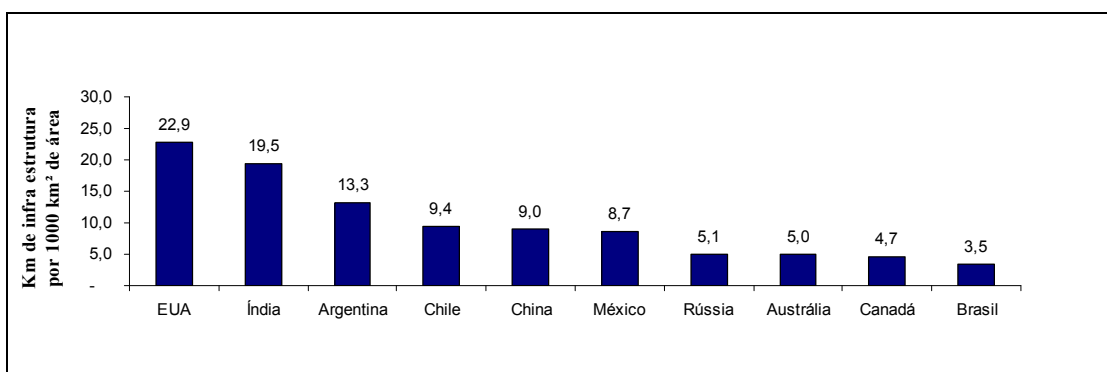


GRÁFICO 2.1 - Densidade do transporte ferroviário  
Fonte: Pesquisa CNT de Ferrovias 2011.

A degradação da rede ferroviária aliada à priorização de investimentos em rodovias restringiu a participação do modo ferroviário na matriz de transporte brasileira. Esse fato pode ser confirmado quando se compara a matriz brasileira em relação aos demais países

de extensão continental, como a Rússia, Canadá, Austrália, Estados Unidos e a China (GRAF. 2.2).

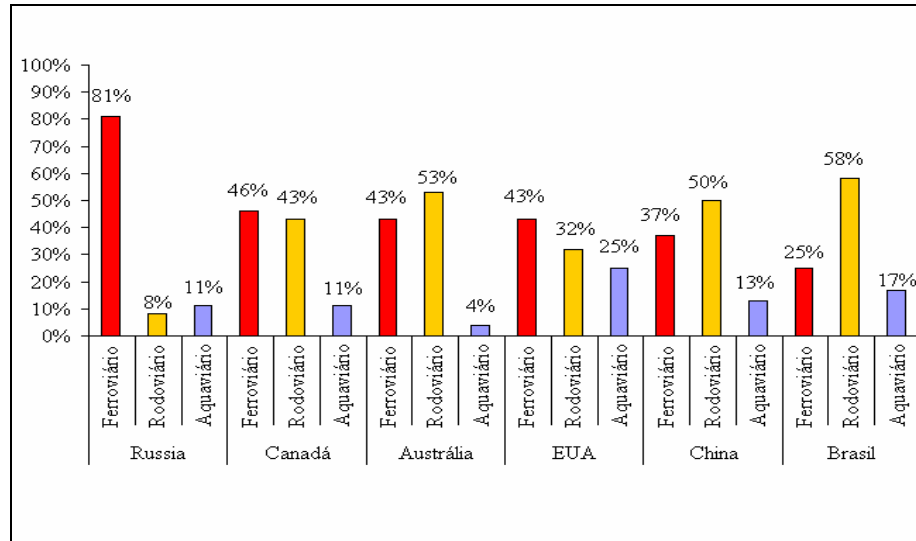


GRÁFICO 2.2 - Matriz de transportes no mundo  
 Fonte: Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários (ANTF), 2011.

Do total transportado pelas ferrovias no Brasil, o minério de ferro é o produto mais representativo. De 1997 a 2010, 14 anos após o início das privatizações, o transporte deste produto cresceu 85% e representou 73% do total de carga movimentada no Brasil, conforme ilustrado no GRAF. 2.3.

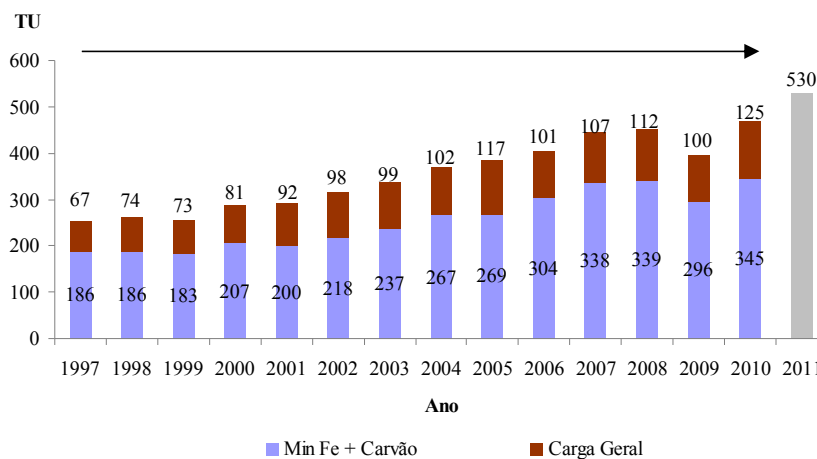


GRÁFICO 2.3 - Produção ferroviária - Brasil  
 Fonte: ANTT - Balanço do transporte ferroviário de cargas, 2011.



O preço do minério de ferro está sendo negociado em seu maior patamar. Segundo publicação do IMF (2011), a tendência de fechamento do valor comercializado pela venda do minério de ferro ultrapassa o patamar de US\$ 170 por tonelada, superior aos US\$ 147 negociados em 2010 (GRAF. 2.4).

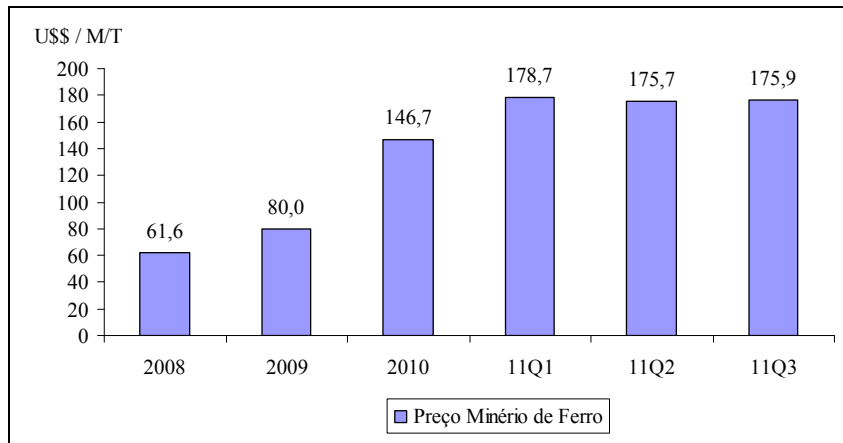


GRÁFICO 2.4 - Preço internacional do minério de ferro  
Fonte: IMF, 2011.

Esses fatos corroboram a predominância dos investimentos da iniciativa privada em modernização das ferrovias concessionárias no período que sucedeu as privatizações, pois pouco foram os investimentos do governo em ampliação estruturada da malha ferroviária brasileira. A disparidade entre investimentos da iniciativa privada e do governo pode ser observada no GRAF. 2.5:

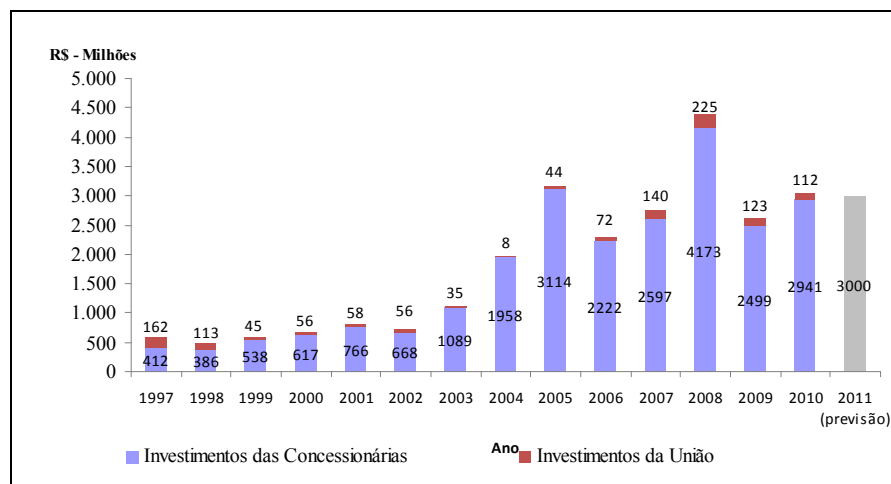


GRÁFICO 2.5 - Investimentos em ferrovias no Brasil  
Fonte: ANTT – Pesquisa CNT de Ferrovias 2011.

Os altos preços de venda do minério de ferro aliado à modernização de infraestrutura ferroviária sugerem a maximização da utilização dos sistemas de descarga de minério de ferro. As mineradoras tendem a operar seus viradores de vagões no limite da capacidade minimizando ociosidades, porém evitando elevadas filas para descarga. É nesse contexto que o modelo de simulação proposto possibilita a avaliação dos reflexos da operação do virador de vagões em tonelagem descarregada e fila de trens para descarga em cadeias integradas que operam com trens de ciclo.

## 2.2 Trens de Ciclo

Em países com proporções continentais como Canadá, Estados Unidos e Rússia, as malhas ferroviárias são principalmente dedicadas ao transporte de carga, ao invés do transporte de passageiros. No Brasil, o transporte ferroviário de minério de ferro que sai das minas em direção aos portos é denominado *Heavy Haul*. Muito embora a tradução literal seja “Carga Pesada”, este termo (também aplicado ao transporte de bauxita, carvão mineral e coque) caracteriza a forma como se realiza o atendimento. Nesta modalidade, os trens são dimensionados e alocados para atender uma demanda específica, em uma operação de grande escala, através de fluxos (rotas), sempre retornando vazios ao ponto de carga, denominados trens de ciclo.

Conforme Fioroni “este movimento caracteriza um ciclo carrega / movimenta / descarrega / movimenta” de diversas composições semelhantes realizando operações nos mesmos pontos de carga/descarga que sofre interferências diversas do sistema, sobretudo quando há diversos pontos de carga e um único ponto de descarga, como o caso em estudo. “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” (FIORONI, 2007, p. 33).

Os trens de ciclo operam com um único tipo de produto que, neste trabalho, é o minério de ferro. Esse produto é transportado pela ferrovia por meio de vagões carregados a partir de cinco pontos de origem para um único ponto de descarga. Após essa operação, eles retornam vazios aos pontos de origem, caracterizando um ciclo fechado e contínuo, conforme representado na FIG. 2.1.

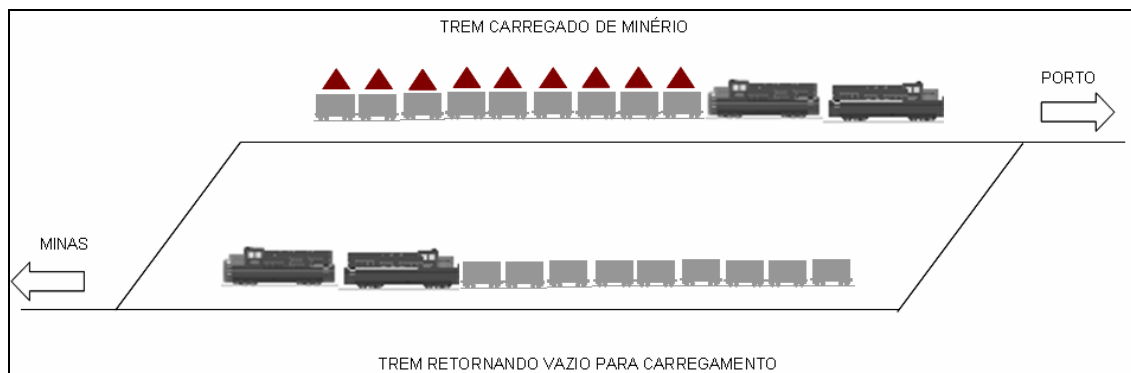


FIGURA 2.1 - Representação de trens de ciclo

As vantagens deste tipo de operação no desempenho do sistema também são descritas como “padronização dos equipamentos de carga e descarga e pouca ou nenhuma necessidade de manobras de formação, aliada a alta capacidade de transporte” (FIORONI, 2007, p. 34). Para se analisar o efeito destas interferências em trens de ciclo, este trabalho fará uso de uma ferramenta computacional que possibilite a realização de simulação.

### 2.3 O que é simulação?

Simulação é um conceito que está bem próximo da realidade das pessoas e das empresas. Há simulações de previsão do tempo, de como pilotar aviões ou dirigir carros, assim como planejar cidades ou mesmo guerras. Algumas simulações nem sempre são baseadas apenas em computadores, pois miniaturas de barcos ou de trens podem simular o processo de carga e descarga de minério de ferro, como exemplo de simulações físicas. Desta forma, consegue-se observar o comportamento de um determinado sistema em uma escala menor, como também manipular e propor alternativas para o estudo (JULIÁ, 2010; ROBINSON, 2004).

Um sistema é definido por todas as partes que interagem entre si em busca de um mesmo fim. Em um sistema, uma ação (evento) provoca uma reação em todo o seu processo e, conseqüentemente, provoca uma possível mudança no sistema. O sistema real difere do sistema virtual, pois o primeiro é a demonstração da realidade, de como ocorrem os processos no mundo real. No sistema virtual, por meio de um computador, pode-se descrever o comportamento de um sistema e ter a visualização de todo o processo que se quer avaliar.

Ao utilizar o ambiente virtual (simulação computacional), consegue-se visualizar o comportamento real do sistema e recriar suas características mais particulares, observando as mudanças e elaborando questões do tipo: “o que aconteceria se” (*what-if*). Com isso, a simulação além de permitir intervenções no processo, permite a realização de erros, a redução de custos na experimentação e a tomada de decisões (PRADO, 2004; FREITAS FILHO, 2001 *apud* ANTONIO, 2006; OLIVEIRA, 2009; BANKS *et al.* 2004).

Conforme apresentado por Banks *et al.* (2004) e Nogueira Júnior (2011), os sistemas são definidos por alguns termos, tais como: (i) Entidade – objeto de interesse no sistema que requisitam serviços (*e.g.*, vagões carregados em fila a espera de descarregamento pelo virador de vagões); (ii) Atributo – é uma característica de uma entidade (*e.g.*, vagões carregados de minério de ferro); (iii) Atividade – “operação que envolve alguma entidade e que pode ou não necessitar de algum recurso” (NOGUEIRA JÚNIOR, 2011, p. 27); (iv) Estado do Sistema – são as variáveis necessárias do sistema para descrevê-lo a qualquer momento, com relação aos objetivos do estudos; e (v) Evento – uma ocorrência que pode gerar uma mudança no estado do sistema. Pode haver eventos com variáveis endógenas (eventos que ocorrem dentro do sistema) e exógenas (eventos externos ao sistema que podem afetá-lo).

Simulação não é apenas a imitação da realidade de forma estática. É, principalmente, a imitação da realidade em movimento, de forma dinâmica. Portanto, a simulação é a imitação de um sistema, por meio de um computador, à medida que ele progride ao longo do tempo. Um aspecto fundamental em um processo de simulação se refere a como o modelo de simulação evolui com o tempo (ROBINSON, 2004; LAW, KELTON, 2000; BARCELÓ, 2010).

Os modelos têm como função representar parte da realidade e, como não podem reproduzi-la de forma fidedigna, predizem certos comportamentos que oferecem subsídios para retratá-la quase que perfeitamente. Desta forma, os modelos são o sistema real em forma de abstração. A partir do modelo, estudam-se as possíveis reações do sistema real, quando alteradas as condições em sua estrutura, ambiente e entorno. Com isso, consegue-se estudar as relações causa-efeito entre as variáveis envolvidas (ANTÔNIO, 2006; HARREL *et al.*, 2002, *apud* ANTONIO, 2006).

Segundo Banks *et. al* (2004), o modelo de simulação pode ser classificado como estático ou dinâmico, determinístico ou estocástico e discreto ou contínuo. O estático representa um sistema em um determinado momento no tempo. O dinâmico representa o sistema enquanto as mudanças ocorrem a todo tempo. Já o determinístico ocorre quando não

há variáveis aleatórias, pois as variáveis já são conhecidas na entrada do modelo e, conseqüentemente, os resultados serão únicos e conhecidos. O modelo estocástico tem uma ou mais variáveis aleatórias como *inputs*, ou seja, “descreve o comportamento dinâmico do sistema quando existem efeitos aleatórios” (ALVIM, 2009, p. 11).

Com relação ao modelo discreto, as variáveis mudam instantaneamente em pontos determinados de tempo (*e.g.*, número de passageiros esperando o trem – ocorre a mudança no sistema quando um novo passageiro chega na fila ou quando passageiros entram no trem). Já no contínuo, as variáveis mudam continuamente com o decorrer do tempo (*e.g.*, um avião voando – as variáveis como posição e velocidade mudam continuamente com o tempo) (LAW, 2007; ALVIM, 2009; NOGUEIRA JÚNIOR, 2011).

A simulação pode ser classificada como simulação de Eventos Discretos (ED), de Eventos Contínuos (EC) e de Monte Carlo (MC). A diferença entre as simulações ED e EC está na análise das variáveis em relação ao tempo, pois na de ED, a variável muda somente a partir do momento que há algum evento que altere o seu comportamento. Na simulação de EC, o estado das variáveis muda continuamente com o tempo. Já na simulação de MC são utilizadas variáveis aleatórias para resolverem problemas de ordem estocástica (LAW, 2007; ALVIM, 2009; NOGUEIRA JÚNIOR, 2011).

Uma simulação simples prevê o desempenho de um sistema de operações sob um conjunto específico de entradas. Por exemplo, ela pode prever o tempo médio de espera de vagões que descarregam minério de ferro em um porto, até que o virador de vagões esteja disponível para efetuar essa descarga. Como afirma Robinson (2004), a simulação é uma abordagem experimental para a modelagem, assim como é uma ferramenta de análise, pois o usuário entra com os dados (*inputs*) e o modelo gera alguns cenários com a previsão dos resultados. Desta maneira, o usuário do modelo continua a explorar cenários alternativos até que ele obtenha conhecimento suficiente ou identifique como melhorar o sistema real. Com isso, ele procura obter um cenário ideal que o auxiliará na tomada de decisões.

Como a representação dos cenários não é perfeita, ela necessita de validação a fim de verificar se todos os principais componentes do sistema sejam levados em consideração e sejam convenientemente representados em termos de seus atributos (BARCELÓ, 2010). Destaca-se que a validação é realizada em cada etapa do processo, e não apenas no final.

A simulação pode ser vista como uma alternativa aos modelos analíticos constituídos por uma técnica que imita em um computador a operação de um sistema do mundo real como ele evolui ao longo do tempo. Desta forma, pode-se obter uma melhor

compreensão da realidade de um sistema de forma virtual e identificar possíveis melhorias para a tomada de decisões futuras no sistema real (ROBINSON, 2004; PIDD, 1998).

### 2.3.1 Aplicação da simulação

Conforme Banks *et al.* (2004), a simulação pode ser aplicada para análise de sistemas complexos, nos quais podem ser simuladas as suas interações e observados os seus comportamentos. Variando as entradas e observando-se os resultados obtidos, é possível verificar quais variáveis são mais importantes e quais menos importantes, auxiliando na gestão das organizações. Além disso, podem ser feitas análises de mudanças que possam vir a acontecer nas organizações e em seu ambiente.

Ressalta-se que a simulação não deve ser utilizada para problemas que podem ser resolvidos pelo senso comum ou analiticamente, assim como quando os custos excedem os investimentos ou o tempo e os recursos não são disponíveis suficientemente. Além disso, a simulação não deve ser utilizada quando não há dados disponíveis e nem confiáveis, e também quando não há tempo e pessoas suficientes para verificarem e validarem o modelo (BANKS *et al.*, 2004).

Um dos grandes campos de aplicação da simulação são as empresas de manufatura e de serviços. O desenvolvimento e a utilização de *softwares* de simulação para uso nessas empresas têm a finalidade de melhorar a eficiência operacional e o processo de tomada de decisão estratégica. Desta forma, melhora-se a produtividade, pois se obtém um maior rendimento do trabalho, com o menor tempo, melhor utilização de seus recursos, e ainda, a possibilidade de avaliar o comportamento dos processos em busca de possíveis melhorias (BABULAK, WANG, 2010; KRUEGER *et al.*, 2000; AL-AOMAR, 2010).

No caso de empresas de serviços, como de transportes (aéreo, ferroviário, rodoviário, dutoviário e aquaviário) e logística, conforme Raid Al-Aomar (2010), a simulação é usada para estudar o comportamento desses sistemas. Além dos setores citados, outros também se beneficiam do uso da técnica de simulação, quais sejam: saúde e gestão hospitalar, hotelaria, bancos e finanças, cadeia de suprimentos, armazenagem e sistemas de armazenamento, aeroportos e aviação, sistemas de tráfego, restaurantes e serviços de alimentação, sistemas de Tecnologia da Informação (TI), entre outros (AL-AOMAR, 2010).

Segundo Law (2007), a simulação é uma das técnicas mais utilizadas em pesquisas de operações e de gerenciamento de organizações. Por meio dessa técnica pode-se aumentar a produtividade, analisar e otimizar a cadeia de suprimentos e logística, prever a

demanda e o desempenho da cadeia, aumentar a lucratividade, planejar e gerenciar as operações, otimizar recursos e realocações, identificar os gargalos, analisar processos e *layouts* alternativos, além de facilitar e apoiar a tomada de decisões.

Aplicações de simulação em todas as operações do transporte ferroviário estão aumentando à medida que crescem as necessidades de melhorias operacionais das ferrovias. O uso de ferramentas de simulação tem cada vez mais finalidades estratégicas, principalmente para esse setor que apresenta características específicas, tais como: grande extensão de quilômetros de estrada de ferro, prioridades de trem (passageiros ou de carga), desempenho físico do trem devido à topografia do trecho, sistemas de sinalização, paragens obrigatórias, movimento e operações de pátio, entre outros (KRUEGER *et al.*, 2000).

Leilich (1998) aborda que a chave para a simulação de operações ferroviárias é: (i) definir objetivos do estudo de simulação; (ii) obter dados precisos e completos; (iii) calibrar as operações virtuais com o mundo real; (iv) alcançar um consenso em relação às operações; (v) identificar as alternativas a serem avaliadas; e (vi) converter os resultados de desempenho em melhorias na gestão. Ao modelar todo o sistema ferroviário consegue-se compreender o gerenciamento de relações operacionais que afetam o desempenho do serviço, custo e confiabilidade. Além disso, auxilia a tornar a gestão com informações mais precisas (LEILICH, 1998).

### 2.3.2 Vantagens e desvantagens da simulação

As vantagens para a realização da simulação são diversas, principalmente para empresas de grande porte. Existem algumas razões que fazem com que grandes empresas utilizem esta técnica, pois ela apresenta alguns benefícios, conforme Dias e Correa (1999), Pegden, Shannon e Sadowski (1990, *apud* JULIÁ, 2010), Robinson (2010), Banks *et. al* (2004) e Law (2007):

- (i) Redução de custos – com a simulação, pode-se experimentar novas ideias sem interrupção das operações e sem investir vultosos recursos para melhoria e para a aquisição de novos projetos e/ou de novos equipamentos. Entretanto, embora haja possibilidades de redução de custo, ao utilizar a técnica de simulação, um modelo pode se tornar caro quando alguns dados são de difícil obtenção (DIAS; CORREA, 1999; BANKS *et al.*, 2004);
- (ii) Tempo – com a simulação, os gestores podem obter os resultados de que necessitam de forma mais rápida, às vezes, em questão de minutos ou horas.

Dependendo do tamanho e da complexidade da empresa, sem a simulação, a análise da situação pode ocorrer de forma muito demorada ou, muitas vezes, nem ocorrer;

(iii) Controle das condições experimentais – com a simulação, pode-se ter um controle da situação e propor alternativas que muitas vezes na realidade não seriam possíveis. Hipóteses de como e por quê de certos fenômenos podem ser testadas (BANKS *et. al*, 2004);

(iv) O sistema real não existe – algumas vezes, o sistema real não existe e podem ser desenvolvidos modelos e/ou criadas algumas alternativas. Com os modelos, a avaliação dos projetos pode ser realizada inúmeras vezes;

(v) Entendimento das interações do sistema – ao entender o papel de cada variável separadamente é possível separar os parâmetros controláveis dos que não são controláveis e analisar a influência de cada um deles em relação ao sistema;

(vi) Flexibilidade – é uma técnica flexível que pode propor e ainda comparar os diversos cenários que são realizados;

(vii) Utilização de recursos computacionais – por meio de computadores, obtêm-se soluções mais rápidas, e permitem-se ajustes e aperfeiçoamento dos processos.

Além disso, a simulação não necessita de tantas simplificações para analisar processos, novas políticas e procedimentos operacionais, e todo o sistema real pode ser analisado de forma detalhada e virtual, sem qualquer interferência na realidade. Sendo virtual, pode-se visualizar todo o processo real e, assim, consegue-se identificar onde estão os seus possíveis “gargalos” e as possíveis melhorias que podem ser feitas. Os resultados da simulação permitem avaliar, por parte dos gestores, se os recursos utilizados são necessários, ou ainda se os recursos disponíveis devem ser realocados. Vale destacar que geralmente a simulação é de fácil entendimento em detrimento às outras técnicas matemáticas existentes, não necessitando de escrever códigos de programação (AGUILAR *et al.*, 2009).

Para Aguilar *et al.* (2009), há vários benefícios para a gestão de empresas quanto ao uso de *softwares* de simulação discreta. Entretanto, há algumas dificuldades, tais como a necessidade de treinamento especial dos profissionais. A construção de modelos complexos como o ferroviário exige um conhecimento sistêmico de todo o processo e a tentativa de simplificar a modelagem costuma afetar negativamente os resultados da simulação. Já em relação às desvantagens do uso da simulação, seguem algumas delas: (i) “os modelos devem ser simulados diversas vezes antes que se possa prever o desempenho do sistema” (CASSEL,



1996 *apud* JULIÁ, 2010); (ii) deve sempre haver a validação do modelo desenvolvido e esta técnica fica muito dependente a esta validação; e (iii) os resultados oferecidos pela simulação somente testam alternativas, não oferecendo o resultado ótimo para o problema.

Há a possibilidade de que não haja bons resultados caso os dados de entrada (*inputs*) não sejam adequados, por isso a construção e a alimentação do modelo requerem um trabalho criterioso. Além disso, alguns resultados podem ser de difícil interpretação, pois segundo Banks *et al.* (2004), a maioria dos resultados são variáveis aleatórias e, por isso, pode-se confundir se uma observação é um resultado da inter-relação do sistema ou se é aleatória ao sistema.

### 2.3.3 Etapas da simulação

Para que uma simulação seja construída, é necessário planejar e seguir algumas etapas (FIG. 2.2). Desta forma, segundo Rodrigues (1994), por meio de ações coordenadamente planejadas, consegue-se transformar o modelo lógico em um modelo operacional. Conforme Antônio (2006, p. 106), “cada projeto de simulação é único” e por isso, exige diferentes habilidades e esforços por parte dos analistas.

Primeiro, é fundamental definir o problema a ser estudado, o escopo e o objetivo a ser alcançado. O início é bem crítico, mas é fundamental para o planejamento da simulação, principalmente para que seus resultados não fiquem comprometidos. É primordial definir qual é o sentido da simulação, qual será a sua finalidade e os motivos de sua criação. Ressalta-se que a definição do problema pode estar sujeita a alterações durante a realização do problema, pois o modelo passará por teste e modificações (LAW, 2007; MARTINS, 2006; RIIS, JOHANSEN, MIKKELSEN, 1995 *apud* ANTÔNIO, 2006).

Posteriormente, passa-se para as demais fases: coleta de dados, identificação das variáveis, construção do modelo, verificação e validação. Segundo Law (2007), na coleta de dados é quando se define o modelo a ser seguido e o nível de detalhes que se quer atingir, pois esse dependerá dos objetivos do projeto, das medidas de desempenho projetadas, da disponibilidade e credibilidade dos dados e, também, do tempo necessário e de recursos financeiros disponíveis.

Ainda com relação à coleta, quanto mais dados precisos e atualizados, mais reais serão os modelos construídos. Quando a obtenção de dados for dificilmente disponibilizada, é preciso fazer pressupostos dos dados. Entretanto, para isso, os dados precisam passar “por

uma análise de sensibilidade para que os valores assumidos não comprometam o modelo” (HARREL *et al.*, 2002 *apud* ANTÔNIO, 2006, p. 109).

A existência de recursos físicos, humanos e técnicos para a execução o projeto é verificada na etapa de identificação das variáveis. Nesta etapa, as medidas de eficiência e os fatores a serem variados, são definidos. Além disso, são definidas as “relações entre as variáveis, as condições e restrições do sistema, de modo a possibilitar a construção do modelo que represente, o mais fielmente possível, sua operação no mundo real” (LOPES *et al.*, 2011, p. 14).

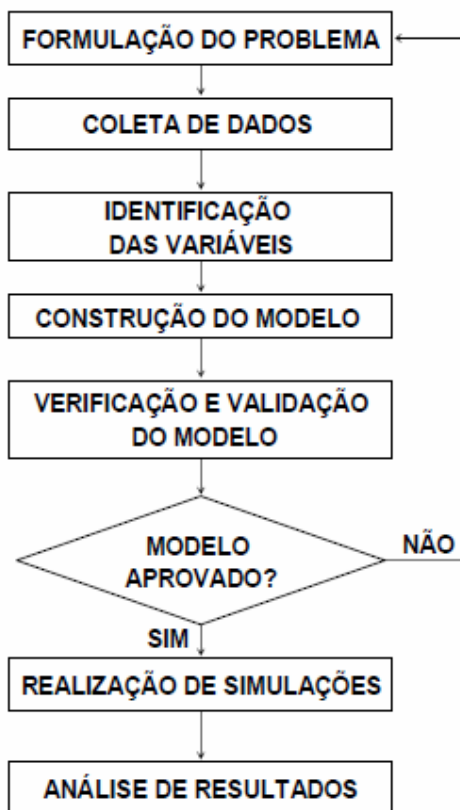


FIGURA 2.2 - Diagrama das etapas de simulação

Fonte: ANDRADE, 2004 *apud* LOPES, 2008.

A construção do modelo refere-se à abstração, por parte dos analistas, dos processos reais que serão modelados. Isso significa que é necessário fazer a correlação entre os processos reais com a estrutura do modelo e as ferramentas de modelagem. Essa etapa também envolve “esboçar o sistema de forma gráfica ou algorítmica definindo e descrevendo componentes, variáveis e interações lógicas” (RAMALHO, 2009, p.18). Conforme Freitas

Filho (2001) *apud* Antônio (2006), os modelos podem prever o comportamento do sistema no futuro, investigar informações e desenvolver hipóteses, assim como fazer comparações com relação ao comportamento das variáveis nas diversas situações.

A etapa de verificação consiste em analisar as correlações construídas e como o modelo está se comportando, inclusive se o comportamento está conforme o previsto. A etapa de validação do modelo é justamente para fazer essa comparação entre os resultados simulados com os da realidade, como também verificar se o que está sendo simulado reage como o sistema real (HARREL *et al.*, 2002 *apud* ANTÔNIO, 2006). Conforme Banks *et al.* (2004), o processo de validação é repetido até que os resultados do modelo sejam julgados aceitáveis pela sua acurácia. Caso o modelo seja aprovado, passa para as etapas de simulações e análise dos resultados. Caso não seja, retorna para a fase inicial de formulação do problema e o mesmo precisa ser reformulado.

Conforme Harrel *et al.* (2002) *apud* Antônio (2006), após a validação do modelo, ele é submetido à experimentação. Nessa fase, os parâmetros de tempo de simulação e o número de simulações são estabelecidos e, finalmente, são realizadas as simulações. Por fim, são analisados e comparados os resultados obtidos em cada cenário criado. Com isso, segundo Ribeiro *et al.* (2011), as opções são testadas, possibilitando a escolha da melhor alternativa.

Destaca-se aqui a principal importância da simulação que é estudar um sistema real, seja ele novo ou não, sem afetar a sua operação atual. Em vários casos, a implantação de um novo sistema na realidade, sem o uso da simulação, pode acarretar em vultosos investimentos. A simulação, além de auxiliar na tomada de decisões, pode contribuir no desenvolvimento de políticas operacionais para melhorar o desempenho de um sistema (CHRISPIM, 2007).

#### 2.3.4 Pesquisas com o uso de simulação

Vários estudos já foram elaborados com a aplicação de simulação nas mais diversas áreas, inclusive em relação aos modos de transportes como ferroviário, rodoviário, hidroviário e aeroviário. Nesta subseção, são apresentados alguns modelos desenvolvidos para o setor de mineração e o transporte ferroviário.

#### 2.3.4.1 Pesquisas realizadas no Brasil

Oliveira (2006) propôs modelar o processo de chegada de vagões para carga e descarga nos terminais atendidos pelo pátio ferroviário do Arará, no estado do Rio de Janeiro, visando identificar as principais causas da formação de filas na malha da MRS Logística. A partir da pesquisa, e por meio da utilização do *software* Arena, verificou-se que o uso da simulação para a análise de desempenho de sistemas complexos é mais recomendada do que o uso das fórmulas de Teoria das Filas. Os resultados indicaram que o maior “gargalo” no pátio do Arará não foram suas limitações de capacidade física, mas os picos de demanda da produção. Desta forma, os gestores obtiveram informações importantes para o suporte à decisão.

Ceciliano (2007) buscou desenvolver e aplicar um método de tomada de decisão utilizando a simulação-otimização durante o processo de planejamento do negócio de uma grande mineradora brasileira. O método foi aplicado na cadeia produtiva de minério de ferro para “melhorar a qualidade das informações do processo de escolha da melhor alternativa empresarial de investimentos da empresa” (CECILIANO, 2007, p. 4). Neste trabalho foram utilizadas as ferramentas computacionais Microsoft Excel 2003, Arena 8.0 e Lingo 10.0. Os resultados invalidaram o pressuposto de que incrementos gerados no início do processo representam um acréscimo proporcional no final do sistema produtivo. O motivo da invalidação é por ter encontrado diferenças nos resultados das simulações. O autor ressalta que qualquer investimento feito na cadeia tem que levar em consideração todo o sistema produtivo. Além disso, deve-se realizar uma criteriosa avaliação de gargalos e/ou restrições, pois caso tudo isso não for considerado, os investimentos serão inviáveis.

Na pesquisa de Landa (2007) também foram elaborados modelos de simulação utilizando o *software* Arena. Essa pesquisa teve como objetivo analisar a viabilidade de duas formas de operação das locomotivas de auxílio no trecho entre Andaime e Bom Jardim de Minas, ambos no estado de Minas Gerais. Quanto ao modelo de simulação, com base nos resultados apresentados, verificou-se que o uso da simulação foi positivo, uma vez que o modelo comprovou a existência de um ganho de produção de 3,53%, caso as sugestões fossem implantadas. Ao aplicar os resultados do estudo, a empresa teria um maior faturamento.

A pesquisa de Fioroni (2007) teve como objetivo desenvolver algoritmos e avaliar técnicas que permitissem modelar detalhadamente malhas ferroviárias com trens em ciclo fechado, e validar esses modelos de simulação de forma adequada. Os resultados obtidos, a

partir do *software* Arena, permitiram: (i) “encontrar o melhor tamanho de composição dos trens de ciclo”; (ii) “dimensionar e ajustar o tamanho das frotas de trens de ciclo para o melhor aproveitamento da capacidade da malha”; (iii) “avaliação do impacto que uma nova grade de trens trará para o sistema”; (iv) “estudar o impacto de investimentos em melhoria de terminais de carga ou descarga, e investimentos em capacidade de circulação da malha (linhas ou pátios)”; (v) “avaliar o impacto de novas políticas de manutenção preventiva que reduzam o percentual de contingências de via ou pátio no sistema” (FIORONI, 2007, p. 207-208).

Lopes (2008) desenvolveu um modelo de simulação aplicado ao transporte multimodal de graneis sólidos na hidrovia do Araguaia-Tocantins. Durante o desenvolvimento do modelo foram realizados testes de verificação com o objetivo de certificar a aproximação das rotinas computacionais com as reais. Posteriormente, foram propostos três cenários: (i) análise de sensibilidade do sistema em relação à variação da quantidade da frota rodoviária; (ii) análise de sensibilidade do sistema e variação da quantidade de estoque no pátio; e (iii) análise de sensibilidade em relação à variação da quantidade de carga expedida. A partir da análise desses cenários, foi possível ter um diagnóstico para auxiliar à tomada de decisão referente aos “gargalos” para a operação modelada que, por sua vez, “estruturaram a apresentação do dimensionamento adequado da capacidade de transporte de minério de ferro por todo o sistema” (LOPES, 2008, p. 96).

Guimarães *et al.* (2009) propuseram em um estudo, comparar os métodos de simulação computacional e o modelo paramétrico de rede de filas para analisar o problema de capacidade de linha férrea. Foram realizados três cenários com 13 subtrechos ferroviários com a utilização do *software* Arena. A análise de cenários indicou que o trecho de número quatro era o “gargalo” do sistema e, ainda, foram apresentadas informações importantes que poderiam auxiliar na tomada de decisões. Os resultados também mostraram que a diferença dos tipos de análise (teoria da fila e simulação computacional) necessita de dados de entrada diferentes, como tempos médios, para filas, além dos dados de cada atividade, obtidos no sistema real para realizarem as distribuições de probabilidade.

Batista (2006, p. 20) apresentou uma pesquisa que propôs “analisar a capacidade de processamento de trens unidade em uma linha ferroviária singela, sujeita às restrições físicas e operacionais da via permanente”. Posterior à aplicação do modelo de simulação, pretendeu-se avaliar o impacto na sua capacidade. O método utilizado foi o “Simulador de desempenho do Trem” que “permite determinar o tempo, a velocidade, a distância e o consumo de combustível de um trem que trafega num determinado perfil da via”. Há ainda “os efeitos das rampas, curvas, resistências do trem, limites de velocidade, características da

propulsão e da frenagem e condições operacionais” (BATISTA, 2006, p. 28). Nessa pesquisa foram analisados seis cenários, nos quais apresentaram a influência dos (a): (i) limites de velocidade operacionais; (ii) tempos mínimos de parada; (iii) estações utilizadas; (iv) existência de passagem de nível; (v) otimização dos fatores de produção analisados; e (vi) espaçamento entre as estações.

O estudo acima permitiu identificar os problemas que estavam ocorrendo na ferrovia, bem como seus motivos, auxiliando os gestores na hierarquização dos investimentos a serem efetivados na companhia. Os resultados indicaram a existência de um gargalo entre as estações Engenheiro Balduino e São José do Rio Preto, no estado São Paulo/Brasil. Apresentaram ainda que, ao eliminar as restrições impostas, “é possível aumentar a capacidade de seis para dez trens por dia por sentido, ou seja, um aumento de 67%” (BATISTA, 2006, p. 82).

A pesquisa de Ramalho (2009) teve como objetivo avaliar o impacto operacional na malha da MRS Logística – trens de cargas –, com o projeto de segregação de linhas da Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) – trens de passageiros –, na região de São Paulo. O trecho entre os municípios de Suzano e Pinheirinho, ambos no estado de São Paulo, é compartilhado pelos trens de carga e de passageiros e, portanto, constitui um gargalo para a capacidade produtiva da malha da MRS.

Por meio do uso da técnica de simulação e do *software* Arena foram analisados três cenários que representavam: (i) a forma de operação atual na região; (ii) o projeto de segregação das linhas; e (iii) a construção da esteira rolante da siderúrgica Usiminas Cubatão. Os resultados obtidos com a simulação foram a redução de THP (Trem Hora Parado), ganho de capacidade de produção, incremento na capacidade do ciclo de quase 300.000 toneladas transportadas por ano com base nos cálculos do período estudado (2009), e, ainda, “economia de recursos, alteração de desenhos operacionais, não restrição de modelos de locomotivas, ganho financeiro com o não pagamento do direito de passagem nas linhas da CPTM” (RAMALHO, 2009, p. 40).

Para analisar o impacto dos investimentos da construção da ferrovia Norte-Sul na economia do estado do Tocantins, Batista Filho (2009, p.178) utilizou, dentre outras técnicas, a simulação. Dois cenários foram considerados: (i) “a realização integral dos investimentos previstos no Plano de Aceleração do Crescimento (PAC) de acordo com o cronograma estipulado pelo governo federal, com aplicação integral nos setores econômicos, somente no estado do Tocantins”; e (ii) “um vazamento de capitais, referente ao comércio inter-regional”. Com a simulação, estimou-se que os investimentos previstos de R\$ 2,86 bilhões de reais na

implantação da ferrovia Norte-Sul gerariam um aumento da produção de R\$ 744 milhões de reais e a criação de 23,7 mil novos empregos, representando um aumento de 3,7% das ocupações do Estado (BATISTA FILHO, 2009).

O objetivo da pesquisa de Vieira (2009, p. 6) foi “exemplificar, por meio de uma aplicação prática, como a ferramenta de simulação probabilística permite auxiliar a gestão operacional de ferrovias”. Com o uso do *software* Arena, foram obtidos resultados coerentes comparados com a realidade do funcionamento operacional da ferrovia estudada, permitindo o apoio ao planejamento e às decisões futuras da operação. Observou-se ainda que, com os ajustes feitos após o estudo realizado, houve um aumento na produtividade dos ativos da ferrovia por meio da redução do tempo de viagens.

Aguilar *et al.* (2009, p. 1) avaliaram os “benefícios da aplicação da simulação, utilizando o software Arena 10.0, para modelar um trecho de um malha ferroviária e auxiliar na tomada de decisões estratégicas”. Foram analisados três cenários: (i) criação de um novo pátio de cruzamento; (ii) remoção de um pátio de cruzamento; e (iii) eliminação das atividades em um dos pátios da companhia. Os resultados apontaram destaque ao cenário (iii), pois ao eliminar as atividades nesse pátio, “houve um aumento do número médio de trens em circulação e uma grande redução do tempo de atravessamento de todos os trens”.

A pesquisa de Camargo (2010, p. 18) teve como objetivo “estudar políticas operacionais que maximizem o desempenho de um sistema ferroviário de transporte de grãos composto de duas ferrovias distintas e considerando múltiplas origens, múltiplos produtos e destino a um único porto”. Utilizou-se a abordagem híbrida otimização-simulação e um dos resultados dessa pesquisa apresentou que a pequena capacidade de armazenagem de carga no porto é o grande gargalo de capacidade do sistema. O que diverge com o que funcionários acreditam no sistema real, pois abordam que o gargalo é a escassez de vagões e locomotivas. A pesquisa concluiu ainda que, apesar de ter “sido possível obter um conjunto de melhores estratégias para gerenciamento de filas e distribuição de vagões vazios, não foram obtidos resultados conclusivos em relação à melhor regra de priorização a ser aplicada a cada processo decisório”.

Dentre os vários estudos pesquisados e apresentados acima, observou-se uma constante na maioria deles em relação a importância do uso da simulação para a gestão operacional, inclusive de companhias que gerenciam o transporte ferroviário. Nota-se que o uso do *software* Arena também foi importante para os cenários elaborados e os resultados adquiridos.

#### 2.3.4.2 Pesquisas realizadas no exterior

Em pesquisa realizada por Lewellen e Tumay (1998), foi apresentado o desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar no planejamento estratégico da *Union Pacific Railroad*, Omaha, Nebraska/Estados Unidos. O objetivo do trabalho foi modelar as várias interações existentes no processo ferroviário e identificar os pontos de estrangulamento (gargalo) no processo.

Os recursos críticos associados ao funcionamento da ferrovia eram: (i) tripulação, (ii) locomotivas, (iii) pista, (iv) terminais e (v) vagões. Acredita-se que a análise da interação dos recursos existentes é fundamental para determinar os *tradeoffs* – relação de conflito entre aspectos de desempenho em operações (CORRÊA; CORRÊA, 2005) e, assim, propor um plano com base em previsões projetadas. Utilizando o *software* de simulação MODSIM III, foi possível verificar as taxas de utilização da locomotiva e também que existiam áreas deficitárias e áreas com excesso de tripulação e locomotivas.

Em outra pesquisa realizada nos Estados Unidos, modelou-se o trajeto do trem de uma rede ferroviária de Los Angeles – *Inland Empire Trade Corridor*. Como esse sistema ferroviário é bem complexo, para a modelagem do sistema foi preciso observar os seguintes fatores: múltiplas configurações de trilhos, prioridades entre os trens, – pois há trens de carga e de passageiros, e os diversos limites de velocidade e flexibilidade de rota. Por meio da modelagem do sistema, puderam avaliar as alternativas com o aumento da capacidade e identificar os possíveis gargalos. Os autores Dessouky, Lu e Leachman (2002) apresentaram como a modelagem de simulação do trem foi uma importante técnica de análise da capacidade da ferrovia.

Carr e Way (1997) desenvolveram um modelo de simulação para avaliar as operações de transporte ferroviário da empresa Tropicana, situada na Flórida/Estados Unidos. Por meio do *software* ProcessModel, vários cenários foram executados para determinar o impacto dos tempos de ciclo entre Bradenton (pátio da empresa) aos centros de distribuição. O modelo identificou as áreas que tiveram o maior impacto sobre a disponibilidade de vagões e as necessidades de tripulações adicionais para satisfazer a demanda de uma determinada região. Além disso, foi possível avaliar o carregamento e os prazos de entrega dos produtos e verificar que não era preciso aumentar o número de vagões para o atendimento da demanda. Com isso, houve uma maior utilização de seus ativos e novos investimentos foram desnecessários.



Guttkuhn *et al.* (2003) criaram cenários simulados para verificar o impacto das alterações da tripulação, dos turnos de trabalho e dos regulamentos governamentais no processo de transporte. O *software* TrainSim auxiliou nas respostas das perguntas do tipo *What-if* e permitiu analisar os processos operacionais e os parâmetros sociológicos e fisiológicos da equipe. Com isso, constatou-se os potenciais problemas que poderiam afetar o processo da ferrovia antes de qualquer implementação real ser executada, em busca de economizar custos e investimentos desnecessários.

Um estudo sobre o sistema ferroviário da Holanda, que tem uma das ferrovias mais movimentadas e interligadas do mundo, utilizou a simulação como ferramenta para apoiar a tomada de decisão. A intenção era obter informações para atender à necessidade de desenvolvimento de novas infraestruturas ferroviárias. Foi utilizado o *software* Simone que foi desenvolvido para simular redes ferroviárias de grande escala. O objetivo do Simone é de: (i) “avaliar a robustez de horários”; (ii) “determinar a estabilidade da rede”; (iii) “analisar as causas e os efeitos dos atrasos”; (iv) “melhorar horários, determinando as relações entre o design padrões e robustez do calendário”; (v) “detectar e quantificar os gargalos em uma rede ferroviária”; e (vi) “quantificar atrasos para diferentes lay-outs de infraestruturas ferroviárias” (MIDDELKOOP; BOUWMAN, 2001, p. 1).

Ainda na pesquisa de Middelkoop e Bouwman (2001) foram apresentados dois estudos de casos com o objetivo de: (i) verificar as necessidades futuras em termos de transporte de trem de serviços e infraestrutura; e (ii) avaliar os efeitos na estação de Hengelo e da rede na ausência de um conflito já existente. Com isso, foi possível comparar o desempenho de vários cenários e avaliar a relação de causa e efeito no sistema. Além disso, foi possível obter informações, sugestões e planos para melhorar o processo ferroviário e também o próprio *software* de simulação.

A partir da leitura de várias pesquisas realizadas, tanto no Brasil quanto no exterior, consegue-se perceber como o uso da simulação traz benefícios para a gestão das empresas. Ao simular o sistema real em ambiente virtual consegue-se obter informações antecipadas em busca de mais eficiência (utilização mínima de recursos para se atingir os objetivos) e eficácia (alcançar os resultados) dos processos. A criação de cenários hipotéticos faz com que sejam testadas diversas alterações no sistema e que possam obter resultados sobre como seria o seu desempenho na realidade. A apresentação de diversos resultados simulados permite testar ideias de forma segura e sem interferir e comprometer nas operações reais (GUTTKUHN *et al.*, 2003).

Em todos os estudos pesquisados, os resultados apresentaram que o uso dessa técnica auxilia no gerenciamento dos processos e na obtenção de informações para auxiliar na tomada de decisão dos gestores das organizações. Quanto aos *softwares* utilizados nas pesquisas, observou-se que no Brasil o Arena é um dos mais utilizados. Já no exterior, há uma maior diversidade na utilização dos *softwares*, mas todos buscando o mesmo objetivo de simular processos de alta complexidade em busca de melhorias na gestão.

Como o foco dos estudos apresentados foi o transporte ferroviário, observou-se que o uso da simulação é muito importante para a obtenção de melhorias na gestão das organizações que o administram. Destaca-se que muito desses estudos apresentaram a ferramenta de simulação como suporte para atender às necessidades de melhorias tanto da gestão operacional como de custos e financeira. Deve-se ressaltar que o transporte ferroviário faz parte de um sistema bastante complexo e que, havendo alguma alteração em uma de suas partes, conseqüentemente, haverá uma possível alteração no todo.

## 3 METODOLOGIA

Para a execução do projeto seguiram-se os passos apresentados na FIG. 2.2, do capítulo 2. Neste capítulo, o desenvolvimento de cada um desses passos será descrito. Como as etapas de “Formulação do problema” e “Definição dos objetivos” já foram descritas nos capítulos anteriores, a seção 3.1 iniciar-se-á pela etapa de coleta de dados.

### 3.1 Coleta de dados

Para se obter resultados de boa qualidade através de um projeto de simulação é fundamental fornecer ao modelo dados de boa qualidade. Por mais precisa que seja a representação do sistema em análise, os resultados dos cenários obtidos através da simulação só terão validade caso os dados de entrada do modelo tenham sido coletados e tratados de forma adequada.

Por se tratar de um modelo de simulação é interessante aproveitar a possibilidade de se trabalhar com dados numéricos sempre acompanhados de sua variabilidade, possibilitando a análise estatística utilizando o intervalo de confiança.

A seguir são descritas a metodologia utilizada para a obtenção, coleta e tratamento dos dados, além da apresentação da ferramenta *Input Analyzer* do Arena para a estimação dos parâmetros das distribuições de probabilidade representativas do sistema e a realização de testes de aderência.

O período escolhido para a coleta dos dados foi de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2011, ou seja, o período de um ano de operação. Esta escolha foi feita por se tratar de uma operação perene, que não possui sazonalidade de demanda. Segue abaixo o processo de coleta de dados do sistema de descarga e ciclo dos trens

#### 3.1.1 Coleta de dados da descarga – SGOP

A mineradora possui um sistema de controle de operação portuária, cujos dados são atualizados em tempo real diretamente pela sala de controle do porto, que monitora as atividades de todos os equipamentos inerentes à operação, tais como viradores de vagões,

empilhadeiras, correias transportadoras, alimentadores, recuperadoras e carregador de navios. A representação esquemática de uma estrutura portuária pode ser observada na FIG. 3.1 abaixo.

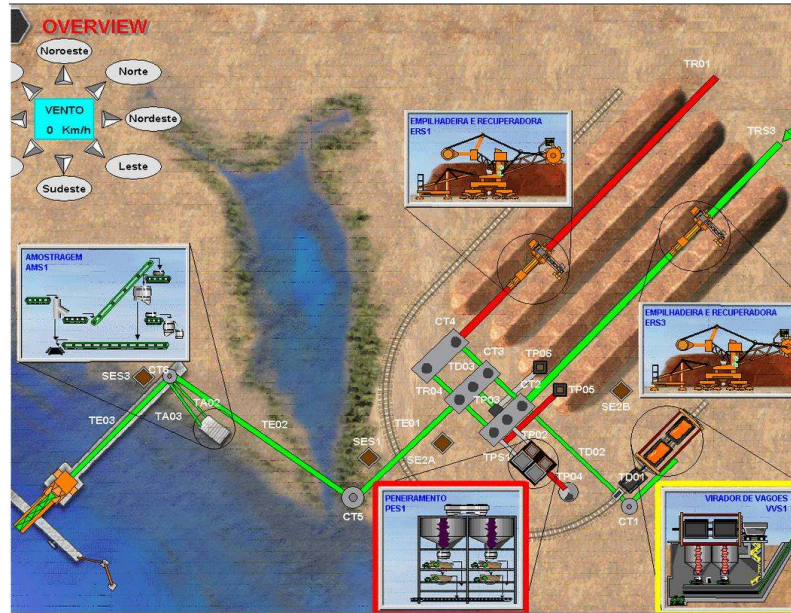


FIGURA 3.1 - Representação esquemática de estrutura portuária

Estes equipamentos interligados formam uma complexa rede que se inicia com a descarga do trem e termina com o carregamento do navio. Em seguida serão apresentados maiores detalhes de todos os elementos descritos e como interagem entre si.

### 3.1.1.1 O trem

O trem é basicamente composto de vagões e locomotivas. Para ambos existem diversos tipos que são utilizados conforme a realidade operacional e tipo de mercadoria a ser transportada. No caso em estudo, cada trem tipo é formado pelo conjunto de 134 vagões e 2 locomotivas. A FIG. 3.2 ilustra as locomotivas e vagões utilizados na cadeia em análise.

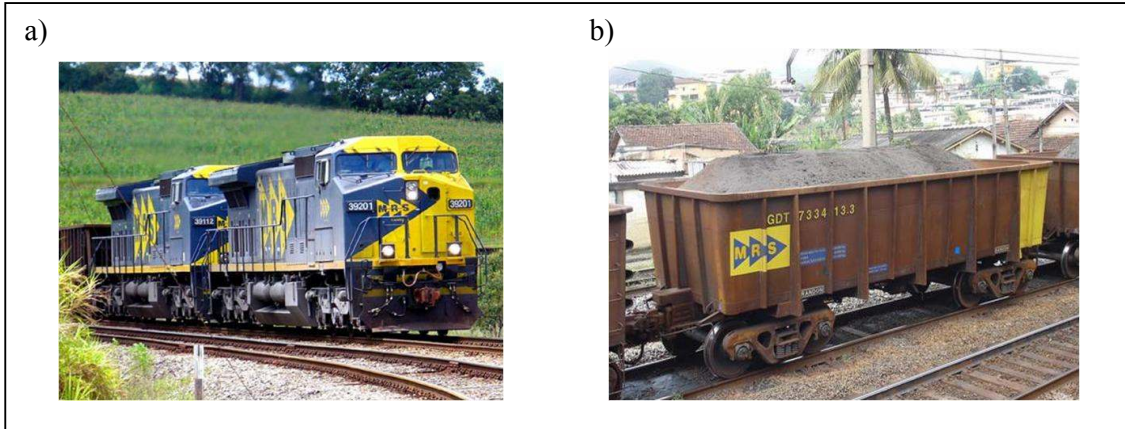


FIGURA 3.2 - Formação do trem  
a) locomotivas; b) vagões.

### 3.1.1.2 Virador de vagões (VV)

Para que seja possível a descarga dos vagões tipo GDT no porto, é necessária a utilização de um equipamento de descarga denominado virador de vagões. Este equipamento é composto de dois elementos que operam sincronizados para realizar a descarga dos vagões carregados de minério. A FIG. 3.3 ilustra o primeiro elemento denominado “Giro”, que é responsável por tirar o minério do vagão girando-o em torno de um eixo central e encaminhar para o Silo, cuja estrutura receberá maior detalhamento adiante.

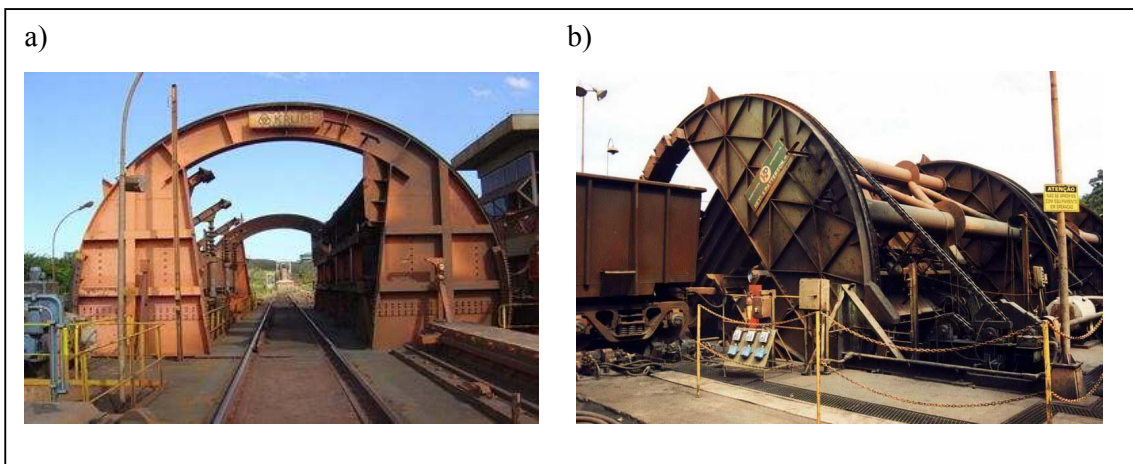


FIGURA 3.3 - Detalhe do Giro do virador de vagões  
a) virador de vagões vazio; b) virador de vagões em operação.

### 3.1.1.3 Braço posicionador (BP)

O segundo elemento do virador de vagões é denominado Braço posicionador. Este equipamento é composto por um cilindro hidráulico associado a um braço mecânico, que se encaixa entre os vagões sendo responsável pela movimentação do trem durante o processo de descarga, empurrando os vagões vazios e posicionando mais vagões carregados para que o giro possa dar início a um novo ciclo de descarga, conforme ilustrado na FIG. 3.4.

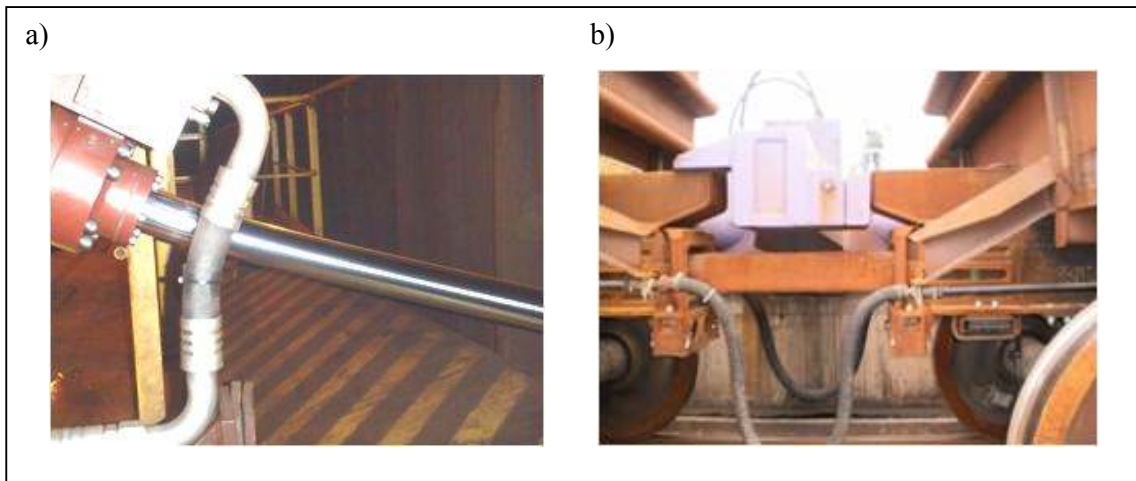


FIGURA 3.4 - Detalhe do Braço posicionador  
a) cilindro hidráulico de movimentação do braço posicionador  
b) posicionamento do braço entre os vagões.

### 3.1.1.4 Alimentadores (AS)

Uma vez completado o giro do virador de vagões, o minério cai por gravidade em uma estrutura metálica denominada Silo. A mesma é subterrânea e atua como um funil, canalizando o minério para os Alimentadores, que funcionam como esteiras rolantes e são responsáveis por posicionar o minério na correia transportadora, que por sua vez conduzem o minério para a área de interesse, conforme representação esquemática apresentada na FIG. 3.5.



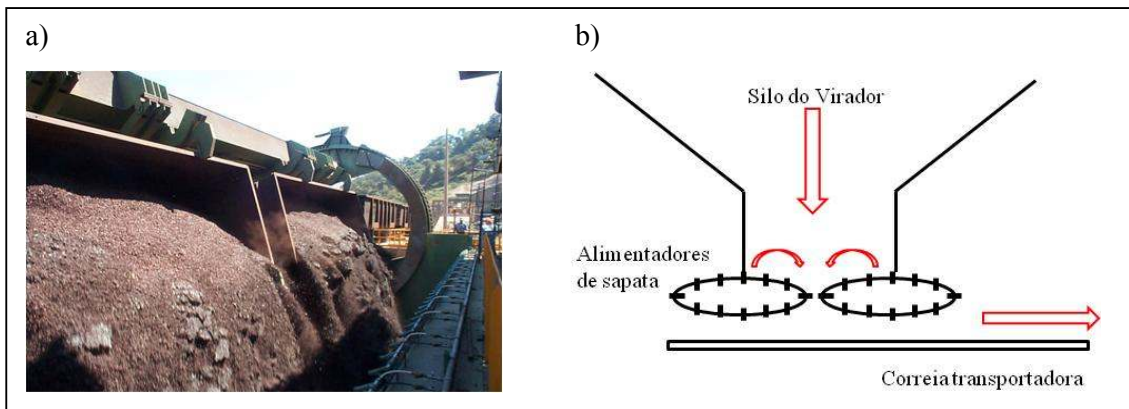


FIGURA 3.5 - Representação esquemática do Silo e Alimentadores  
 a) minério sendo depositado no Silo b) detalhe dos Alimentadores.

### 3.1.1.5 Correias Transportadoras (TE/TD/TR)

As correias transportadoras são o elo entre o virador de vagões, o carregador de navios e os pátios de estocagem. A depender da necessidade, as mesmas podem conduzir o minério do virador para os pátios, para o carregador ou dos pátios para o carregador através de diferentes rotas. Esta seleção é possível em função da existência de equipamentos de empilhamento/recuperação nos pátios, denominados ER, e cabeçotes móveis de transferência, localizados nas intercessões das correias transportadoras. Os destinos finais das correias transportadoras são apresentados na FIG. 3.6.

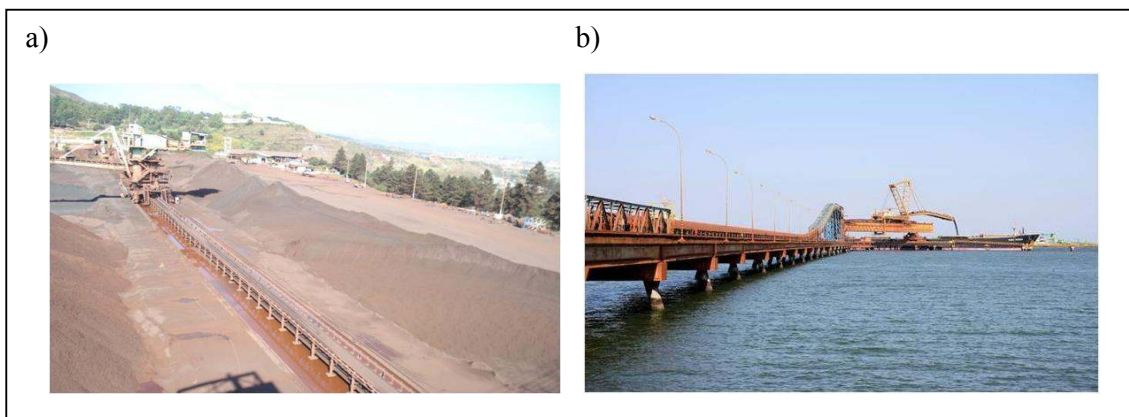


FIGURA 3.6 - Correias transportadoras  
 a) transporte de minério para os pátios b) transporte de minério para os carregadores

### 3.1.1.6 *Stacker Reclaimer* (ER)

Trata-se de um equipamento que tem por finalidade empilhar o minério que chega através das correias ou retomar/recuperar o produto estocado por meio da roda de caçamba. Quando a máquina está funcionando como um *Stacker* (empilhar), a roda de caçambas não gira, sendo o material então lançado diretamente da correia para o pátio. Quando se trabalha como um *Reclaimer* (retomar/recuperar), a roda de caçambas gira e o material é recuperado. Estas situações são ilustradas conforme FIG. 3.7.

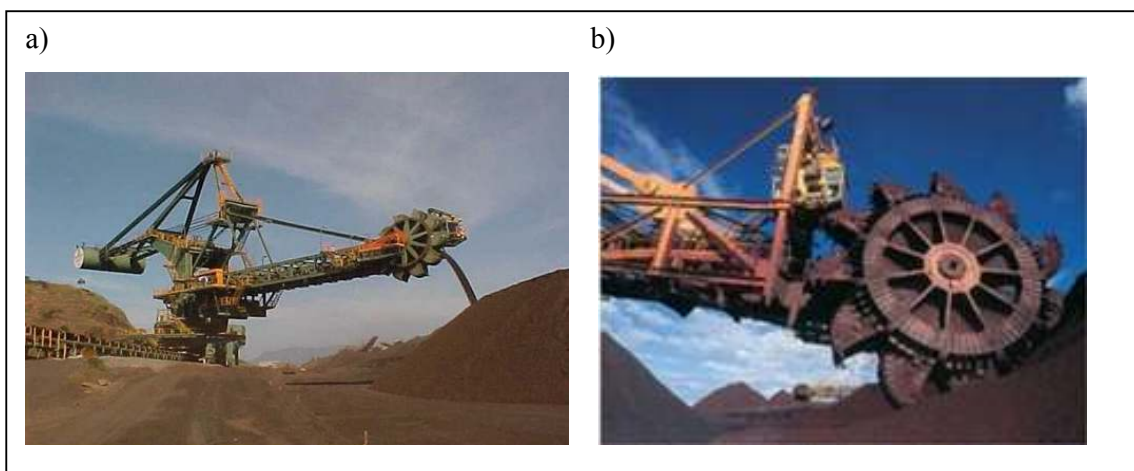


FIGURA 3.7 - *Stacker Reclaimer*

a) função *Stacker*

b) função *Reclaimer*

### 3.1.1.7 Carregador de navios (CN)

O carregador de navios, ou *Ship Loader*, é o equipamento responsável por acondicionar a carga nos porões do navio, destino final do minério no porto. É formado por quatro blocos, que são: ponte giratória, sistema de lança, conjunto do transportador e sistema elétrico, cujos movimentos conjugados entre si permitem a distribuição da carga nos porões dos navios conforme plano de carga sem que seja necessária a movimentação dos mesmos.



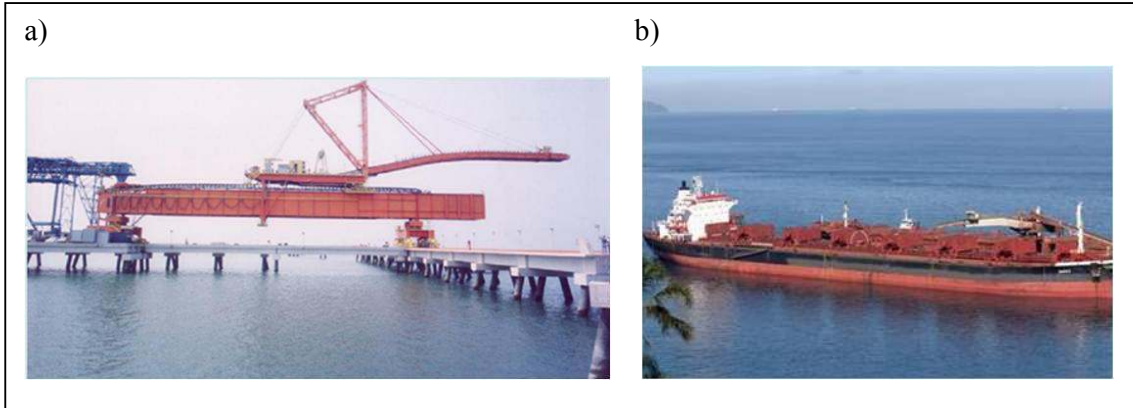


FIGURA 3.8 - Processo de carregamento de navios  
a) *Ship Loader*                      b) navio de minério

Uma vez carregados, os navios conduzem o minério acondicionado para os clientes da mineradora ao redor do globo, onde através de outro processo logístico são conduzidos para as usinas siderúrgicas para o consumo na produção de aço.

As informações referentes à operação de todos os equipamentos podem ser acessadas através de um sistema *online*, denominado Sistema de Gestão de Operações Portuárias (SGOP), conforme apresentado na FIG. 3.9. As consultas ao banco de dados são parametrizáveis e permitem extrair resultados da operação portuária no horizonte máximo de um mês.

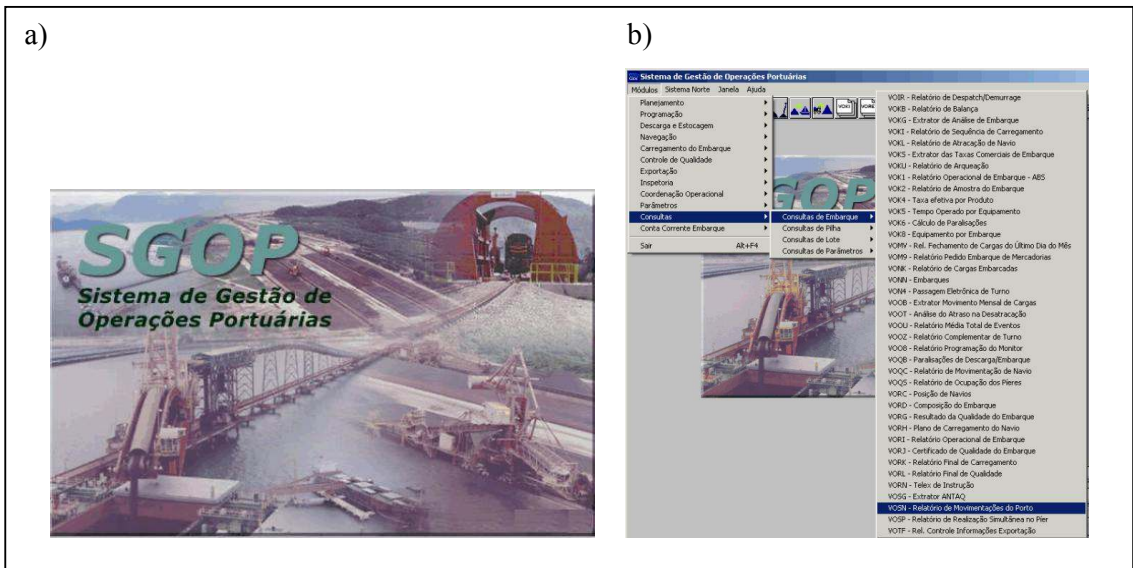


FIGURA 3.9 - Sistema de Gestão de Operações Portuárias (SGOP)  
a) Layout de abertura                      b) Menu de consultas

As informações relativas a operação ou paralisação do sistema de descarga são transmitidas via rádio diretamente dos operadores do virador de vagões para a sala de controle, que fazem os apontamentos no sistema em tempo real. Cada evento é apontado conforme classificação prévia, que possibilita as estratificações dos resultados.

Os dados pertinentes para o projeto que podem ser obtidos no SGOP são relativos ao equipamento, o horário, a descrição e a duração de cada evento responsável pela paralisação do sistema de descarga. Neste sentido, com base nos relatórios é possível levantar o histórico de todas as interrupções “Diretas”, cujas origens estão relacionadas às falhas do virador de vagões, ou “Indiretas”, cujas origens estão relacionadas às falhas dos demais equipamentos. O modelo de consulta do SGOP é ilustrado conforme FIG. 3.10.

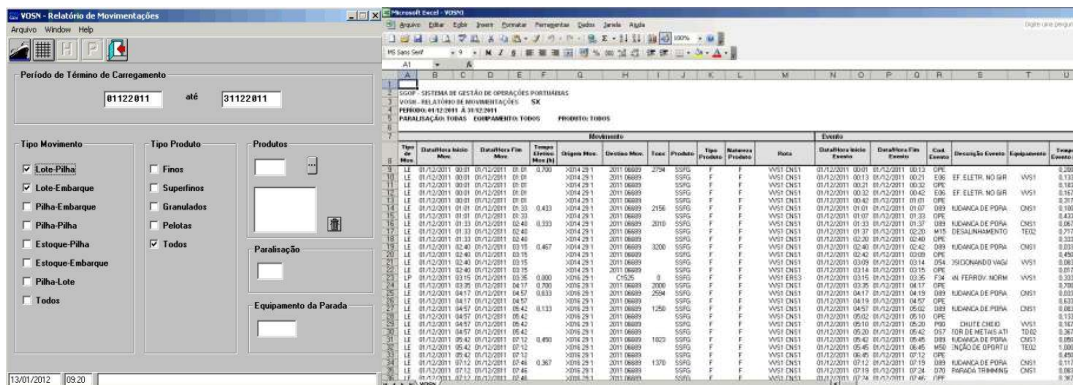


FIGURA 3.10 - Consulta SGOP

Outras informações importantes que serão extraídas do relatório para composição do modelo de simulação são em relação à descrição do tipo de falha, que podem ter origem mecânica ou elétrica e, quando em atividade, a taxa horária de operação do virador de vagões, medida em toneladas / hora.

Ao todo foram mapeados 106 tipos de falhas, distribuídos entre elétricas e mecânicas. Os tipos de falhas elétricas totalizaram 63; destas, 24 diretas e 39 indiretas. Já os tipos de falhas mecânicas totalizaram 43, sendo 17 diretas e 26 indiretas, todas codificadas e apresentadas conforme QUADRO 3.1 e QUADRO 3.2:

QUADRO 3.1

Códigos das paradas - Falhas elétricas

TIPO	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
Elétrica direta	E01	defeito elétrico posicionador
	E02	defeito elétrico no giro
	E03	defeito elétrico trava vertical
	E04	defeito no disjuntor controle
	E05	defeito comunicação supervisorio
	E06	defeito elétrico no alimentador
	E07	defeito elétrico na trava roda
	E08	defeito elétrico trava auxiliar
	E09	defeito elétrico alimentação
	E10	defeito cpu
	E11	defeito elétrico no braço trava
	E12	defeito elétrico na bomba
	E13	defeito elétrico no ventilador
	E14	defeito programação rota supervisorio
	E15	falha comunicação cp
	E16	falha comunicação via radio
	E17	queda de tensão externa
	E18	teste elétrico
	E19	queda de tensão
	E20	aguardando atendimento manutenção elétrica
	E21	sobrecarga no posicionador
	E22	energizando sistema
	E23	sobrecarga no alimentador
	E24	sobrecarga no braço trava

TIPO	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
Elétrica indireta	E25	defeito elétrico tripper	E45	falha no motor
	E26	defeito elétrico cabeça móvel	E46	falha de inversor
	E27	defeito elétrico sensor	E47	falha elétrica sensor chute cheio
	E28	defeito elétrico na translação	E48	falha elétrica na chave
	E29	defeito elétrico sem diagnóstico	E49	falha no contator
	E30	defeito elétrico sensor subvelocidade	E50	falha elétrica chave emergência
	E31	defeito elétrico corte amostragem	E51	falha elétrica detector de metais
	E32	defeito elétrico na permissão	E52	falha cabeça local cp
	E33	defeito elétrico no chute	E53	troca de sensor
	E34	defeito elétrico na balança	E54	curto na fiação
	E35	defeito elétrico correia trailer	E55	parada elétrica direta
	E36	defeito elétrico no limite	E56	desalinhamento elétrico
	E37	defeito elétrico detetora rasgo	E57	baixa velocidade tc lança/trailer
	E38	defeito set/reset bit plc	E58	inspeção elétrica
	E39	defeito elétrico acionam.correia	E59	sobrecarga na correia
	E40	defeito elétrico no freio	E60	travamento sistema cck
	E41	defeito elétrico extrator metal	E61	sobrecarga na translação
	E42	defeito elétrico divisor de fluxo	E62	sobrecarga correia trailer
	E43	defeito elétrico trava da lança	E63	sobrecarga na elevação
	E44	defeito elétrico trava intermediária		

QUADRO 3.2

Códigos das paradas - Falhas mecânicas

TIPO	CÓDIGO	DESCRIÇÃO
Mecânicas diretas	M01	defeito mecânico no giro
	M02	defeito mecânico no alimentador
	M03	defeito mecânico posicionador.
	M04	defeito mecânico trava vertical
	M05	defeito mecânico no trilho
	M06	defeito mecânico cremalheira
	M07	defeito mecânico no vibrador
	M08	defeito mecânico unidade hidráulica
	M09	defeito mecânico acoplamento
	M10	defeito mecânico no braço
	M11	defeito mecânico no limite
	M12	defeito mecânico <i>dumper</i>
	M13	defeito mecânico grampo
	M14	inspeção mecânica
	M15	atraso devolução equipamento
	M16	parada engenharia mecânica
	M17	problema de nível de óleo
Mecânicas indiretas	M18	defeito mecânico no chute
	M19	defeito mecânico na translação
	M20	defeito mecânico <i>tripper</i>
	M21	defeito mecânico no freio
	M22	defeito mecânico cortador de amostra
	M23	defeito mecânico posicionador cabeça móvel
	M24	defeito mecânico subvelocidade
	M25	defeito mecânico no deflector
	M26	defeito mecânico correia trailer
	M27	defeito mecânico no posicionamento dx
	M28	defeito mecânico na detetora de rasgo
	M29	aguardando cortar cabos de correia
	M30	aguardando soldar chute
	M31	aguardando cortar manchão
	M32	aguardando mudar contrapeso
	M33	desalinhamento
	M34	reparo mecânico no chute
	M35	ajuste na guia de material
	M36	troca de rolete
	M37	vulcanização
	M38	problema mancal do tambor
	M39	desgaste da guia de material
	M40	bloqueio por defeito mecânico
	M41	retirada de chapa do chute
	M42	troca de guia lateral/frontal
	M43	troca do rolamento

### 3.1.2 Coleta de dados de ciclo de trens – MRS

O minério de ferro da mineradora é transportado por ferrovia através da MRS, concessionária que controla, opera e monitora a Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal, interligando os estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais e São Paulo. São 1.643 quilômetros de malha ferroviária numa região que concentra aproximadamente 54% do produto interno bruto do Brasil e estão instalados os maiores complexos industriais do país.

O foco das atividades da MRS está no transporte ferroviário de minério de ferro, cujo rastreamento dos trens é atualizado em tempo real através de equipamentos modernos que operam por GPS (*Global Positioning System* – localização via satélite). As informações relativas à movimentação de trens para a mineradora podem ser acessadas através de um sistema de banco de dados denominado SISLOG. A área de abrangência da operação pode ser observada na FIG. 3.11.

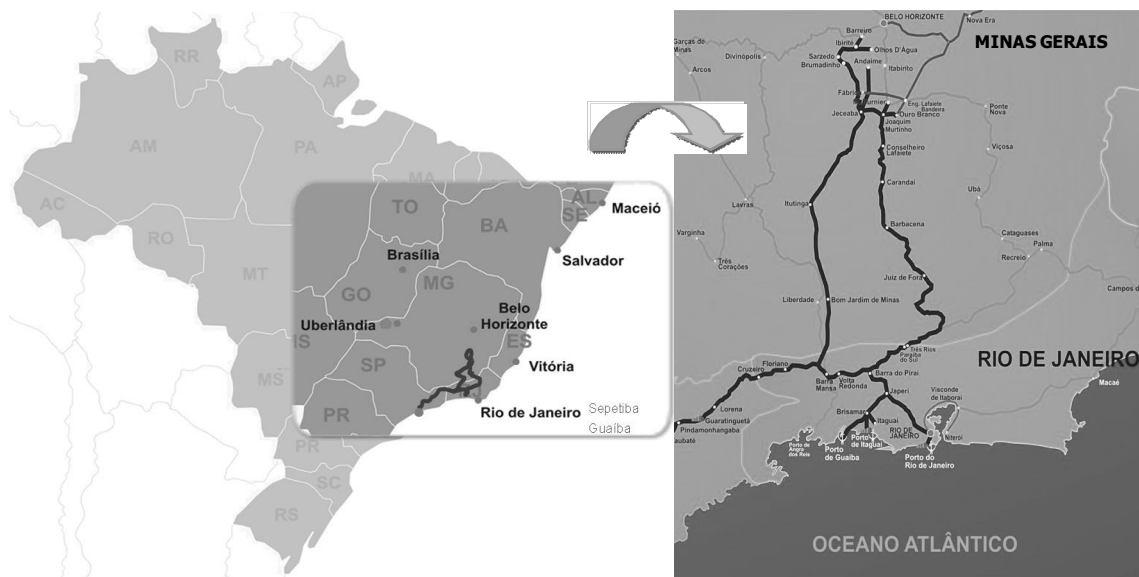


FIGURA 3.11 - Abrangência da operação

Em 2011, a MRS movimentou em torno de 150 milhões de toneladas, o que a torna a maior concessionária em termos de carga transportada, sendo o minério de ferro responsável pela produção de cerca de 80% deste total através de trens de ciclo. O ciclo dos ativos ferroviários é medido diariamente e consiste do somatório de tempo de quatro etapas básicas: trânsito vazio, carga, trânsito carregado e descarga, que se desdobram em doze subetapas para melhor representação do sistema (QUADRO 3.3).

QUADRO 3.3  
Descrição das etapas de ciclo

TOTAL	ETAPAS BÁSICAS	NO MODELO	ITEM	SUBETAPA	DESCRIÇÃO TEMPOS SUBETAPA
Ciclo	$\Delta T$ Vazio	Input	1	TTV	circulação vazio
			2	VVC	fila de vazios no trecho
			3	ACC	fila de vazios nas minas
	$\Delta T$ Carga	Input	4	ACM	antes da carga
			5	CAR	carga
			6	DCM	depois da carga
	$\Delta T$ Carregado	Input	7	TTC	circulação carregado
			8	VCC	fila de carregados no trecho
		Output	9	ADC	fila de carregados no porto
	$\Delta T$ Descarga	Input	10	ADM	antes da descarga
			11	DES	descarga
			12	DDM	depois da descarga

A etapa básica  $\Delta T$  Vazio refere-se ao tempo de circulação dos trens vazios e é compreendida pelo tempo de circulação dos trens e filas que podem ocorrer nos terminais de carga ou nos trechos ao longo da ferrovia. Esta etapa começa no início da circulação do trem no porto e termina com a chegada do trem nos terminais de carga.

A etapa  $\Delta T$  Carga se aplica à permanência do trem no processo de carga e é composta pelo tempo de manobra para posicionamento trem, o tempo de carga efetivo e o tempo de liberação do trem para circulação carregado.

A etapa básica  $\Delta T$  Carregado é atribuída ao tempo de circulação dos trens carregados e é compreendida pelo tempo de circulação dos trens e filas que podem ocorrer nos terminais de carga ou nos trechos ao longo da ferrovia. A mesma inicia com a circulação do trem nas minas e termina com a chegada do trem no porto.

A etapa  $\Delta T$  Descarga refere-se à permanência do trem no processo de descarga e compreende o tempo de manobra para posicionamento do trem, o tempo de descarga efetivo e o tempo de liberação do trem para circulação vazio.

No modelo, as etapas básicas  $\Delta T$  Vazio e  $\Delta T$  Carga serão retratadas de forma agrupada, enquanto as etapas  $\Delta T$  Carregado e  $\Delta T$  Descarga terão as subetapas detalhadas, uma vez que possuem relação direta com o objetivo do presente trabalho. Para uma melhor representação, o agrupamento das subetapas 1, 2, 3 bem como das subetapas 4, 5 e 6 são ilustrados conforme a FIG. 3.12.

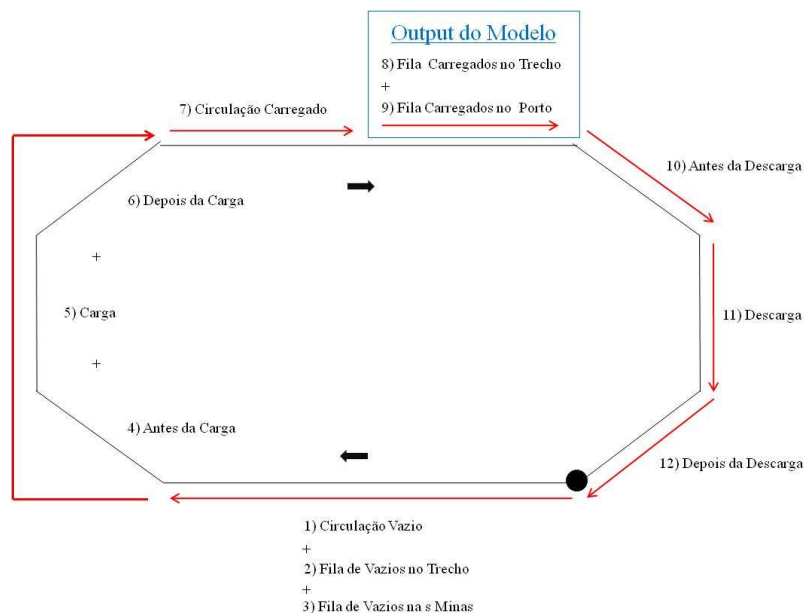


FIGURA 3.12 - Ilustração das etapas de ciclo

Por se tratar de uma concessão, os dados das etapas de ciclo são tratados estatisticamente de forma prévia, antes de serem repassados para a mineradora. A TAB. 3.1. apresenta um modelo de relatório de ciclo (exibido com números fictícios), que apresentam o ciclo médio anual dos fluxos de transporte da mineradora, que posteriormente serão utilizados como dados de entrada do modelo, denominados *inputs*:

TABELA 3.1  
Modelo Consulta SISLOG

Origem x Destino	Δt Vazio			Δt Carga			Δt Carregado			Δt Descarga			TOTAL
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	TTV	VVC	ACC	ACM	CAR	DCM	TTC	VCC	ADC	ADM	DES	DDM	
1	22:39	06:19	03:36	00:07	05:02	01:03	23:48	18:27	01:39	00:14	04:39	00:30	3,67
2	21:48	03:17	03:55	00:05	05:06	01:01	24:23	15:16	04:15	00:17	05:31	00:07	3,55
3	24:03	03:31	01:24	00:27	07:32	01:09	28:06	31:24	01:11	00:13	05:18	00:26	4,37
4	22:15	04:17	01:44	00:33	06:57	00:51	24:55	30:01	04:52	00:08	05:34	00:07	4,26
5	24:08	05:24	00:23	00:21	07:22	02:29	23:54	22:58	03:08	00:24	05:28	00:07	4,01

Fonte: MRS (2011)

O somatório das etapas 8 e 9 resultam na fila de trens carregados para descarga total, denominado “*Output do modelo*” e que servirá como base para calibração do modelo em relação aos dados reais disponibilizados pela concessionária de transporte ferroviário.

A cadeia em estudo possui cinco terminais de carga para um terminal de descarga. Para cada um destes fluxos serão atribuídos os valores correspondentes de ciclo, o peso médio carregado por trem em cada origem. Durante a construção do modelo também será respeitada a proporcionalidade do envio de trens para cada origem, denominada “*Mix de carga*”. A FIG. 3.13 permite observar o esquema dos fluxos de transporte de uma cadeia integrada mina-ferrovia-porto.

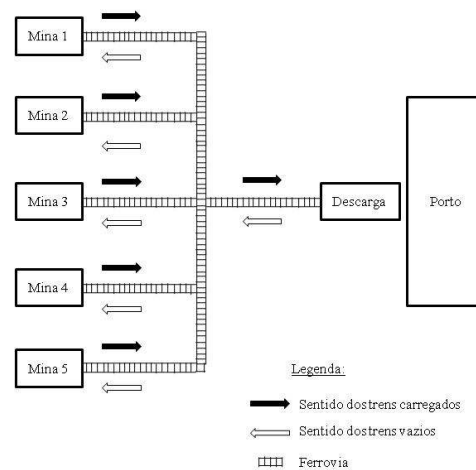


FIGURA 3.13 - Esquema do fluxo de transporte de uma cadeia integrada

Uma vez realizada a coleta dos dados, os passos que se seguem serão o tratamento, a estimativa dos parâmetros de distribuição e testes de aderência dos dados pertinentes ao sistema de descarga da mineradora, coletados ao longo do ano de 2011.

### 3.2 Tratamento de dados

Após a coleta de dados do SGOP, o primeiro passo da etapa de tratamento desses dados é plotar o histograma. Esta ferramenta simples é um excelente recurso para visualizar todos os dados coletados em apenas um gráfico, observando seu padrão de repetição. O primeiro passo foi extrair do sistema todas as paradas cadastradas e verificar a consistência da base gerada. A FIG. 3.14 ilustra o histograma de todas as paradas do sistema de descarga no ano de 2011, obtido através da ferramenta *Input Analyzer*.



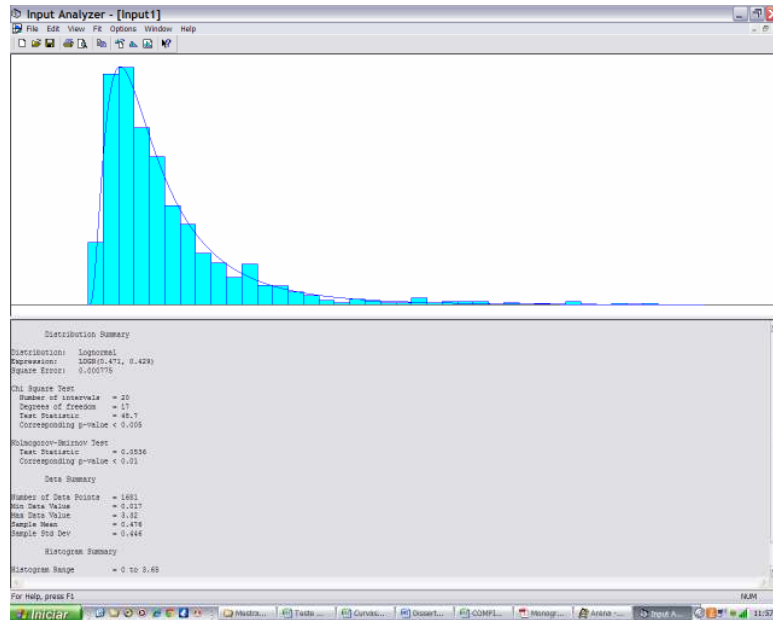


FIGURA 3.14 - Histograma de falhas do virador – 2011

Na FIG. 3.14, além de exibidas a quantidade de observações, os valores mínimo, máximo e médio da amostra, também são mostrados a curva de distribuição e o teste de aderência de Kolmogorov–Smirnov. A primeira análise do resultado do teste é em relação ao fator *Corresponding p value*, que se refere à base de dados. Valores inferiores a 0.1 são considerados como valores de fraca aderência, sugerindo a necessidade de um conjunto de dados melhor do que o analisado.

A funcionalidade que confere ao *Input Analyzer* a possibilidade de gerar a curva estatística mais aderente à distribuição dos dados de entrada é a ferramenta denominada *Fit All*, conforme apresentado na FIG. 3.15. A distribuição que apresentar o menor erro quadrado será exibida.

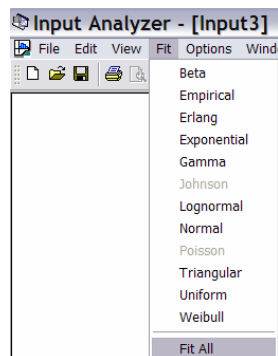


FIGURA 3.15 - Funcionalidade *Fit All* do *Input Analyzer*

A segunda análise do resultado do teste estatístico é em relação à distribuição proposta, cujo valor *Test Statistic K-S* deve ser comparado a um valor crítico tabelado para um dado nível de significância exibido no anexo deste trabalho (ANEXO A). Duas hipóteses são consideradas: H0 – os dados seguem a distribuição em hipótese; H1 – os dados não seguem a distribuição em hipótese. A hipótese nula H0 deve ser rejeitada caso o valor calculado for maior que o valor crítico tabelado.

A TAB. 3.2 apresenta o resumo do resultado estatístico obtido, onde se pode verificar a baixa aderência dos dados de entrada, em função do *Corresponding p value* inferior a 0,1 e a rejeição da hipótese H0, uma vez que o valor de K-S foi superior ao valor crítico tabelado ( $0,0536 > 0,0332$ ).

TABELA 3.2.  
Análise estatística das falhas

ITEM	RESULTADO
Distribution:	Lognormal
Expression:	LOGN(0.471, 0.429)
Square Error:	0.000775
Test Statistic K-S	= 0.0536
Corresponding p-value	< 0.01
Number of Data Points	1681
Min Data Value	= 0.017
Max Data Value	= 3.32
Sample Mean	= 0.476
Sample Std Dev	= 0.446
Histogram Range	= 0 to 3.65
Number of Intervals	40
K-S Tabelado	0,0332
Teste Aprovado?	FALSO

Com base nos resultados observados, não se pode analisar todo o conjunto de dados de forma única. Cada tipo de falha possui um comportamento diferente, com duração e tempos de reparo distintos, devendo ser analisada de forma independente. O GRAF. 3.1 apresenta a estratificação das atribuições das paralisações, segregados por tipo.

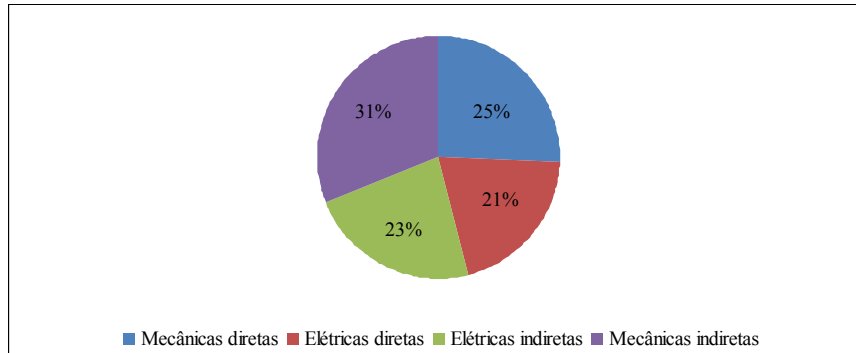


GRÁFICO 3.1 - Estratificação das atribuições das falhas  
 Fonte: SGOP (2011)

Através do GRAF. 3.1 conclui-se que, em termos de quantidade de ocorrências, as falhas mecânicas são mais representativas, sendo responsáveis por 56% do total de paralisações do sistema de descarga.

Para analisar cada tipo de falha de forma independente construiu-se no SGOP uma consulta para cada mês. Em cada uma destas consultas foram extraídas todas as paralisações do sistema em ordem cronológica, com o tempo de início e término de cada evento, segregados pelo código, que identifica o tipo de falha e associa ao equipamento que causou a paralisação.

As FIG. 3.16 a 3.19 apresentam os resultados estatísticos obtidos através da ferramenta *Input Analyzer* para cada grupo de falha mapeado. No item seguinte serão analisados os comportamentos estatísticos dos resultados de cada grupo de falha.

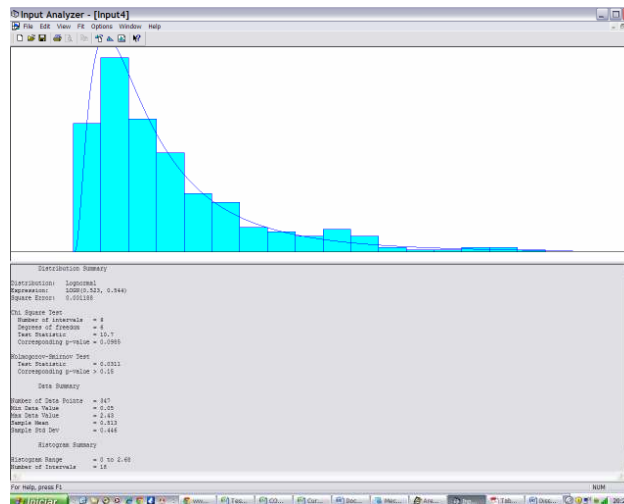


FIGURA 3.16 - Falhas elétricas diretas

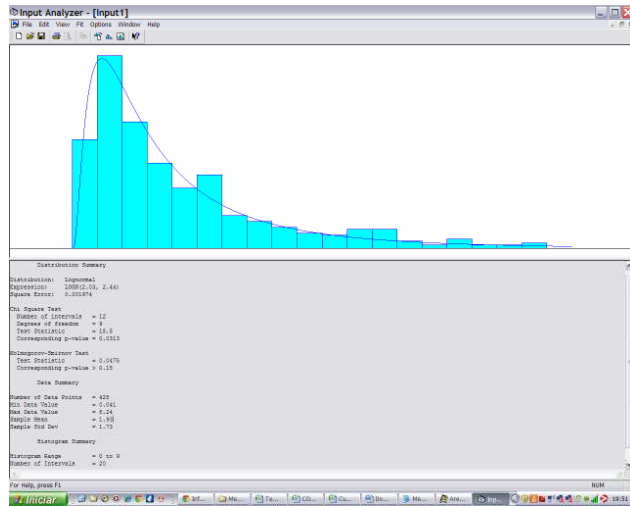


FIGURA 3.17 - Falhas mecânicas diretas

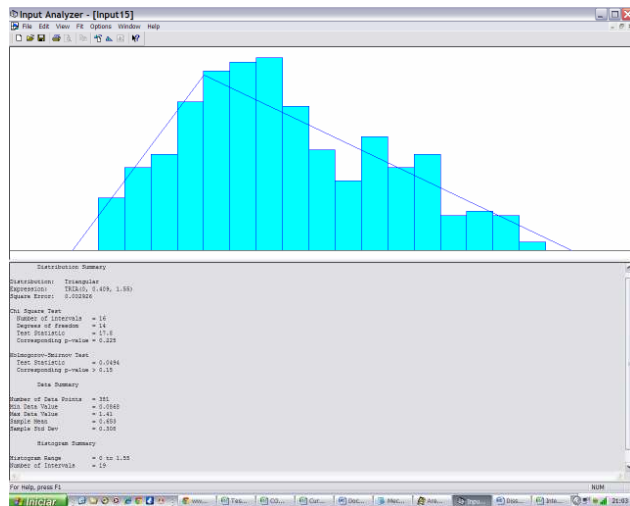


FIGURA 3.18 - Falhas elétricas indiretas

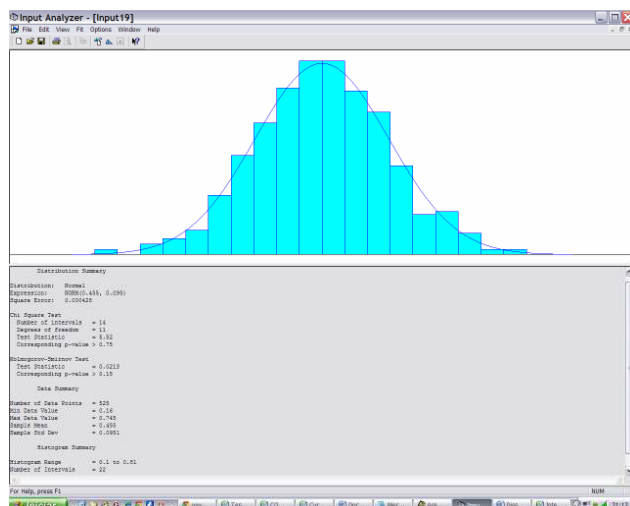


FIGURA 3.19 - Falhas mecânicas indiretas

### 3.3 Parâmetros de distribuição

Antes de estimar os parâmetros foi necessário definir a distribuição de probabilidade a ser utilizada. Existem várias opções de distribuição de probabilidade: normal, triangular, *weibull*, *lognormal*, *gama*, *erlang*, dentre outras. Para cada solução testada é calculado um valor para o erro. Após realizar este cálculo para todas as possíveis distribuições de probabilidade, o *Input Analyzer* ordena as soluções conforme o valor do erro.

Diferentes soluções foram encontradas para os dados apresentados, sugerindo comportamentos distintos para cada tipo de falha. Dentre elas estão a distribuição “normal”, que apresenta fenômenos simétricos em torno da média, a “triangular” que possui boas estimativas dos seus limites inferior e superior, bem como seu valor mais provável, e a *lognormal*, adequada principalmente quando a variável possui boa aderência a distribuições não simétricas. O QUADRO 3.4 apresenta as distribuições ajustadas para cada tipo de falha mapeada.

QUADRO 3.4  
Resultados estatísticos das falhas do virador

ITEM	Mecânicas diretas	Elétricas diretas	Elétricas indiretas	Mecânicas indiretas
Distribution:	Lognormal	Lognormal	Triangular	Normal
Expression:	LOGN(2.03, 2.44)	LOGN(0.523, 0.544)	TRIA(0, 0.409, 1.55)	NORM(0.455, 0.095)
Square Error:	0.001974	0.001188	0.002926	0.000428
Test Statistic K-S	= 0.0475	= 0.0311	= 0.0494	= 0.0213
Corresponding p-value	> 0.15	> 0.15	> 0.15	> 0.15
Number of Data Points	428	347	381	525
Min Data Value	= 0.041	= 0.05	= 0.0868	= 0.16
Max Data Value	= 8.24	= 2.43	= 1.41	= 0.745
Sample Mean	= 1.93	= 0.513	= 0.653	= 0.455
Sample Std Dev	= 1.73	= 0.446	= 0.308	= 0.0951
Histogram Range	= 0 to 9	= 0 to 2.68	= 0 to 1.55	= 0.1 to 0.81
Number of Intervals	20	18	19	22

Observa-se que todos os valores de *P-value* foram todos superiores à 0.10, que sugerem bases consistentes de dados. Conclui-se que, em média, os tempos de paradas do

sistema de descarga ocasionadas por falhas mecânicas diretas, elétricas diretas, elétricas indiretas e mecânicas indiretas são de respectivamente 1.93, 0.51, 0.65 e 0.45 horas.

### 3.4 Testes de aderência

Finalmente, testes de aderência foram realizados para tentar validar a qualidade dos ajustes de cada distribuição aos dados. Para isso, utilizaram-se a ferramenta *Input Analyzer* do *software* Arena, cuja limitação é de gerar relatório de testes de aderência somente para ajustes automáticos, que foi o caso do modelo em estudo.

Para cada distribuição apresentada, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov. O princípio deste teste baseia-se na comparação da curva da frequência cumulativa dos dados, com a função de distribuição teórica em hipótese. Quando as duas curvas se sobrepõem a estatística de teste é calculada através da máxima diferença entre ambas. A magnitude da diferença estabelece-se segundo a lei de probabilidade dessa estatística, que se encontra tabelada.

Se os dados experimentais se afastam significativamente do que é esperado segundo a distribuição em hipótese, então as curvas obtidas devem encontrar-se igualmente afastadas e, por um raciocínio análogo, se o ajustamento ao modelo hipotético é admissível, as curvas têm um delineamento próximo.

O QUADRO 3.5 apresenta os resultados das situações, onde se pode observar um bom ajustamento dos parâmetros, pois todos os valores calculados de K-S são menores do que os valores críticos tabelados para um nível de significância  $\alpha$  de 5%. Conclui-se que para todos os casos, a hipótese  $H_0$  não foi rejeitada.

QUADRO 3.5  
Teste de aderência

ITEM	Mecânicas Diretas	Elétricas diretas	Elétricas indiretas	Mecânicas indiretas
Distribution:	Lognormal	Lognormal	Triangular	Normal
Expression:	LOGN(2.03, 2.44)	LOGN(0.523, 0.544)	TRIA(0, 0.409, 1.55)	NORM(0.455, 0.095)
Square Error:	0.001974	0.001188	0.002926	0.000428
Test Statistic K-S	= 0.0475	= 0.0311	= 0.0494	= 0.0213
Corresponding p-value	> 0.15	> 0.15	> 0.15	> 0.15
Number of Data Points	428	347	381	525
K-S Tabelado	0,0657	0,0730	0,0697	0,0594
Teste Aprovado?	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO	VERDADEIRO

Não foram realizados testes de aderência para os dados da ferrovia, uma vez que os dados são tratados antes de serem repassados pela concessionária para a mineradora. Entende-se que os valores apresentados pela ferrovia de fato ocorreram e assim serão replicados no modelo. As curvas obtidas com os dados fornecidos pela concessionária encontram-se no ANEXO B dessa dissertação.

Outro ponto importante a ser destacado é que para os valores de MTTR, ou tempo médio de reparo, o modelo considerou os parâmetros de distribuição validados pelos testes de aderência, conforme itens 3.3 e 3.4. Para os valores de MTBF, ou tempo médio entre falhas, por questões de simplificação o modelo considerou a utilização de valores médios.

## 4 O MODELO DE SIMULAÇÃO

Para se analisar a operação ferroviária utilizou-se o método de simulação, sendo escolhido o *software* Arena, lançado em 1993 pela *Systems Modelling Corporation*, por ser um dos pacotes mais utilizados dentre os disponíveis no mercado, além de apresentar uma interface amigável e possuir um conjunto de ferramentas bastante úteis à análise estatística dos dados.

De acordo com Pegden *et al.* (1995), em geral os modelos de simulação são construídos para responder questões do tipo:

- Por que o sistema não funciona da maneira esperada? (Avaliação e previsão);
- Por que o sistema não funciona, e o que poderíamos fazer para ele funcionar? (Determinação e otimização de gargalos);
- Qual a melhor alternativa? (Comparação e análise de sensibilidade).

Neste capítulo são apresentados a modelagem conceitual, a lógica que dá suporte para a análise que o modelo irá fornecer, os conceitos básicos para elaboração de modelagem computacional e a construção do modelo propriamente dito.

### 4.1 Modelagem conceitual

A modelagem conceitual da lógica da cadeia integrada será feita a partir do ponto de vista dos trens de ciclo, conjunto fixo de vagões e locomotivas, que circulam vazios para os terminais de carregamento, são carregados de minério, circulam carregados até o porto onde seguem uma sequência de eventos até a sua liberação. Segue abaixo a lista de atividades realizadas no decorrer do modelo.

- Criar os trens de ciclo;
- sortear o terminal de carregamento;
- carregar os vagões de minério;
- circular com os vagões carregados;
- ocupar o trecho 1;
- deslocar e ocupar o trecho 2;
- liberar trecho 1;



- deslocar e ocupar o trecho 3;
- liberar trecho 2;
- ocupar o virador de vagões;
- deslocar e ocupar o trecho 4;
- descarregar 75% do trem;
- deslocar e ocupar o trecho 5;
- descarregar 25% do trem;
- liberar trecho 3;
- liberar Virador de Vagões;
- reter para inspeção do trem;
- liberar trecho 4;
- liberar trecho 5;
- sortear terminal de destino;
- sortear tipo de minério;
- retornar para o terminal de carga.

A sequência de atividades é melhor compreendida através do fluxograma apresentado na FIG. 4.1.

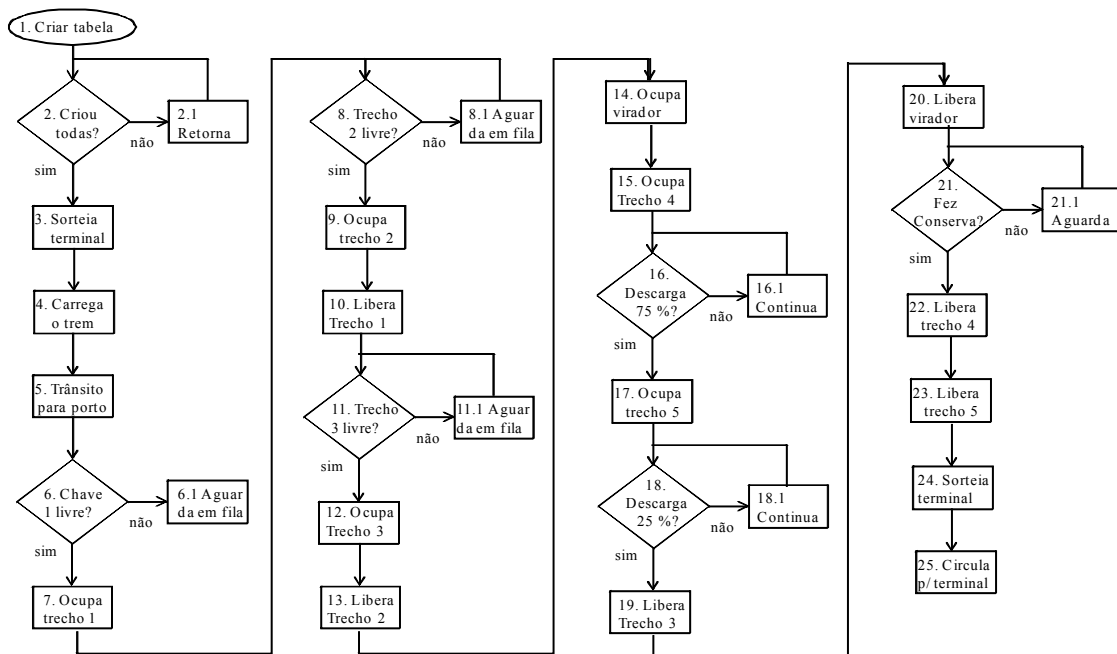


FIGURA 4.1 - Fluxograma de atividades do trem no modelo

## 4.2 Modelagem computacional

Antes de iniciar a construção lógica com os blocos do Arena, é preciso definir alguns elementos envolvidos no modelo. Estes elementos são classificados no *software* como:

- Entidades: cada trem de ciclo é uma entidade diferente. Os mesmos circulam pelo modelo em um circuito fechado no período de um ano;
- Atributos: para individualização, cada uma das entidades recebe os seguintes atributos: destino (indica a rota do trem) e tipo de minério (indicando sua capacidade);
- Recursos: há dois tipos de recursos – o virador e os trechos que compõem o porto. Cada recurso é individualizado por sua capacidade. No caso estudado, existe apenas um virador de vagões e todos os trechos são singelos, logo possuem capacidade com valor igual a um.

Para traduzir o modelo conceitual em um modelo computacional, segue-se o fluxograma da FIG. 4.1, substituindo cada atividade por um bloco correspondente no Arena. A seguir, uma descrição de cada substituição realizada:

- criar os trens de ciclo – bloco *Create* do *Template Basic Process*;
- sortear o terminal de carregamento – bloco *Assign* do *Template Basic Process*;
- carregar os vagões de minério – bloco *Assign*;
- circular com os vagões carregados – bloco *Route* do *Template Advanced Transfer*;
- ocupar o trecho 1 – bloco *Sieze* do *Template Advanced Process*;
- deslocar e ocupar o trecho 2 – bloco *Route*, em seguida bloco *Sieze*;
- liberar trecho 1 – bloco *Release*, do *Template Advanced Process*;
- deslocar e ocupar o trecho 3 – bloco *Route*, em seguida bloco *Sieze*;
- liberar trecho 2 – bloco *Release*;
- ocupar o virador de vagões – bloco *Sieze*;
- deslocar e ocupar o trecho 4 – bloco *Route*, em seguida bloco *Sieze*;
- descarregar 75% do trem – bloco *Delay* do *Template Advanced Process*;
- deslocar e ocupar o trecho 5 – bloco *Route*, em seguida bloco *Sieze*;
- descarregar 25% do trem – bloco *Delay*;

- liberar trecho 3 – bloco *Release*
- liberar virador de vagões – bloco *Release*;
- reter para inspeção do trem – bloco *Delay*;
- liberar trecho 4 – bloco *Release*;
- liberar trecho 5 – bloco *Release*;
- sortear terminal de destino – bloco *Assign*;
- sortear tipo de minério – bloco *Assign*;
- retornar para o terminal de carga – bloco *Route*.

Em seguida será descrita a construção do modelo.

### 4.3 Criar entidades – Trens de ciclo

Para criar as entidades até o limite desejado, no modelo é utilizado um artifício que duplica as entidades (*Separate*) do *Template Basic Process*. À medida que as entidades vão entrando no modelo, a entidade duplicada retorna até que o limite estabelecido seja atingido, encaminhado pelo módulo *Decide* do *Template Basic Process* para o módulo *Dispose* do *Template Basic Process*, eliminando a entidade duplicada.

O módulo *Assign* do *Template Basic Process* garante a individualidade de cada entidade que entra no sistema, bem como sorteia o terminal de carga para o qual a entidade deve se dirigir através de parâmetros pré-definidos. A lógica da geração de trens é apresentada na FIG. 4.2.

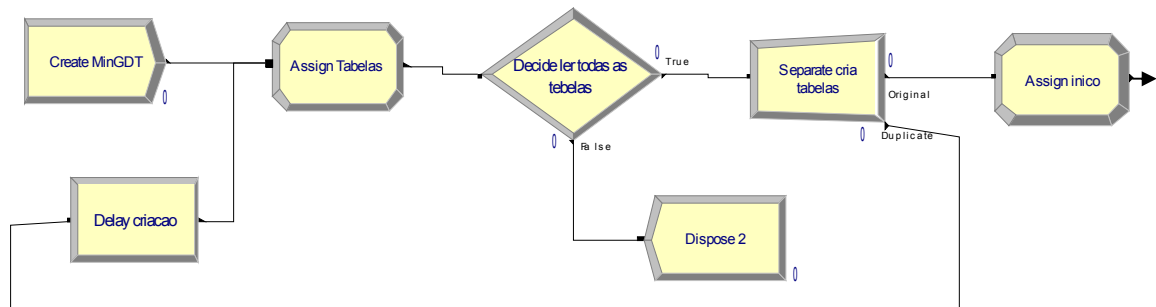


FIGURA 4.2 - Lógica de geração de trens

#### 4.4 Terminais de carga

Os terminais de carga são representados no modelo pelo módulo “Estação” (*Station*) do *Template Advanced Transfer*. A operação de carga é representada pelo módulo “Atraso” (*Delay*) do *Template Advanced Process*. Por uma questão de simplificação, não foram criados recursos associados aos terminais de carga. Entende-se que não são gargalos operacionais e podem absorver mais de um trem de forma simultânea, com tempos de carga distintos para cada terminal.

O processo de medição de tempos e intervalos é possível através do módulo “Gravação” (*Record*) do *Template Basic Process*. Nesta etapa do processo são medidos os tempos de carga e o tempo de circulação dos trens vazios. O módulo “Atribuir” (*Assign*) marca o início de viagem do trem carregado em direção ao porto, conforme FIG. 4.3.

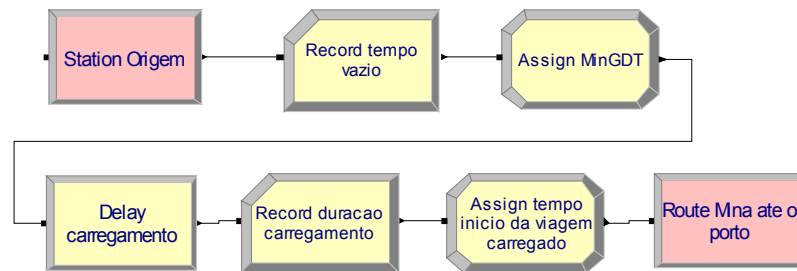


FIGURA 4.3 - Lógica do carregamento do trem

#### 4.5 Entrada dos trens no porto

Uma vez na *Station Porto*, as entidades devem percorrer o trajeto até chegar ao virador de vagões. Ao passarem por um novo módulo *Assign*, é registrado o instante “tnow” (*time now*), em que a entidade passa pelo bloco, possibilitando o cálculo do tempo de trânsito carregado através de uma funcionalidade de cálculo de intervalo do módulo *Record*. Em seguida, a entidade ocupa o trecho de entrada do porto, através do bloco “Ocupar” (*Sieze*) do *Template Advanced Process*, nomeado “Porto\_chave1”. Este recurso é único pelo fato de ser uma linha singular e impede dupla ocupação em caso de simultaneidade. Os recursos só podem ser ocupados caso estejam liberados.

Importante ressaltar que para cada *Route* é atribuído um tempo de percurso. Ao final do segundo trecho percorrido a entidade libera o primeiro trecho ocupado, habilitando sua ocupação por uma nova entidade. Esta lógica é ilustrada conforme FIG. 4.4.

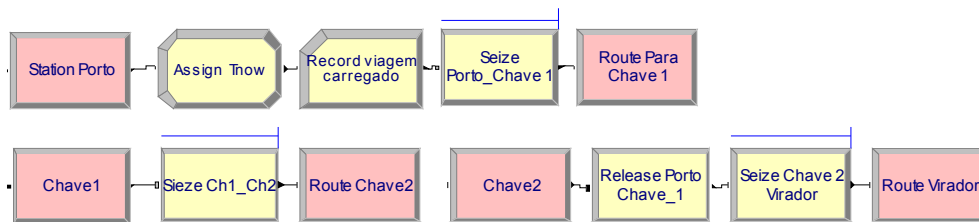


FIGURA 4.4 - Lógica de entrada no porto

O próximo passo é a ocupação do terceiro trecho que marca a entrada da entidade no local onde ocorrerá a descarga do trem.

#### 4.6 A descarga

O início da permanência da entidade em descarga no virador é registrado através de novo bloco *Assign*. Acompanhando a sequência lógica dos *templates*, em seguida é realizada a liberação do trecho 2 e a ocupação do recurso “Virador”, quando se inicia o processo de descarga do trem e ocupação dos trechos 3 e 4 do porto. É importante destacar o fato de que o quarto trecho só é ocupado se completar 75% da descarga.

Ao se completar a descarga o terceiro trecho é liberado, bem como o recurso “Virador”. O tempo de permanência de cada trem em descarga possui relação inversa à taxa de operação do equipamento, que pode ser interrompida por falhas elétricas e mecânicas, diretas ou indiretas.

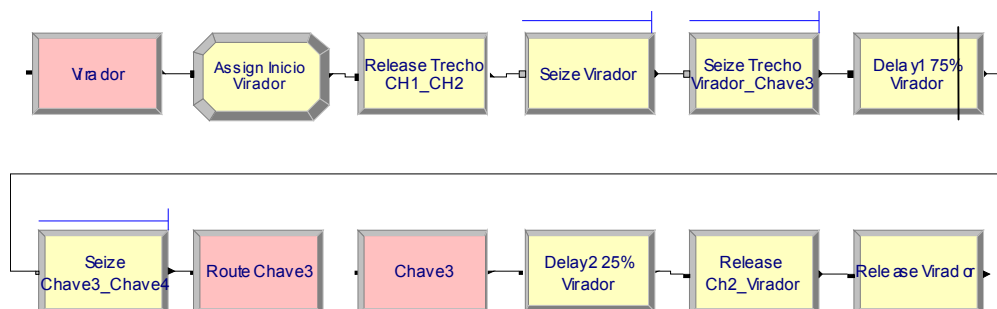


FIGURA 4.5 - Lógica do modelo para as atividades no virador

O item 4.7 descreve como associar uma falha à determinado recurso em modelagem computacional, que pode facilmente ser adaptada para outras realidades operacionais, de acordo com a necessidade.

## 4.7 O módulo de falhas

A configuração das falhas usadas no modelo é feita no módulo de dados *Failure*, localizado no *Template Advanced Process*. Dentro de *Failure* devem ser especificados o tipo de falha, o tempo entre falhas, ou MTBF (*mean time between failure*) e o tempo de reparo, ou MTTR (*mean time to repair*). A caixa de diálogo de *Failure* está apresentada abaixo (FIG. 4,6), sendo o MTBF representado pelo *up time* e o MTTR representado pelo *down time*, ambos terão maior detalhamento no item 5.2 (Cenários).

Failure - Advanced Process							
	Name	Type	Up Time	Up Time Units	Down Time	Down Time Units	Uptime in this State only
1	Parada do virador tipo 01	Time	v_parada de virador(1,1)	Minutes	v_parada de virador(1,2)	Minutes	
2	Parada do virador tipo 02	Time	v_parada de virador(2,1)	Minutes	v_parada de virador(2,2)	Minutes	
3	Parada do virador tipo 03	Time	v_parada de virador(3,1)	Minutes	v_parada de virador(3,2)	Minutes	
4	Parada do virador tipo 04	Time	v_parada de virador(4,1)	Minutes	v_parada de virador(4,2)	Minutes	

Double-click here to add a new row.

FIGURA 4.6 - Lógica do módulo de falhas

Feita a configuração da falha, esta deve ser referenciada dentro do módulo *Resource*, associando, assim, a falha com o recurso correspondente, no caso o virador de vagões. A janela de diálogo para inclusão das falhas no módulo de dados *Resource* está apresentada a seguir (FIG. 4.7).

The image shows a screenshot of the 'Resource - Basic Process' dialog box. The main window displays a table of resources with columns for Name, Type, Capacity, Busy / Hour, Idle / Hour, Per Use, StateSet Name, Failures, and Report Statistics. A 'Resource' dialog box is open, showing configuration for 'R Virador' (Fixed Capacity, Capacity: 1, Costs: 0.0). A 'Failures' dialog box is also open, showing configuration for 'Parada do virador tipo 01' (Failure Rule: Preempt). The 'Failures' dialog has buttons for 'Add...', 'Edit...', and 'Delete'.

FIGURA 4.7 - Detalhe do módulo de falhas

Importante observar que o Arena possui três alternativas possíveis para lidar com uma falha que aconteça durante a ocupação do recurso:

- *Preempt*: o recurso irá interromper o processo, sofrer o tempo de falha e quando voltar a funcionar terminará o processo a partir do ponto onde foi interrompido;
- *Wait*: o recurso não interrompe o trabalho enquanto estiver ocupado por uma entidade. Quando uma falha acontece, este espera que o processo termine e só então entra no estado *Failed*, transcorrendo o tempo de falha normalmente.
- *Ignore*: o recurso falha mesmo quando ocupado pela entidade, mas o tempo de falha transcorre junto com o tempo de processo, que é encerrado normalmente.

No caso em estudo apenas serão utilizadas falhas do tipo *Preempt*.

#### 4.8 Saída do porto e retorno dos trens para terminais de carga

Ao término de cada descarga, quatro módulos *Record* possibilitam o cálculo dos tempos de descarga, permanência no porto, ciclo dos trens e do volume total descarregado. Estas medições são de suma importância para a calibração e consequente validação do modelo proposto. Também são inseridos quatro módulos *Assign*: os dois primeiros registram o *now* para novas medições de circulação dos trens vazios e ciclo total; o terceiro realiza a soma acumulada da capacidade de transporte de cada entidade e o quarto sorteia o próximo terminal de destino entidade, finalizando o ciclo fechado do modelo, conforme FIG. 4.8.

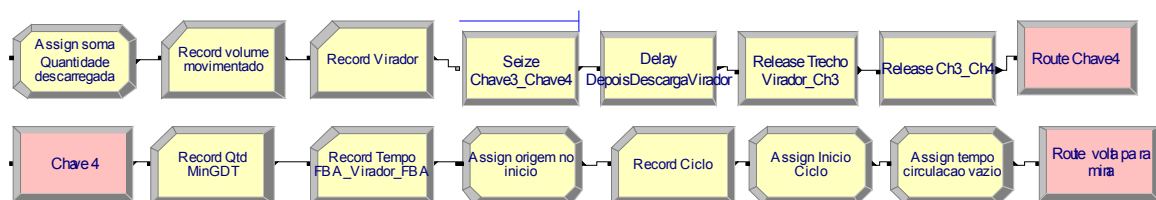


FIGURA 4.8 - Lógica de saída do trem após descarga

#### 4.9 Fila total

A fila total é somatório das parcelas aguardando circulação nos trechos singelos e descarga. Como simplificação o modelo descarta outras variáveis que possam impactar no processo de descarga, como avarias da ferrovia e qualidade do minério, sendo considerados desprezíveis.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Validação do modelo

A validação do modelo de simulação é um passo bastante importante sendo, de acordo com Pegden *et al.* (1995), o processo pelo qual pretende-se alcançar um nível aceitável de confiança nas premissas adotadas no modelo. São validadas comparando-se os resultados obtidos com as correspondentes medidas reais do sistema através dos testes estatísticos apropriados (BOTTER, 2002).

Dado a disponibilidade de informações diárias para o ano de 2011 sobre as falhas do virador de vagões e o ciclo dos trens, validou-se o modelo a partir dos mesmos. Uma vez que a demanda de minério é praticamente constante ao longo do ano, não sofrendo o efeito da sazonalidade, a escolha deste período para validação do modelo mostra-se bastante apropriada.

As distribuições obtidas no capítulo 3 foram utilizadas como dados de entrada tanto para validação do modelo quanto na geração dos cenários alternativos, que serão apresentados posteriormente. Foram realizadas 50 replicações, com duração de 375 dias e eliminação dos dados de uma fase de aquecimento *warm up* de 10 dias, período necessário para colocar as entidades em regime em função do ciclo dos ativos, totalizando um período útil de simulação de 365 dias, que correspondem ao ano de 2011, conforme FIG. 5.1.

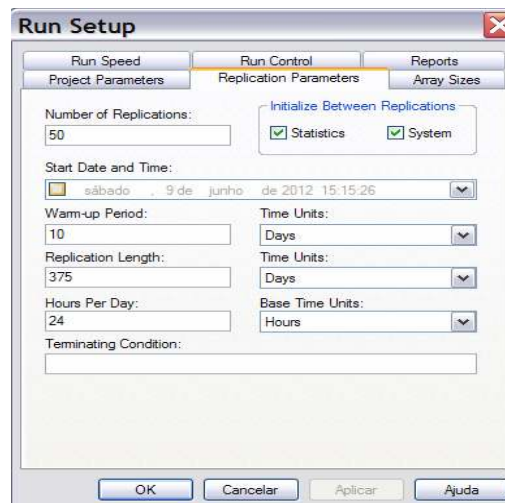


FIGURA 5.1 - Configurações dos parâmetros para a simulação do modelo



Os resultados gerados pelo modelo, quantidade de minério descarregada e fila de trens para descarga, foram analisados e comparados com os valores reais.

#### 5.1.1 Quantidade de minério descarregada

No simulador, a quantidade total de minério descarregada é obtida através do módulo *Record*, cuja funcionalidade permite acumular os valores transportados por cada trem de ciclo que passa pelo virador de vagões, conforme detalhado no capítulo 4. Para refinar a análise da quantidade de minério descarregada obtida através do simulador em relação aos valores reais foram criados dois novos parâmetros, uma vez que:

$$\sum \text{Tonelagem descarregada} = \sum \text{Número de descargas} \times \text{Tonelagem por trem}$$

Onde “ $\sum$  Número de descargas” é o somatório da quantidade de descargas realizadas e “Tonelagem por trem” refere-se à tonelagem média transportada por cada trem de ciclo, ambos no período analisado. O objetivo é garantir que não exista grande discrepância entre os parâmetros para se chegar ao valor total da tonelagem descarregada simulada.

Por questões de sigilo industrial, os valores absolutos não serão divulgados. Como padrão, os resultados de calibração serão ilustrados em gráficos de colunas agrupadas, sendo a coluna da esquerda o valor real, sempre representado como 100%, e a coluna da direita o valor da variação percentual do resultado simulado referente ao item analisado.

Nesse sentido, pode ser observado através do GRAF. 5.1 que a tonelagem descarregada simulada apresentou valor muito próximo do realizado em 2011, sendo superior em apenas 0,9%, comprovando a boa aderência do modelo. Esse resultado foi obtido em função das variações: uma delas superior em 0,6% do número de descargas, e outra em 0,2% de tonelagem média transportada por cada trem:

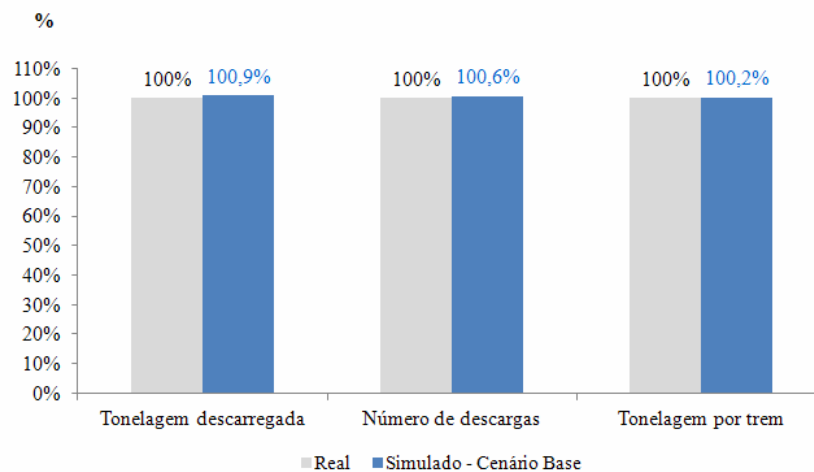


GRÁFICO 5.1- Validação da tonelagem descarregada

Como a operação analisada é de larga escala, da ordem de dezenas de milhões de toneladas, a boa aderência apresentada é de suma importância, pois baixos percentuais de desvios podem representar grandes diferenças em valores absolutos. O efeito da maior tonelagem descarregada nas demais variáveis será analisado a seguir.

### 5.1.2 Fila de trens para descarga

Para refinar a análise de validação da fila de trens para descarga obtida através do simulador em relação aos valores reais foram incluídos dois novos parâmetros, sendo eles o “Ciclo” dos trens e o “Tempo de permanência” dos trens em descarga, cujos resultados serão exibidos em gráfico de colunas agrupadas, conforme descrito no item anterior.

Fila de trens para descarga e tempo de permanência são partes integrantes do ciclo, logo o objetivo da inclusão destes parâmetros será avaliar suas discrepâncias em relação ao ciclo total simulado, que deve ser aderente ao realizado de 2011.

Observa-se pelo GRAF. 5.2 que o valor simulado do tempo de permanência médio dos trens em descarga apresentou variação de 0,2% em relação ao realizado, mesmo índice obtido pela “Tonelagem por trem” apresentado no item anterior. A lógica do modelo processou como os trens tiveram maior tonelagem, ocuparam por mais tempo o virador de vagões.

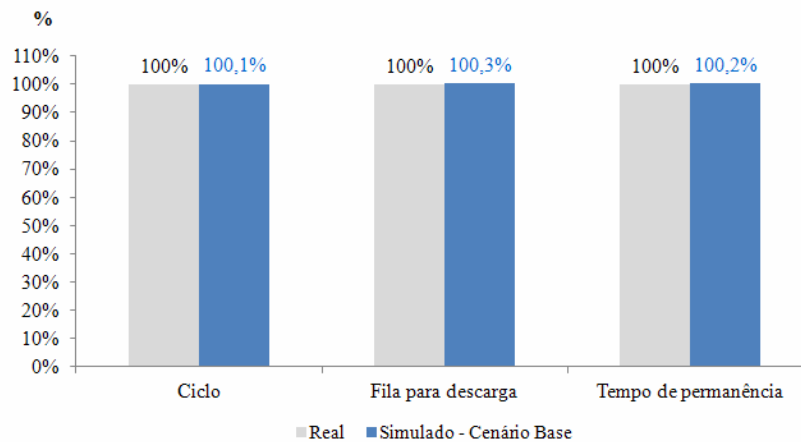


GRÁFICO 5.2 - Validação fila para descarga

A fila de trens obteve resultado simulado superior em 0,3% do que o realizado, porém quando se compara ao ciclo total esta diferença reduz para 0,1%, uma vez que não sofre influência de variação de valores das demais etapas do ciclo, como tempo de circulação de trens vazios e carregados, bem como o tempo de carregamento.

No conjunto, todos os parâmetros analisados possuíram boa aderência com a realidade, com variações inferiores a 1%. Estas análises garantem que os dados de entrada são confiáveis e podem ser utilizados como base para criação de cenários de redução de falhas do virador e consequente aumento de tonelagem descarregada e fila de trens para descarga, objetivo deste trabalho.

## 5.2 Cenários

Costumo dizer que quando você pode medir o que você está falando, e expressá-lo em números, você sabe algo sobre isso, mas quando você não pode expressá-lo em números, seu conhecimento é de um tipo escasso e insatisfatório. Lord Kelvin, palestra sobre "Unidades elétricas de medição" (03 de maio de 1883), publicado no *v. Palestra Popular*, I, p. 73.

É de máxima importância medir corretamente a operação dos equipamentos e a forma como contribuem para o desempenho das empresas, pois deles dependem vários aspectos importantes que, em última instância, determinam o seu sucesso ou mesmo a

sobrevivência do negócio. O desempenho dos equipamentos tem relação direta com a produtividade dos processos, influenciando nos custos e na qualidade dos serviços prestados.

Existem na literatura diversos trabalhos sobre as origens evolutivas das técnicas de medição de desempenho dos equipamentos, como Guelbert (2004) e Gaino (2007). Neste trabalho, a metodologia utilizada será a OEE – *Overhaul Equipment Effectiveness*, ou Eficácia Global do Equipamento, desenvolvido por Seichii Nakajima em meados dos anos 1980.

O OEE teve origem no TPM – *Total Productive Maintenance*, sendo parte integrante do TPS – *Toyota Production System*. Foi desenvolvido como meio de quantificar não apenas o desempenho dos equipamentos, mas também como métrica da melhoria contínua dos equipamentos e processos produtivos. Com a adoção dos conceitos do TPS por inúmeras empresas japonesas e com o desenvolvimento do *Lean Manufacturing* no ocidente, o OEE tornou-se referência mundial para medição do desempenho dos equipamentos nas indústrias. Este indicador mede o desempenho de equipamentos de forma “tridimensional”, pois considera:

- disponibilidade: percentual de tempo útil que o equipamento tem para funcionar/produzir;
- eficiência: percentual entre a produção real e a capacidade de produzir à cadência nominal;
- qualidade: percentual de unidades produzidas que cumpriram todos os requisitos e exigências de qualidade.

Neste trabalho apenas será analisada a primeira dimensão da OEE, que está relacionada à disponibilidade; isto é, o tempo disponível para produção durante o qual a operação não é afetada por um mau funcionamento, ou outro acontecimento não planejado, que provoque a sua paralisação. Assim sendo, a disponibilidade é obtida pelo seguinte cálculo:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{\sum \text{Horas disponíveis}}{\sum \text{Horas calendário}}$$

onde,

$$\text{Horas disponíveis} = \sum \text{Horas calendário} - \sum \text{Horas de manutenção}$$

E,

$$\sum \text{Horas de manutenção} = \sum \text{MO} + \sum \text{MP} + \sum \text{MC} + \sum \text{IM}$$

Onde:

- MO – Manutenção de oportunidade;
- MP – Manutenção preventiva;
- MC – Manutenção corretiva;
- IM – Implantação melhorias.

Os valores de MO, MP e IM não serão variados. Por se tratar de um sistema que opera com fila de trens para descarga, ociosidades não são desejáveis, por isso os valores de MO tendem a ser os menores possíveis, não tendo impactos relevantes no sistema. Para os valores de IM e MP foram feitas simplificações, uma vez que previsões estabelecidas para estes parâmetros não seriam assertivas, por isso não sofreram alterações. Apenas os valores de manutenção corretiva e foco do modelo serão alterados para avaliar a disponibilidade do virador de vagões.

Através dos resultados estatísticos demonstrados no capítulo 3, é possível calcular o MTBF e MTTR paradas de manutenção corretiva do virador, sendo que o primeiro indicador mede o intervalo médio entre as falhas e o segundo o tempo médio de reparo, ambos obtidos através das expressões:

$$MTBF = \frac{\sum \text{Horas de Operação do Virador}}{\sum \text{Número de paradas}}$$

$$MTTR = \frac{\sum \text{Horas paradas}}{\sum \text{Número de paradas}}$$

A TAB. 5.1 apresenta os valores reais de MTBF e MTTR, obtidos via sistema durante o ano de 2011. Ao todo foram 1.681 paralisações corretivas que totalizaram 1.377 horas de paradas do sistema de descarga. Os valores foram convertidos em minutos para compatibilização de unidades com o modelo:

TABELA 5.1  
MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário Base

TIPO DE PARADA	$\sum$ QTDE. FALHAS	MTBF (HORAS)	MTBF (MINUTOS)	$\sum$ HORAS PARADAS	MTTR (HORAS)	MTTR (MINUTOS)
Elétrica direta	428	11	634	220	0,51	31
Mecânica direta	347	13	782	670	1,93	116
Elétrica indireta	381	12	712	249	0,65	39
Mecânica indireta	525	9	517	239	0,46	27
Total	1.681			1.377		

Baseando-se na análise desse quadro foram propostos os cenários de melhoria. Observa-se que tanto o virador de vagões quanto os equipamentos à ele interligados apresentaram falhas mecânicas e elétricas que impactaram na produção de 2011, tendo as falhas indiretas ocorrido em maior quantidade de 54%, porém com menor tempo médio de reparo, haja vista índice de 1,93 horas das falhas mecânicas diretas.

Estas ponderações serão consideradas na elaboração dos cenários onde serão adotados baixos percentuais de melhoria em função da escala do negócio. A expectativa é que os mesmos embasem a decisão sobre a estratégia que trará melhores benefícios para a mineradora, através de um plano para melhoria de todas as falhas do sistema, focada nos problemas do virador, nos problemas dos equipamentos interligados ou específica para a falha mais representativa.

Assim sendo, serão apresentados quatro propostas de cenários:

- 1) redução de 5% da quantidade total de paralisações corretivas;
- 2) redução de 5% da quantidade de paralisações corretivas diretas;
- 3) redução de 10% da quantidade de paralisações corretivas indiretas;
- 4) redução de 1 hora do MMTR das paralisações corretivas mecânicas diretas.

Na análise de todos os cenários, se considerou como inalteradas as distribuições dos tempos de circulação dos trens, as matrizes de origem e destino das entidades, a *mix* de produtos transportados. O objetivo é garantir que influências marginais no processo não comprometam a correta interpretação dos resultados obtidos através dos cenários

Outro ponto relevante é que os resultados dos cenários serão comparados em relação aos valores simulados no item 5.1, denominado “Cenário Base”, eliminando as dispersões mensuradas em relação aos valores reais. Também foram mantidos os números de replicações e o *warm up* de 10 dias, resultando um período útil de simulação de 8.760 horas, correspondente a um período de um ano, conforme apresentado no capítulo 3. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos e ao final será feita uma avaliação complementar do impacto da redução do ciclo no custo de transporte ferroviário, baseado nos recursos alocados.

### 5.2.1 Cenário 1

O cenário 1 considerou a redução de 5% da quantidade de paralisações corretivas. Esta hipótese pode ser viabilizada pela mineradora através da elaboração de um plano de ação de melhoria global, cuja abrangência incorpore o virador de vagões e todos os equipamentos a ele interligados, devido à melhoria das paradas corretivas tanto diretas quanto indiretas.

A redução da quantidade de falhas em 5% é apresentada na TAB. 5.2, onde se pode observar a redução do valor original de 1.681 para 1.597 ocorrências. É importante ressaltar que neste cenário se manteve inalterado o MTTR, logo é tido como premissa que a quantidade de eventos reduziu em 5%, mas não o tempo médio de reparo:

TABELA 5.2  
MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 1

TIPO DE PARADA	$\Sigma$ QTDE. FALHAS	MTBF (HORAS)	MTBF (MINUTOS)	$\Sigma$ HORAS PARADAS	MTTR (HORAS)	MTTR (MINUTOS)
Elétrica direta	407	11	667	209	0,51	31
Mecânica direta	330	14	823	636	1,93	116
Elétrica indireta	362	12	750	236	0,65	39
Mecânica indireta	499	9	544	227	0,46	27
Total	1.597			1.308		

Com os resultados do Cenário 1 pode-se observar que a tonelage transportada por trem não foi alterada, ou seja, considerou-se que a variação da tonelage descarregada seja apenas em função da variação do número de descargas realizadas, haja vista o aumento da disponibilidade do equipamento de descarga. O GRAF. 5.3 apresenta o incremento de 2,1% de descargas realizadas em relação ao cenário base ao se reduzir em 5% a quantidade total de paralisações corretivas.

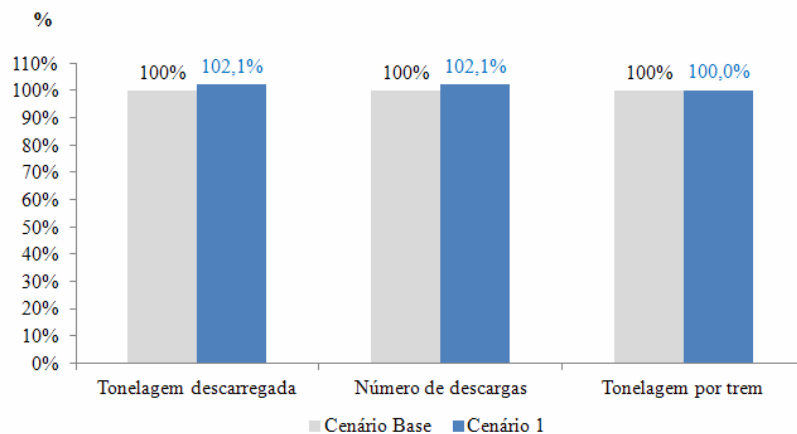


GRÁFICO 5.3 - Variação da tonelage descarregada – Cenário 1

Além disso, foi avaliada a variação do ciclo total e duas importantes etapas do processo de descarga, sendo elas a fila para descarga e a ocupação do recurso virador de vagões. As demais etapas do ciclo, como tempo de carga e tempo de circulação dos trens, não serão contempladas por esta análise pelo fato de possuírem impactos considerados marginais no processo.

Nesta análise é possível observar, através do GRAF. 5.4, a relação não linear entre a redução da quantidade de paralisações, a redução da fila para descarga, o tempo de permanência em descarga e o ciclo dos trens. Enquanto o índice de redução de fila foi de 9,4%, quase o dobro dos 5% de redução da quantidade de paralisações corretivas, o tempo de permanência médio dos trens em descarga reduziu em 2,5%. O somatório dos ganhos obtidos nestas etapas implicou na redução do ciclo total de 2,2%, pois são partes integrantes da composição do ciclo total.

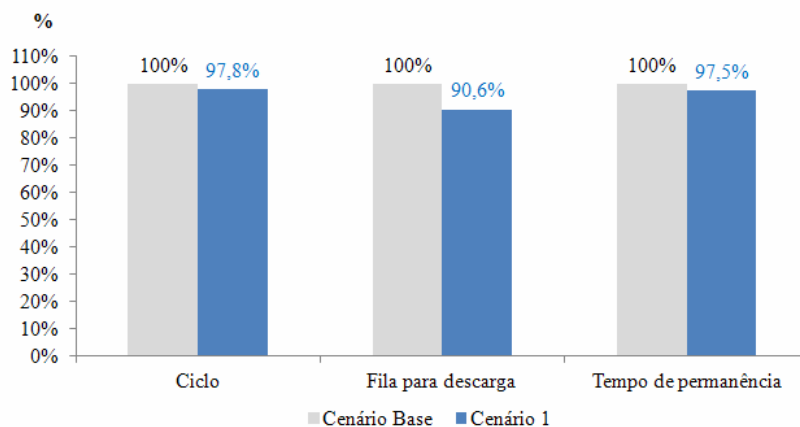


GRÁFICO 5.4 - Variação do ciclo e etapas – Cenário 1



A análise deste primeiro cenário demonstrou resultados satisfatórios. Foi comprovado que há uma forte influência não linear da disponibilidade do equipamento de descarga na fila de trens para descarga. Os resultados apontaram que a redução de 5% da quantidade global de manutenções corretivas do virador de vagões implicou em uma redução média de 2,5% do tempo de permanência, 9,4% da fila para descarga e 2,2% do ciclo total dos trens.

### 5.2.2 Cenário 2

Para a construção do segundo cenário foi realizada uma análise prévia da tabela de MTBF e MTTR, onde se observa que o somatório de horas paradas do virador por impactos diretos, ligados diretamente ao virador de vagões seja por falhas mecânicas ou elétricas, representam 63% do total de horas paradas para corretivas. Este fato implicou na elaboração de um cenário cujo plano de ação de melhorias esteja focado nas falhas diretas, cuja abrangência incorpore apenas as falhas ligadas ao virador de vagões.

A redução da quantidade de falhas diretas em 5% é apresentada na TAB. 5.3, onde se pode observar a redução do valor original de 775 para 737 ocorrências. O objetivo deste cenário é comparar a eficiência de um plano de melhoria focado, com esforços concentrados, em relação a um plano de melhoria genérico, com maior escopo de equipamentos.

TABELA 5.3  
MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 2

TIPO DE PARADA	$\Sigma$ QTDE. FALHAS	MTBF (HORAS)	MTBF (MINUTOS)	$\Sigma$ HORAS PARADAS	MTTR (HORAS)	MTTR (MINUTOS)
Elétrica direta	407	11	667	209	0,51	31
Mecânica direta	330	14	823	636	1,93	116
Elétrica indireta	381	12	712	249	0,65	39
Mecânica indireta	525	9	517	239	0,46	27
Total	1.642			1.332		

Neste cenário se observa, através do GRAF. 5.5, um incremento de 1,1% na tonelagem descarregada em relação ao cenário base, porém praticamente metade (52%) do ganho de 2,1%, conforme demonstrado através do GRAF. 5.3 do primeiro cenário.

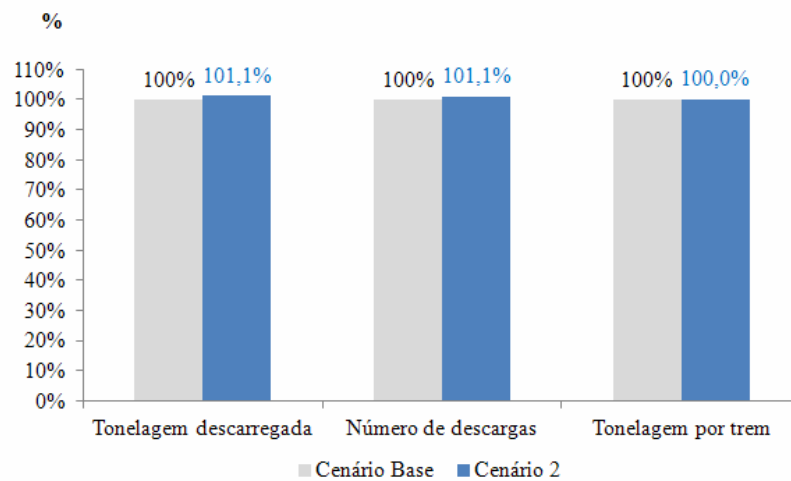


GRÁFICO 5.5 - Variação da tonelagem descarregada – Cenário 2

Esta tendência não é confirmada quando se compara as reduções obtidas no tempo médio de permanência dos trens em descarga. O GRAF. 5.5 apresenta o índice de redução de 2,0% do tempo de permanência, que equivale a 80% dos 2,5% obtidos no primeiro cenário. Esta relação pode ser justificada pelo impacto do alto tempo de reparo das corretivas mecânicas diretas. O tempo de fila apresentou redução de 6,3% e ciclo total de 1,2% em relação ao cenário base, ou respectivamente 56% e 54% dos resultados obtidos no primeiro cenário, como se observa no GRAF. 5.6.

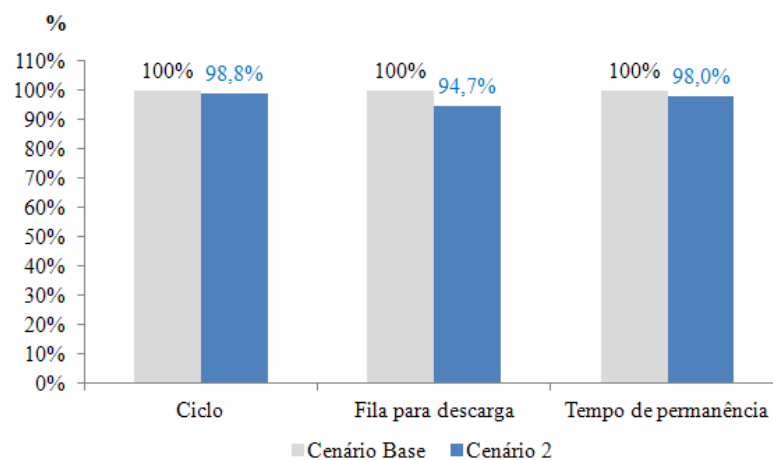


GRÁFICO 5.6 - Variação do ciclo e etapas – Cenário 2

Os resultados obtidos neste cenário demonstraram que a elaboração de um plano de melhorias focado nas falhas diretas, com escopo ligado apenas às falhas do virador de vagões, reduz o tempo de permanência dos trens para descarga, sendo 80% do resultado obtido através do plano de melhoria global. Já as reduções na fila de trens para descarga e ciclo total foram respectivamente 56% e 54% dos resultados obtidos no primeiro cenário.

### 5.2.3 Cenário 3

Para elaboração do terceiro cenário foi realizada uma análise em relação aos impactos indiretos, ou seja, de paralisações causadas por equipamentos interligados ao virador de vagões, seja por falhas mecânicas ou elétricas. Este cenário implica na elaboração de planos de melhorias abrangentes, mas com a necessidade de maior alocação de esforços pois consideram a redução de 10% da quantidade de paralisações corretivas indiretas em relação ao cenário base.

O fator de 10% pode ser justificado pela menor representatividade da quantidade de ocorrências de falhas indiretas, além do menor tempo de reparo ponderado. A redução é apresentada na TAB. 5.4, onde se pode observar a redução do valor original de 906 para 816 ocorrências. O objetivo deste cenário será comparar os resultados de um plano de melhorias mais abrangente, com metas mais arrojadas e maiores esforços alocados, em relação ao plano de melhoria apresentado no cenário 2.

TABELA 5.4  
MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 3

TIPO DE PARADA	$\Sigma$ QTDE. FALHAS	MTBF (HORAS)	MTBF (MINUTOS)	$\Sigma$ HORAS PARADAS	MTTR (HORAS)	MTTR (MINUTOS)
Elétrica direta	428	11	634	220	0,51	31
Mecânica direta	347	13	782	670	1,93	116
Elétrica indireta	343	13	791	224	0,65	39
Mecânica indireta	473	10	574	215	0,46	27
Total	1.590			1.328		

Neste cenário se observa, através do GRAF. 5.7, o incremento de 1,1% na tonelage descarregada em relação ao cenário base, vindo a ser exatamente o mesmo índice apresentado no cenário 2.

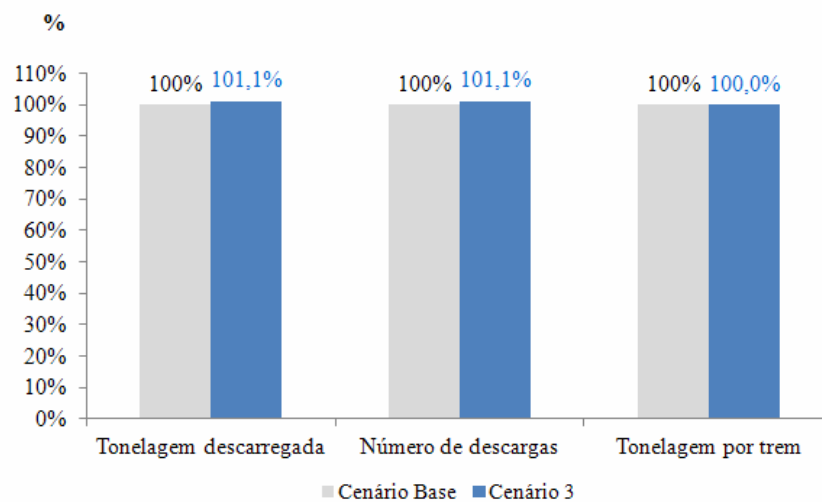


GRÁFICO 5.7 - Variação da tonelage descarregada – Cenário 3

Esta tendência é confirmada quando se compara as reduções obtidas no tempo médio de permanência dos trens em descarga e ciclo total. O GRAF. 5.8 apresenta valores muito aderentes aos obtidos no GRAF. 5.6 do cenário 2. Existe uma ligeira dispersão em relação à fila para descarga, que apresentou uma redução de 8,9% em relação ao cenário base, menor em 2,6% do que o ganho apresentado no cenário 2.

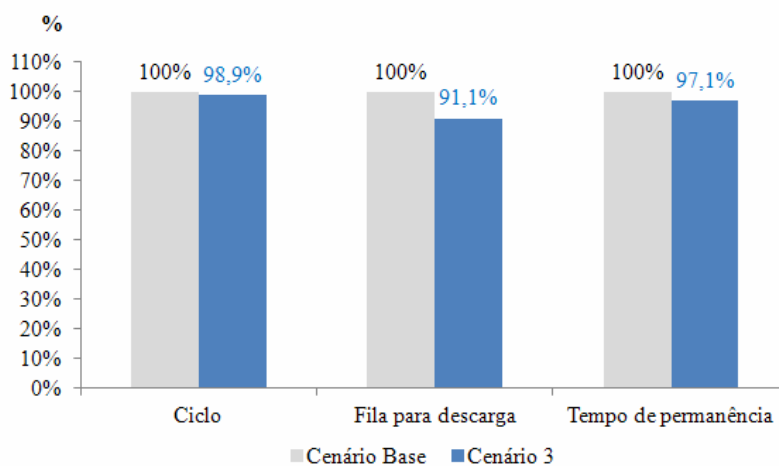


GRÁFICO 5.8 - Variação do ciclo e etapas – Cenário 3

A análise do terceiro cenário comprovou que a elaboração de planos de melhorias mais abrangentes, visando redução das falhas indiretas ocasionados pelos demais equipamentos do sistema, com metas mais arrojadas e maiores esforços alocados, resultam em

ganhos aderentes ao segundo cenário proposto, tendo a fila para descarga apresentado o maior desvio apurado.

#### 5.2.4 Cenário 4

Para a construção do quarto e último cenário foi considerada a redução do tempo médio de reparo das falhas mecânicas diretas, cujo valor original de 1,93 horas é o maior dentre todos os tipos de falhas analisados. Este fato implicou na elaboração de um cenário cujo plano de ação de melhorias seja específico para as falhas mecânicas diretas, cuja abrangência incorpore apenas as falhas mecânicas ligadas ao virador de vagões.

Esta proposta consiste na redução de uma hora do tempo médio de reparo das intervenções corretivas com origem mecânica no virador de vagões. Esta situação é ilustrada na TAB. 5.5, onde se observa o novo valor do tempo médio de reparo reduzido à 0,93 horas . O objetivo deste cenário é comparar a eficiência de um plano de melhoria focado em um único tipo de falha, com esforços concentrados, em relação às demais propostas apresentadas nos cenários anteriores.

TABELA 5.5  
MTTR e MTBF das falhas do virador de vagões – Cenário 4

TIPO DE PARADA	$\Sigma$ QTDE. FALHAS	MTBF (HORAS)	MTBF (MINUTOS)	$\Sigma$ HORAS PARADAS	MTTR (HORAS)	MTTR (MINUTOS)
Elétrica Direta	428	11	634	220	0,51	31
Mecânica Direta	347	13	782	323	0,93	56
Elétrica Indireta	381	12	712	249	0,65	39
Mecânica Indireta	525	9	517	239	0,46	27
Total	1.681			1.030		

Neste cenário se observa, através do GRAF. 5.9, o incremento de 3,0% na tonelagem descarregada em relação ao cenário base, valor superior a qualquer outro cenário apresentado anteriormente.

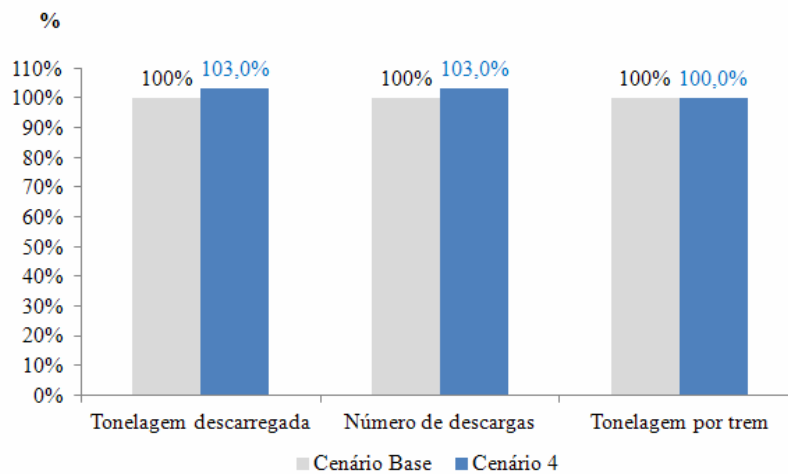


GRÁFICO 5.9 - Variação da tonelage descarregada – Cenário 4

Esta tendência se consolida quando são comparadas as reduções obtidas no tempo médio de fila, de permanência para descarga e ciclo total com o cenário base, em relação aos demais cenários apresentados. O GRAF. 5.10 ilustra reduções de 5,6% do tempo de permanência, 18,8% de fila para descarga e 3,1% do ciclo total.

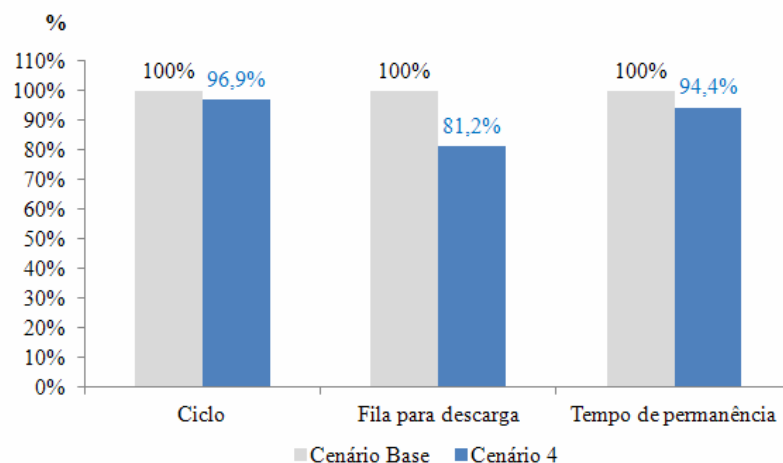


GRÁFICO 5.10 - Variação do ciclo e etapas – Cenário 4

A análise do quarto cenário comprovou que a elaboração de um plano de melhoria específico, visando a redução de uma hora do tempo médio de reparo das falhas mecânicas diretas, ligadas ao virador de vagões, demonstra ser mais eficiente. Esta conclusão é possível em função de obter melhores resultados quando comparado com os demais cenários

propostos, em termos de tonelagem descarregada, tempo de permanência, fila para descarga e ciclo de trens.

### **5.3 Impacto tarifário**

Por se tratar de uma concessão ferroviária, deve ser considerado o impacto da redução do ciclo no custo de transporte da mineradora. O instrumento de precificação dos fluxos de transporte da operadora ferroviária é baseado em valores de custo orçados cujo rateio é baseado na alocação de recursos com visão anual. É concebida em um sistema de *cost-plus*, ou seja, que se propõe a calcular os custos dos fluxos de transporte e acrescentar aos mesmos a remuneração de capital respectiva, de forma a se atingir a referência de preços desejada.

Os custos são todos os recursos a serem incorridos pela empresa para realização de sua produção: recursos materiais, financeiros, humanos, tecnológicos. Esses custos são orçados anualmente e classificados como fixos, variáveis e de remuneração de capital, conforme apresentado a seguir.

#### **5.3.1 Custos fixos**

Os custos fixos podem ser administrativos ou operacionais diretos. Os administrativos são os custos incorridos com a realização da atividade fim da ferrovia, ou seja, transporte ferroviário de cargas, que não sofrem variação devido ao aumento de produção, em qualquer tempo. São eles: custos da área administrativa, custos da área comercial e custos fixos da área operacional. Já os custos fixos operacionais diretos são aqueles inerentes à operação de transporte ferroviário, tais como serviços de terceiros, materiais e despesas gerais.

#### **5.3.2 Custos variáveis**

Os custos variáveis são incorridos pela empresa para realização de sua atividade fim, que variam de acordo com o volume de produção. No curto prazo, o custo varia mesmo em pequenas alterações no transporte. São eles: óleo diesel das locomotivas e energia elétrica de tração. No longo prazo, os custos só variam com grandes alterações no transporte. São eles:

- custos de manutenção de locomotivas, por modelo;
- custos de manutenção de vagões, por frota;
- custos de manutenção da via permanente, por trecho;
- custos de equipagem;
- custos de manutenção da sinalização (eletroeletrônica), por trecho;

Demais custos operacionais e de segurança, por trecho:

- custos de depreciação de locomotivas, por modelo;
- custos de depreciação de vagões, por frota;
- custos de depreciação da via permanente, por trecho;
- custos de depreciação de eletroeletrônica, por trecho;
- custos de depreciação dos demais custos operacionais e de segurança, por trecho.

### 5.3.3 Custos de remuneração de capital

Os custos de remuneração de capital podem ser em ativos depreciables ou não depreciables. Os custos referentes à remuneração de capital em ativos depreciables são:

- investimento em locomotivas;
- investimento em vagões;
- investimento em via permanente;
- investimento em eletroeletrônica;
- investimento em concessão;
- demais operacionais alocados no ciclo;

Já os Custos de Remuneração de Capital em Ativos Não Depreciables são:

- capital de giro;
- realizável longo prazo;
- investimentos não depreciables alocados ao fluxo.

### 5.3.4 Obtenção dos custos unitários

Depois de classificados, os custos são rateados por fluxo conforme percentual de utilização de variáveis explicativas. Quanto mais eficiente o ciclo, maior a produtividade por trem e menor será a necessidade de ativos para atendimento da mesma demanda. Como a



metodologia de custeio da ferrovia é baseada nos recursos alocados, a maximização na utilização dos ativos ferroviários garante a minimização de tarifas de transporte.

O QUADRO 5.1 apresenta o resumo dos grupos de custos com respectivas descrições e as variáveis explicativas utilizadas para rateio tarifário, cujos detalhamentos seguem no ANEXO C.

QUADRO 5.1  
Grupo de custos e variáveis explicativas

TIPO	GRUPO	DESCRIÇÃO	VARIÁVEIS EXPLICATIVAS
Fixo	Administrativos	Administrativos	
	Operacionais diretos	Operacionais diretos	
Variável	Curto prazo	Combustível	TKU TKB Loco-Hora Loco-km Vagão-Hora Vagão-km Vagão movimentado
	Longo prazo	Manutenção de locomotivas	
		Manutenção de vagões	
		Manutenção de vagões	
		Manutenção de via permanente	
		Manutenção de eletroeletrônica	
	Operacionais e segurança		
Remuneração de capital	Ativos depreciáveis	Locomotivas	
		Vagões	
		Via permanente	
		Eletroeletrônica	
		Concessão	
		Demais Operacionais	
	Ativos não Depreciáveis	Capital de giro	
	Realizável longo prazo		
	Investimentos não depreciáveis		

Pelo exposto é possível afirmar que variações de volume transportado e ciclo impactam na composição das variáveis explicativas e como consequência no rateio dos custos de transporte ferroviário. A TAB. 5.6 ilustra o resumo das reduções de ciclo obtidos nos cenários 1, 2, 3 e 4 em relação ao cenário base.

TABELA 5.6  
Resumo das reduções de ciclo

CENÁRIO	CICLO DO CENÁRIO BASE	CICLO DO CENÁRIO ANALISADO	REDUÇÃO DE CICLO
Cenário 1	100%	97,8%	-2,2%
Cenário 2	100%	98,8%	-1,2%
Cenário 3	100%	98,9%	-1,1%
Cenário 4	100%	96,9%	-3,1%

Para finalizar, o GRAF. 5.11 apresenta o impacto das reduções de ciclo no custo de transporte ferroviário da mineradora.

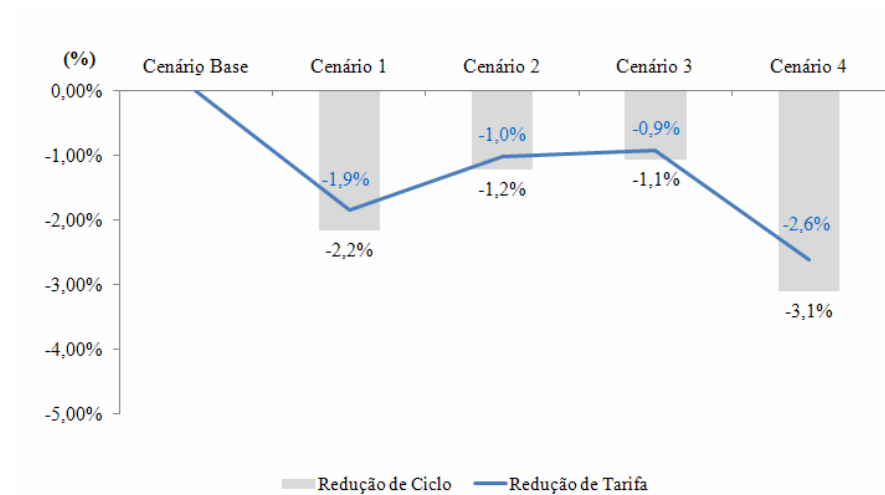


GRÁFICO 5.11 - Impacto da redução do ciclo em tarifa

Conclui-se que a estratégia obtida através do cenário 4, alcançada por meio da redução de uma hora do tempo médio de reparo das falhas mecânicas diretas, atingiu as maiores reduções de ciclo e, por consequência, custo de transporte associado.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse trabalho tem como objetivo analisar os impactos do aumento da disponibilidade do equipamento de descarga de uma cadeia integrada mina-ferrovia-porto, cuja operação é pautada por trens de ciclo, em relação à tonelagem descarregada, tempo de permanência para descarga, fila de trens e ciclo total. Estes cálculos são realizados comparando os resultados obtidos através de diferentes cenários de redução das manutenções corretivas mecânicas e elétricas, diretas e indiretas, em relação às intervenções reais ocorridas no ano de 2011 em uma grande mineradora brasileira.

Para recriar a operação da cadeia integrada em ambiente virtual utilizou-se o método de simulação e optou-se pelo *software* Arena, por apresentar uma interface amigável, possuir um conjunto de ferramentas bastantes úteis à análise estatística dos dados e estar legalmente disponível para a mineradora. O método proposto constou da caracterização da operação ferroviária, identificação das variáveis, coleta e análise dos dados, construção e validação do modelo de simulação, geração de cenários alternativos e análise dos resultados.

Apesar de ter sido aplicado a uma cadeia integrada específica, o simulador foi modelado da forma mais generalista possível, com o objetivo de poder ser facilmente adaptado para outros sistemas integrados de forma simples e direta. Em ambientes industriais, a possibilidade de se avaliar diferentes cenários é fundamental para uma ferramenta de apoio à decisão, e o simulador construído atendeu muito bem a essa possibilidade.

Os cenários propostos indicaram de forma clara os efeitos causados pelo aumento da disponibilidade do virador de vagões nas variáveis analisadas, obtidos através de estratégias de implantação distintas. Foi possível observar, por exemplo, que a relação entre o percentual de redução de falhas e a redução de fila para descarga não é linear, sendo que um pequeno aumento na disponibilidade causa uma grande redução de fila de trens para descarga. Abaixo segue resumo sobre a construção dos cenários e os impactos obtidos:

- O cenário 1 considerou a redução de 5% da quantidade de falhas diretas e indiretas para manutenções corretivas. Essa hipótese seria viabilizada pela mineradora através da elaboração de um plano de ação de melhorias global, cuja abrangência incorporasse o virador de vagões e todos os equipamentos a ele interligados. Foi comprovado que a redução de 5% da quantidade global de

manutenções corretivas do virador de vagões implicou na redução média de 9,4% da fila para descarga.

- No cenário 2 foi considerado redução em 5% da quantidade de falhas diretas (mecânicas ou elétricas) ligadas ao virador de vagões. Optou-se pelas diretas por representarem 63% do total de horas paradas. A análise demonstrou bons resultados na redução do tempo de permanência dos trens para descarga, chegando a 80% do resultado obtido em relação ao primeiro cenário. Já as reduções na fila de trens para descarga e ciclo total foram respectivamente 56% e 54% dos índices obtidos no primeiro cenário.
- No cenário 3 foram analisados os impactos causados pela redução de 10% das falhas indiretas (mecânicas ou elétricas), ou seja, de paralisações causadas por equipamentos interligados ao virador de vagões. Essa hipótese seria viabilizada pela mineradora através de um plano de melhorias abrangente, por envolver uma gama maior de equipamentos. A análise comprovou que a redução do índice de 10% das falhas ocasionada pelos demais equipamentos do sistema resulta em ganhos similares à redução de 5% das falhas diretas, obtida no cenário 2.
- No cenário 4 foi considerado a redução de uma hora do tempo médio de reparo das falhas mecânicas diretas, cujo valor original de 1,93 horas é o maior dentre todos os tipos de falhas apurados. O plano de melhorias específico das falhas mecânicas diretas comprovou ser o cenário mais eficiente, em função de obter melhores resultados dentre todos os cenários propostos, em termos de tonelagem descarregada, tempo de permanência, fila para descarga e ciclo de trens.

Para todos os cenários foram estabelecidas relações entre as reduções do ciclo dos trens e custo de transporte. Uma vez que a concessionária ferroviária possui um sistema tarifário baseado nos recursos alocados, foi comprovado que o cenário 4, por trazer maiores benefícios em termos de ciclo, obteve o maior índice de redução tarifária cujo valor foi de -2,61% em relação à tarifa vigente em 2011.

Conclui-se que o objetivo do presente trabalho foi alcançado. Os cenários criados através do *software* Arena comprovaram que simulação é uma ferramenta confiável, de fácil manuseio e que auxilia no suporte à tomada de decisão, atuando como base para definições estratégias visando alavancar produção, maximizar tempo e minimizar custos.

Como sugestão para continuação desse trabalho, podem ser realizadas extrapolações em relação às simplificações realizadas, como por exemplo ampliar a investigação no que diz respeito aos demais horizontes da OEE, sendo elas a utilização e

produtividade. Para isso devem ser analisados detalhadamente outros processos inerentes à descarga ferroviária, como ociosidade, atrasos, manobras e outros impedimentos não gerenciáveis.

Outro ponto a ser analisado é restringir a capacidade dos terminas de carga que nesse modelo não foram considerados. Esse fato implicaria que nem todo o incremento de disponibilidade de trens seria absorvido sem restrições, o que na prática incorreria em fila de trens para carga. Podem ser criados recursos vinculados que melhor representem a realidade operacional.

Uma outra alternativa que poderia ser aperfeiçoada é a alteração dos parâmetros de tempo de circulação do modelo proposto. A maior liberação de trens pela descarga implicaria na maior quantidade de trens trafegando na malha MRS, aumentando o número de cruzamentos e o tempo de circulação por consequência. Para isso seria necessária a construção de um modelo de movimentação ferroviária mais detalhado, considerando a ocupação de todos os pátios ao longo da malha.

Finalizando, a abrangência do sistema em estudo poderia ser expandida englobando a operação portuária. Uma investigação em relação ao comportamento dos equipamentos, em especial aos interligados ao virador de vagões, seria profícua.

Espera-se que esse estudo contribua para alavancar o volume de transporte ferroviário de minério no Brasil, norteador soluções de melhoria e auxiliando no uso mais eficiente da infraestrutura existente.

## REFERÊNCIAS

- 1 AGUILAR, S. M. S. *et al.* Avaliação dos benefícios da aplicação da simulação, através do software Arena 10.0, em uma empresa de transporte ferroviário. In: XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão. Salvador, Brasil, 06 a 09 de outubro de 2009. [S.l.: s.n.], 2009.
- 2 AL-AOMAR, R. Simulating service systems. In: GOTI, A. *Discrete event simulations*. Croatia: Intech, 2010. Chapter 8.
- 3 ALVIM, R. S. P. *Planejamento de Capacidade Ferroviária via Simulação*. 2009. 71 p. Monografia (Curso de Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- 4 ANDRADE, E. L. *Introdução a pesquisa operacional*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004 *apud* LOPES, H. S. *Modelagem e simulação como ferramentas ao diagnóstico operacional de sistemas: estudo aplicado ao transporte de minério de ferro pela hidrovía do Araguaia-Tocantins*. 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- 5 ANTÔNIO, D. G. *Práticas e iniciativas da gestão da cadeia de suprimentos em software de simulação*. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2006.
- 6 ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS (ANTF). *As ferrovias e o futuro do País*. Brasília, 2011.
- 7 BABULAK, E.; WANG, M. Discrete event simulation: state of the art. In: GOTI, A. *Discrete event simulations*. Croatia: Intech, 2010. Chapter 1.
- 8 BANKS, J. *et al.* *Discrete-event system simulation*. 4th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004.
- 9 BARCELÓ, J. Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. In: BARCELÓ, J. (Ed.). *Fundamentals of traffic simulation*. Barcelona: Springer, 2010. (International Series in Operations Research & Management Science). v. 145. Chapter 1. p. 1-62.
- 10 BATISTA, C. N. O. *Contribuição à análise da capacidade de processamento de trens cargueiros em linhas ferroviárias singelas no Brasil*. 2006. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- 11 BATISTA FILHO, J. A. *A infraestrutura de transporte e impactos dos investimentos da construção da ferrovia Norte-Sul no Tocantins: uma abordagem insumo-produto*. 2009. 201 p. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2009.

- 12** BOTTER, R. C. Tratamento de dados em modelos de simulação discreta. 2002. 147 p. Tese (Livre docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- 13** CAMARGO, P. V. *Análise de um sistema de transporte ferroviário de granéis agrícolas através de uma abordagem integrada simulação-otimização*. 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- 14** CASSEL, R. A. *Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho*. 1996. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996 *apud* JULIÁ, A. L. *Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro*. 2010. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- 15** CARR, M.; WAY, H. Million dollar logistic decisions using simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997, Atlanta. *Proceedings....* [S.l.: s.n.], 1997. p. 1206-1209.
- 16** CECILIANO, W. R. A. *Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minérios de ferro*. 2007. 228 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- 17** CHRISPIM, E. M. *Análise da operação ferroviária do porto do Rio de Janeiro utilizando simulação de eventos discretos*. 2007. 62 p. Monografia (Curso de Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.
- 18** CHRISTOPHER, M. *A logística do marketing: otimizando processos para aproximar fornecedores e clientes*. 2. ed. São Paulo: Futura, 1999.
- 19** CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de Ferrovias 2011. Brasília, 2011.
- 20** CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. *Administração da produção e de operações: manufatura e serviços – uma abordagem estratégica*. 8. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2005.
- 21** DESSOUKY, M. M.; LU, Q.; LEACHMAN, R. C. Using simulation modeling to assess rail track infrastructure in densely trafficked metropolitan areas. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2002, San Diego. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2002. p. 725-731.
- 22** DIAS, G. P. P.; CORREA, H. L. Uso de simulação para dimensionamento e gestão de estoques de peças sobressalentes. In: SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, 2, 1999, São Paulo. *Anais...* São Paulo: FGVP, 1999.
- 23** FIORONI, M. M. *Simulação em ciclo fechado de malhas ferroviárias e suas aplicações no Brasil: avaliação de alternativas para o direcionamento de composições*. 2007. 323 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

- 24** FREITAS FILHO, P. J. de. *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em ARENA*. Florianópolis: Visual Books, 2001 *apud* ANTÔNIO, D. G. *Práticas e iniciativas da gestão da cadeia de suprimentos em software de simulação*. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Bárbara d’Oeste, 2006.
- 25** GAINO, Daniel Zanetti. *Redução de perdas O.E.E. e número de quebras em máquinas através de planejamento em Engenharia de Manutenção*. 2007. 54 p. Monografia (Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-05042010-111946/?&lang=br>>. Acesso em: 10 fev. 2012.
- 26** GUIMARÃES, I. F. G. *et al.* Modelo de filas e simulação. *Tecnol. Metal. Mater.*, São Paulo, v. 5, n. 3, p. 144-149, jan.-mar. 2009.
- 27** GUELBERT, Marcelo. *Estruturação de um sistema de gestão da manutenção em uma empresa do segmento automotivo*. 2004. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004. Disponível em: <[http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/marcelo\\_guelbert.pdf](http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/marcelo_guelbert.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2012.
- 28** GUTTKUHN, R. *et al.* A discrete event simulation for the crew assignment process in North American freight railroads. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2003. p. 1686-1692.
- 29** HARREL, C. R. *et al.* *Simulação: otimizando os sistemas*. São Paulo: Instituto IMAM, 2002 *apud* ANTÔNIO, D. G. *Práticas e iniciativas da gestão da cadeia de suprimentos em software de simulação*. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Bárbara d’Oeste, 2006.
- 30** INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=1866&id\\_pagina=1&titulo=Censo-2010:-populacao-do-Brasil-e-de-190.732.694-pessoas](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1866&id_pagina=1&titulo=Censo-2010:-populacao-do-Brasil-e-de-190.732.694-pessoas)>. Acesso em: 23 fev. 2012.
- 31** INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Informações e análises da economia mineral brasileira*. 6. ed. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2012.
- 32** INTERNATIONAL MONETARY FOUND (IMF). Table 3 – Actual market prices for non-fuel and fuel commodities, 2009-2012. Disponível em: <<http://www.imf.org/external/np/res/commod/Table3.pdf>>. Acesso em: 23 dez. 2011 / 8 fev. 2012.



- 33** JULIÁ, A. L. *Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro*. 2010. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- 34** KRUEGER, H. *et al.* Simulation within the railroad environment. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2000. p. 1191-1200.
- 35** LANDA, F. T. *Utilização de simulação e eventos discretos para análise da operação de locomotivas de auxílio nos trens de carga: caso MRS [Minas Gerais]*. 2007. 43 p. Monografia (Curso de Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- 36** LAW, A. M. *Simulation modeling and analysis*. 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2007.
- 37** LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- 38** LEILICH, R. H. Application of simulation models in capacity constrained rail corridors. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1998. 1125-1133.
- 39** LEWELLEN, M.; TUMAY, K. Network simulation of a major railroad. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Washington. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 1998. p. 1135-1138.
- 40** LOPES, H. S. *Modelagem e simulação como ferramentas ao diagnóstico operacional de sistemas: estudo aplicado ao transporte de minério de ferro pela hidrovía do Araguaia-Tocantins*. 2008. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- 41** LOPES, H. S. *et al.* Simulação do transporte de minério de ferro na hidrovía do Araguaia-Tocantins. *Revista Gestão Industrial*, Ponta Grossa, v. 07, n. 01: p. 43-71, 2011. Disponível em: <<http://www.pg.utfpr.edu.br/depog/periodicos/index.php/revistagi/article/view/577/640>>. Acesso em: 02 jan. 2012.
- 42** MARTINS, F. R. *Desenvolvimento de software lúdico de simulação logística – Aplicação de metodologias de projeto de produto e engenharia de software*. 2006. 39 p. Monografia (Curso de Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2006.
- 43** MIDDELKOOP, D; BOUWMAN, M. Simone: large scale train network simulations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. 2001. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2001. p. 1042-1047.
- 44** MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO – BRASIL. Exportação de commodities. Disponível em: <<http://www.desenvolvimento.gov.br/portalmDic/sitio/interna/interna.php?area=5&menu=1955&refr=608>>. Acesso em: 18 dez. 2011.

- 45** NOGUEIRA JÚNIOR, L. C. *Um estudo para redução do tempo de resposta do SAMU de Belo Horizonte através da realocação das bases de operação*. 2011. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.
- 46** OLIVEIRA, G. D. *Análise do desempenho de terminais ferroviários utilizando teoria de filas e simulação de eventos discretos – Um estudo de caso na MRS logística S/A*. 2006. 61 p. Monografia (Curso de Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF, Juiz de Fora, 2006.
- 47** OLIVEIRA, M. G. C. *Análise do processo de recebimento e expedição de grãos, em unidade armazenadora no sudoeste goiano, por meio da simulação computacional*. 2009. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás, 2009. Disponível em: <[http://www.unucet.ueg.br/biblioteca/arquivos/DISSERTACAO\\_PDF\\_MARCIA.pdf](http://www.unucet.ueg.br/biblioteca/arquivos/DISSERTACAO_PDF_MARCIA.pdf)>. Acesso em: 02 jan. 2012.
- 48** PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. *Introduction to simulation using SIMAN*. New York: McGraw Hill, 1995.
- 49** PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. *Introduction to simulation using SIMAN*. New York: McGraw-Hill, 1990 *apud* JULIÁ, A. L. *Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro*. 2010. 168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- 50** PIDD, M. *Computer simulation in Management Science*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- 51** PRADO, D. *Usando o ARENA em simulação*. Belo Horizonte: INDG, 2004. (Série Pesquisa Operacional, v. 3).
- 52** RAMALHO, F. R. *Análise do impacto operacional de um projeto ferroviário através de simulação de eventos discretos*. 2009. 47 p. Monografia (Curso de Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2009.
- 53** RIBEIRO, R. P. *et al.* A relevância de uma ferramenta de apoio à decisão em um jogo de simulação logística. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO – SEMEAD, XIV, 2011, São Paulo. *Anais...* [S.l.: s.n.], 2011.
- 54** RIIS; J. O.; JOHANSEN; J.; MIKKELSEN; H. Simulation Games in Production Management – An Introduction. In: RIIS, J. O. (Ed.). *Simulation games and learning in production management*. London: Chapman & Hall, 1995. p. 3-12 *apud* ANTÔNIO, D. G. *Práticas e iniciativas da gestão da cadeia de suprimentos em software de simulação*. 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2006..

- 55** ROBINSON, S. *Simulation: the practice of model development and use*. 2004. England: John Wiley & Sons, 2004.
- 56** RODRIGUES, L. H. *Developing an approach to help companies synchronise manufacturing*. 1994. PhD (Department of Management Sciences) – Lancaster University, England, 1994.
- 57** SILVA, J. P. A. R. *OEE – A forma de medir a eficácia dos equipamentos*. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/15122575/OEE-A-FORMA-DE-MEDIR-A-EFICACIA-DOS-EQUIPAMENTOS>>. Acesso em: 5 fev. 2012.
- 58** USGS U.S. Geological Survey National Minerals Information Center. Mineral commodity summaries 2011. Virginia, 2011. p. 85. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2011/mcs2011.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2011.
- 59** VIEIRA, T. R. B. Uma contribuição para a gestão operacional de ferrovias por meio de ,simulação probabilística. 2009. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- 60** WORLDSTEEL. Disponível em: <<http://www.worldsteel.org>>. Acesso em: 18 dez. 2011.

## ANEXO A

TABELA A.1

Valores críticos da distribuição da Estatística (Kolmogorov-Smirnov)  $nD$

Os valores tabelados correspondem aos pontos tais que: $P(\geq \alpha) = \alpha$						$\alpha$					
<b>n</b>	<b>0.20</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>	<b>n</b>	<b>0.20</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
1	0.900	0.95	0.975	0.990	0.995	21	0.226	0.259	0.287	0.321	0.344
2	0.684	0.776	0.842	0.900	0.929	22	0.221	0.253	0.281	0.314	0.337
3	0.565	0.636	0.708	0.785	0.829	23	0.216	0.247	0.275	0.307	0.330
4	0.493	0.565	0.624	0.689	0.734	24	0.212	0.242	0.269	0.301	0.323
5	0.447	0.509	0.563	0.627	0.669	25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
6	0.410	0.468	0.519	0.577	0.617	26	0.204	0.233	0.259	0.290	0.311
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576	27	0.200	0.229	0.254	0.284	0.305
8	0.358	0.410	0.454	0.407	0.542	28	0.197	0.225	0.250	0.279	0.300
9	0.339	0.387	0.430	0.480	0.513	29	0.193	0.221	0.246	0.275	0.295
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.489	30	0.190	0.218	0.242	0.270	0.290
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468	31	0.187	0.214	0.238	0.266	0.285
12	0.296	0.338	0.375	0.419	0.449	32	0.184	0.211	0.234	0.262	0.181
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432	33	0.182	0.208	0.231	0.258	0.277
14	0.275	0.314	0.349	0.390	0.418	34	0.179	0.205	0.227	0.254	0.273
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404	35	0.177	0.202	0.224	0.251	0.269
16	0.258	0.295	0.327	0.366	0.392	36	0.174	0.199	0.221	0.247	0.265
17	0.250	0.286	0.318	0.355	0.381	37	0.172	0.196	0.218	0.244	0.262
18	0.244	0.279	0.309	0.346	0.371	38	0.170	0.194	0.215	0.241	0.258
19	0.237	0.271	0.301	0.337	0.361	39	0.168	0.191	0.213	0.238	0.255
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352	40	0.165	0.189	0.210	0.235	0.252

Para $n > 40$ os valores críticos podem ser aproximados pelas seguintes expressões: $\alpha$				
<b>0.20</b>	<b>0.10</b>	<b>0.05</b>	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
$1.70 \sqrt{n}$	$1.22 \sqrt{n}$	$1.36 \sqrt{n}$	$1.52 \sqrt{n}$	$1.63 \sqrt{n}$

# ANEXO B

## B.1 Curvas estatísticas da ferrovia



FIGURA B.1 –  $\Delta T$  Vazio das origens de 1 a 5

a) Origem 11 b) Origem 2 c) Origem 3

d) Origem 4 e) Origem 5



FIGURA B.2 -  $\Delta T$  Carga das origens de 1 a 5

a) Origen 1 b) Origen 2 c) Origen 3  
d) Origen 4 e) Origen 5

TABELA B.1

Resumo das curvas estatísticas da ferrovia

Nome Mina	CAR + ACM + DCM (min)	TTV + VVC+ACC (min)
Terminal A	NORM(369, 29)	1.39e+003 + LOGN(379, 2.36e+003)
Terminal B	UNIF(346, 551)	1.42e+003 + WEIB(224, 1.09)
Terminal C	438 + EXPO(70.4)	1.26e+003 + 695 x BETA(0.706, 1.18)
Terminal D	TRIA(302, 506, 555)	1.33e+003 + WEIB(86, 0.68)
Terminal E	TRIA(391, 582, 664)	1.36e+003 + 488 x BETA(0.419, 0.561)

## ANEXO C

### C.1 Variáveis explicativas

#### 1 TKU

Refere-se à TU – Tonelada Útil – transportada em determinada distância.

Visão Esquemática:

$$TKU = N^{\circ} \text{ Trens} \times N^{\circ} \text{ viagens} \times TU \text{ trem} \times \text{Distância de ida}$$

$$\text{Onde: } N^{\circ} \text{ viagens} = N^{\circ} \text{ Dias} / \text{Ciclo}$$

#### 2 TKB

Refere-se à TB – Tonelada Bruta – transportada.

Visão esquemática:

$$TKB = TKU + TK \text{ Tara}$$

Onde, TK Tara refere-se à Tara dos vagões vazios, e:

$$TK \text{ Tara} = N^{\circ} \text{ Trens} \times N^{\circ} \text{ viagens} \times [(Tara \text{ vagões} \times N^{\circ} \text{ vagões}) + \text{Peso locos} \times N^{\circ} \text{ Locomotivas}] \times (\text{Distancia ida} + \text{volta})]$$

#### 3 Vagão km

É a quilometragem total percorrida pelos vagões para o atendimento da demanda.

Visão Esquemática:

$$\text{Vagão km} = N^{\circ} \text{ Trens} \times N^{\circ} \text{ viagens} \times N^{\circ} \text{ vagões} \times \text{Distância (Ida + Volta)}$$

#### 4 Vagão Hora

É a permanência total dos vagões na malha para o atendimento da demanda.

Visão Esquemática:

$$\text{Vagão Hora} = N^{\circ} \text{ Trens} \times N^{\circ} \text{ viagens} \times N^{\circ} \text{ vagões} \times \text{Ciclo}$$

#### 5 Vagão Movimentado

Corresponde à consolidação da quantidade de vagões movimentados por trecho.



Visão Esquemática:

Vagão movimentado = N° Trens x N° viagens x N° vagões x N° Passagens em  
cada trecho (ida e/ou volta)

#### 6 Loco km

Corresponde ao cálculo da distância percorrida pelas locomotivas nos trechos de ida e volta ou total.

Visão Esquemática:

Vagão Hora = N° Trens x N° viagens x N° locomotivas x Distância (ida e/ou  
volta)

#### 7 Hora

Corresponde ao cálculo da permanência das locomotivas nos trechos.

Visão Esquemática:

Loco Hora = N° Trens x N° viagens x N° Locomotivas x Hora trem (ida e/ou  
volta)

“Hora Trem”, é um valor calculado e refere-se a quantidade de horas que o ativo permanece em cada trecho. Com base na lei física do Movimento Uniforme (MU), é determinada a velocidade média do fluxo pela equação  $V = S / T$ , onde “S” é a distância e “T” o ciclo do fluxo. Em seguida é calculada a quantidade de horas que as locomotivas permanecem em cada trecho pela proporcionalidade da distância do trecho em relação à total.