UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LUCAS FERNANDES ELMOR

MODELO OPERACIONAL DE DESCARGA DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

JUIZ DE FORA
2011

LUCAS FERNANDES ELMOR

MODELO OPERACIONAL DE DESCARGA DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 11 de Novembro de 2011.

BANCA EXAMINADORA

D. Sc, Fernando Marques de Almeida Nogueira (Orientador)

Universidade Federal de Juiz de Fora

M. Sc, José Geraldo Ferreira (Co-Orientador)

MRS Logística S/A

M. Sc, Roberto Malheiros Moreira Filho

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

"If I have seen farther, it is by standing on shoulders of giants"

Sir Isaac Newton

Faço minhas as palavras de Newton para agradecer a todos os "gigantes" que me apoiaram nessa caminhada para formação como Engenheiro de Produção.

Agradeço a Deus, o maior de todos os gigantes, que iluminou minha jornada até aqui.

Aos meus pais João de Deus e Rute e minha irmã Carime pela torcida e apoio incondicional em todos os momentos.

Aos meus padrinhos Gabriel e Luciana, pelos conselhos e confiança demonstrada.

Ao meu orientador Fernando Nogueira, por ter despertado meu interesse na área de pesquisa operacional e simulação.

Aos colegas da MRS Logística, em especial ao José Geraldo, Marcelo Neder e Thales Augusto, com os quais aprendi muito do que está aqui neste trabalho.

Aos grandes amigos Robson Carvalho e Alfredo Portugal, por terem compartilhado alguns dos melhores momentos nesses últimos cinco anos e por muitos outros que ainda estão por vir.

RESUMO

O desenvolvimento desse trabalho objetiva estudar alternativas para o modelo operacional da região de descarga de uma empresa de logística ferroviária. Na empresa estudada, a necessidade de aumento do nível de serviço e capacidade de transporte de minério de ferro é vital para acompanhar o crescimento previsto da demanda para os próximos anos sem reduzir a eficiência no atendimento aos clientes. Neste trabalho será estudado o processo de descarga nos terminais e operação em um pátio de estocagem de trens carregados para alguns tipos de formação de trens, a fim de determinar qual apresenta maior eficiência na capacidade de descarga e determinar qual a quantidade de locomotivas de manobra necessárias para a implantação do plano operacional definido. Com isso, espera-se definir um modelo de operação para a região de descarga de minério de ferro, tendo em vista a conciliação do modelo operacional projetado com a capacidade requerida para atendimento à demanda e à estratégia da empresa de atendimento ao cliente.

Palavras-chave: Simulação de Eventos Discretos. Estratégia de Capacidade. Logística Ferroviária.

ABSTRACT

This work aims to study alternatives for the operational model of the unloading region of a rail logistics company. In the company studied, the need to increase service level and ability to transport iron ore is vital to keep up with anticipated growth in demand for the next years without reducing the efficiency of customer service. In this work will be studied the unloading process in terminals and the operation in a storage yard for loaded trains for some type of train formation in order to determine which is more efficient in unloading process and determine the amount of shunting locomotives needed to implement the operational plan set. Thus, it is expected to define an operating model for the iron ore unloading region, with an objective to reconcile operating model with the capacity required to meet demand and company's strategy of customer service.

Keywords: Discrete Event Simulation. Capacity Strategy. Railway Logistics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda Mundial por Aço 12
Figura 2 - Diagrama Espaço-Tempo de Trens 22
Figura 3 - Estoque 23
Figura 4 - Estoque de Segurança 23
Figura 5 - Elementos de um Sistema de Filas 25
Figura 6 - Passos para formulação de um estudo de simulação 28
Figura 7 - Distribuição Normal 30
Figura 8 - Distribuição Uniforme 31
Figura 9 - Distribuição Triangular 31
Figura 10 - Distribuição Exponencial 32
Figura 11 - Distribuição Lognormal 32
Figura 12 - Malha da MRS Logística S/A 34
Figura 13 - Região de Descarga de Minério de Ferro (RJ) 36
Figura 14 - Virador de Vagões 37
Figura 15 - Descarga de Vagões em Moega 37
Figura 16 - Trem de 160 vagões com Tração distribuída 39
Figura 17 - Trem de 202 vagões com Tração Distribuída 40
Figura 18 - Pátio Santa Rosa Ampliado 40
Figura 19 - Lógica Conceitual 44
Figura 20 - Modelo de Simulação em Arena® 46
Figura 21 - Tempo de Permanência em Santa Rosa 50
Figura 22 - Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 1) 54
Figura 23 – Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 2) 55
Figura 24 - Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 3) 55
Figura 25 - Distribuição do Tempo da Atividade "Anexar Locomotiva" 61
Figura 26 – Distribuição do Tempo da Atividade "Retirar Locomotiva" 61
Figura 27 - Distribuição do Tempo da Atividade "Link Locomotivas" 62
Figura 28 - Distribuição do Tempo da Atividade "Anexar / Desanexar Tração Distribuída" 62
Figura 29 – Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FGI 63
Figura 30 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FXS 63
Figura 31 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FTX 64
Figura 32 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal CSA 64

Figura 33 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal de Carvão 65
Figura 34 – Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FGI 65
Figura 35 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FXS 66
Figura 36 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FTX 66
Figura 37 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal CSA 67
Figura 38 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal de Carvão 67
Figura 39 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FGI 68
Figura 40 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FXS 68
Figura 41 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FTX 69
Figura 42 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal CSA 69
Figura 43 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal de Carvão 70
Figura 44 - Teste de Igualdade das Variâncias (Carvão) 71
Figura 45 - Teste de Igualdade das Variâncias (CSA) 71
Figura 46 - Teste de Igualdade das Variâncias (FGI) 72
Figura 47 - Teste de Igualdade das Variâncias (FTX) 72
Figura 48 - Teste de Igualdade das Variâncias (FXS) 73
Figura 49 - Teste de Igualdade das Variâncias (LLX) 73
Figura 50 - ANOVA Trens Terminal de Carvão 74
Figura 51 - ANOVA Trens Terminal CSA 74
Figura 52 - ANOVA Trens Terminal FGI 75
Figura 53 - ANOVA Trens Terminal FTX 75
Figura 54 - ANOVA Trens Terminal FXS 76
Figura 55 - ANOVA Trens Terminal LLX 76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Cronograma do Projeto 15
Tabela 2 - Tabela ANOVA 33
Tabela 3 - Terminais de Descarga de Minério de Ferro 38
Tabela 4 – Terminais atendidos pelo trem de 160 vagões 39
Tabela 5 - Capacidade das linhas do pátio Santa Rosa 41
Tabela 6 - Tempos de Atividade em Santa Rosa 42
Tabela 7 - Tempos etapa de descarga em terminais 42
Tabela 8 - Tempos etapa antes da descarga em terminais 42
Tabela 9 - Tempos etapa depois da descarga em terminais 43
Tabela 10 - Indicadores de Confiabilidade de Via Permanente 46
Tabela 11 - Indicadores de Confiabilidade de Material Rodante 46
Tabela 12 - Informações de Cadastro da Malha Ferroviária 47
Tabela 13 - Quantidade planejada de vagões / dia para por terminal 47
Tabela 14 - Resumo de Cenários de Modelos Operacionais 48
Tabela 15 - Teste de Normalidade dos Dados 51
Tabela 16 - Teste de Igualdade das Variâncias 52
Tabela 17 - Resultados ANOVAS Cenários de Formação de Trens 52
Tabela 18 - Ajuste dos Modelos de ANOVA 53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 11
1.2 JUSTIFICATIVA 12
1.3 ESCOPO DO TRABALHO 13
1.4 OBJETIVOS 14
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 14
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 14
1.7 CRONOGRAMA 15

2 REVISÃO DE LITERATURA 16

2.1 TRANSPORTES 16
2.1.1 CONCEITOS BÁSICOS DE TRANSPORTES 16
2.1.2 MODAIS DE TRANSPORTE 16
2.1.3 MODAL FERROVIÁRIO 17
2.2 CAPACIDADE DE TRANSPORTE 18
2.2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ESTRATÉGIA DE CAPACIDADE 18
2.2.2 CAPACIDADE DE TRANSPORTE EM FERROVIAS 19
2.3 ESTOQUE NA CADEIA DE SUPRIMENTOS 22
2.3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE ESTOQUES 22
2.3.2 ESTOQUE DE SEGURANÇA 23
2.4 TEORIA DE FILAS E SIMULAÇÃO 24
2.4.1 CONCEITO DE TEORIA DE FILAS 24
2.4.2 SIMULAÇÃO 26
2.4.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EVENTOS DISCRETOS 27
2.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DE DADOS NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE EVENTOS DISCRETOS 29
2.4.5 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE 30
2.4.6 EXPERIMENTOS ALEATÓRIOS 32

3 DESENVOLVIMENTO 34

3.1 A MRS LOGÍSTICA S/A 34
3.2 OPERAÇÃO DE DESCARGA DE MINÉRIO DE FERRO 35
3.2.1 DESCARGA NA MALHA DA MRS 35
3.2.2 TERMINAIS DE DESCARGA DE MINÉRIO 37
3.3 MODELOS DE FORMAÇÃO DE TRENS 38
3.3.1 TREM DE 134 VAGÕES 38
3.3.2 TRAÇÃO DISTRIBUÍDA 38
3.4 PÁTIO SANTA ROSA 40

4 O MODELO DE SIMULAÇÃO 42

4.1 COLETA DE DADOS 42
4.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE DESCARGA 43
4.3 MODELO EM ARENA® 44

5 ANÁLISE DE RESULTADOS 49

5.1 MODELOS DE TREM 49
5.1.1 CENÁRIO 1 49
5.1.2 CENÁRIO 2 49
5.1.3 CENÁRIO 3 50
5.2 ESTOQUE DE LOCOMOTIVAS DE MANOBRA 54

6 CONCLUSÃO 57

6.1 CONCLUSÕES 57
6.2 SUGESTÕES E PROPOSTAS 57

ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS AMOSTRAS 61

ANEXO B – TESTES DE HIPÓTESE PARA IGUALDADE DAS VARIÂNCIAS 71

ANEXO C – ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA) 74

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O minério de ferro e seus subprodutos são as principais matérias-primas da indústria siderúrgica para fabricação de aço. Dessa forma, a demanda por minério de ferro está relacionada ao setor siderúrgico, que, conseqüentemente, é influenciado diretamente pelo crescimento econômico mundial. O forte aumento da demanda por aço na China faz com que a oferta de minério de ferro no mercado interno chinês não seja suficiente para suprir a demanda. Este cenário favoreceu o mercado de minério de ferro mundial elevando os preços internacionais nos últimos anos, que por sua vez, forçou a necessidade de expansão das capacidades produtivas dos maiores exportadores de minério de ferro do mundo, dentre eles a Austrália, e o Brasil.

Portanto, as ferrovias brasileiras que operam com *heavy-haul*[1] enfrentam grandes desafios no que diz respeito à conciliação da capacidade de transporte com a demanda prevista para os próximos anos.

Neste contexto, é de fundamental importância o desenvolvimento de planos de expansão da capacidade de transporte. Dentre as diversas alternativas possíveis de expansão da capacidade de transporte em operações ferroviárias, apresentam-se com maior expressão o estudo de novos modelos de formação do trem, com utilização de Tração Distribuída, adoção de novas tecnologias de sinalização e controle de tráfego e aumento da capacidade dos vagões.

A utilização da técnica de simulação de eventos discretos permite realizar a avaliação operacional de tais modificações previstas através de modelos representativos da realidade a fim de fornecer suporte à tomada de decisão.

O interesse pelo tema surgiu durante a realização do estágio curricular na empresa estudada, devido à grande importância e complexidade que este trabalho possui para suportar as decisões de investimento de médio e longo prazo na companhia.

[1] *Heavy-Haul:* Classificação dos sistemas que transportam cargas de grande peso. Em transporte ferroviário, normalmente está relacionado ao transporte de commodities metálicas e agrícolas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A demanda mundial por aço vem crescendo ao longo dos últimos anos, principalmente puxada pelo consumo chinês, conforme pode ser visto na Figura 1 abaixo. Tendo em vista a oportunidade de mercado que se mostra, os principais produtores mundiais de minério de ferro têm buscado adequar sua capacidade para atender à demanda chinesa. Neste contexto, um dos principais gargalos para atendimento da demanda é a criação de uma cadeia de suprimento que atenda às necessidades do sistema.

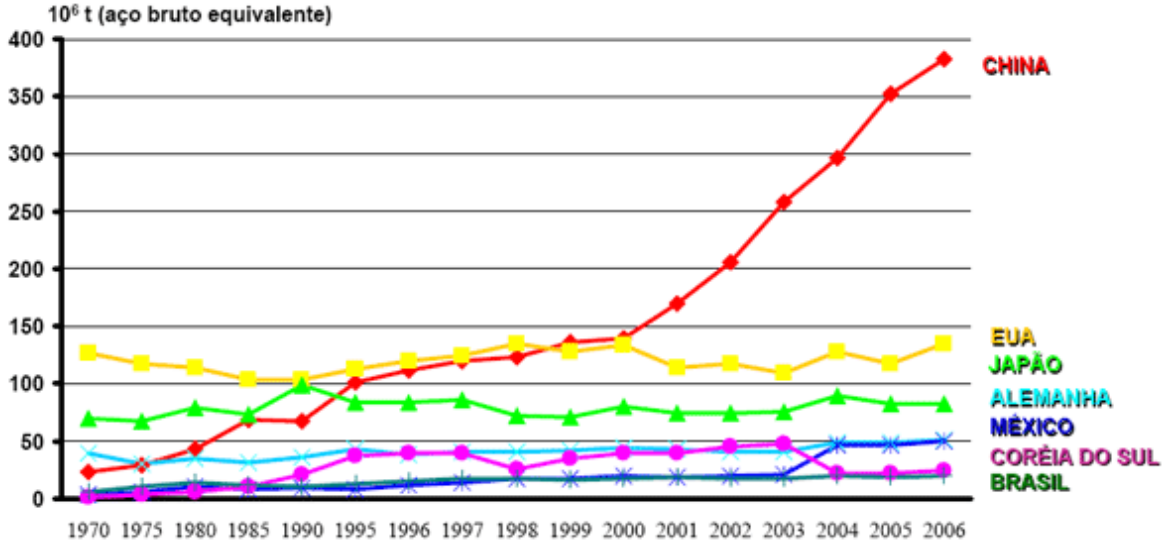

Figura 1 - Demanda Mundial por Aço
Fonte: Instituto Brasileiro de Siderurgia (2007)

Na MRS Logística S/A, cuja operação será tema do presente trabalho, o aumento da demanda por aço apresenta grande importância, uma vez que o minério de ferro representa atualmente aproximadamente 75% da geração de receita bruta. O estudo de alternativas de aumento da capacidade de transporte foi identificado como necessidade para atendimento à demanda prevista para os próximos anos.

A MRS Logística conduziu nos últimos anos alguns estudos para implantação de trens com Tração Distribuída, ou seja, trens com locomotivas distribuídas ao longo da composição com vistas a aumentar a capacidade de transporte. De fato, os estudos mostram um ganho expressivo de capacidade com a implantação da Tração Distribuída nos corredores ferroviários que ligam as regiões das minas aos portos de exportação de minério de ferro, pois esta permite a configuração de trens maiores, gerando um aumento da tonelada útil transportada por composição e mantida a mesma velocidade média de circulação.

No entanto, ainda não foram realizados na companhia estudos detalhados da operação com Tração Distribuída nas regiões de carga e descarga de minério de ferro. Existem algumas complicações para operação de trens com Tração Distribuída nas regiões de carga e descarga da malha da MRS Logística devido à necessidade de altos investimentos em ativos e infraestrutura para suportar de maneira adequada as operações desses trens.

Com o objetivo de realizar um planejamento integrado de todo o sistema formado pela malha da MRS Logística faz-se necessário avaliar os ganhos proporcionados com a operação desses trens também na região de descarga, bem como o investimento em pátios de manobra para viabilizar sua operação. Por isso, está em fase de estudo a construção de um grande pátio na região de descarga a fim de viabilizar as operações com Tração Distribuída e servir de ponto de estoque de trens carregados para oferta aos terminais dos clientes. As obras de construção deste pátio, denominado Santa Rosa, estão previstas para serem concluídas em 2014.

Desse modo, a utilização de técnicas de simulação computacional permite a avaliação de alternativas de modelos operacionais para o longo prazo antes que seja necessário o investimento de capital em ativos e em infraestrutura de via permanente.

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho envolve o estudo de capacidade do sistema de descarga de minério de ferro da malha da MRS Logística através de simulação de eventos discretos. A simulação contemplará as operações no pátio Santa Rosa e nos terminais de descarga de minério de ferro localizados na região de Sepetiba, no estado do Rio de Janeiro. Com base nas operações previstas neste pátio, será feita a comparação da capacidade de atendimento do modelo atual de formação de trens em relação a outras duas configurações de trens com Tração Distribuída, levando-se em consideração também o dimensionamento do estoque de locomotivas de manobra a serem utilizadas no pátio Santa Rosa para atendimento da demanda de transporte de minério de ferro. O resultado do trabalho envolve o desenvolvimento de solução logística completa de atendimento à demanda de descarga de minério de ferro no longo prazo.

1.4 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é comparar o desempenho do modelo atual de formação de trens, 134 vagões, com dois cenários de combinações de trens com Tração Distribuída, 160 e 202 vagões, para operação na região de descarga de minério de ferro da malha da MRS Logística a fim de conciliar capacidade de transporte com a demanda prevista nos próximos anos.

Além disso, o estudo tem como objetivo secundário dimensionar o estoque de locomotivas de manobra no pátio necessárias para operação frente aos cenários de demanda previstos para o ano de 2014.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Este trabalho consiste na construção de modelo de simulação de eventos discretos para estudar o dimensionamento da capacidade do sistema de descarga de minério de ferro de uma empresa de logística ferroviária.

Com base nos resultados gerados pela lógica de simulação elaborada será identificada a capacidade dos modelos operacionais de atender a demanda prevista, conforme cenários pré-estabelecidos. Os resultados serão analisados por meio de Planejamento de Experimento com um fator de análise (ANOVA).

O dimensionamento da quantidade de locomotivas de manobra no pátio será realizado através de análise de sensibilidade do tempo médio de processamento de trens no pátio em função da quantidade de locomotivas de manobra em estoque para o nível de demanda referente ao ano de 2014, quando o pátio estará totalmente operacional.

É importante ressaltar, no entanto, que os modelos de simulação oferecem uma aproximação dos resultados esperados na operação do sistema real, sendo esta uma limitação do método escolhido para o estudo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho de conclusão de curso será estruturado em seis capítulos.

O primeiro capítulo tratará da escolha do tema, objetivos, justificativas e metodologia adotada. O capítulo 2 tratará da revisão bibliográfica sobre a análise de

capacidade do pátio a ser estudado. No capítulo 3, é apresentada a empresa onde foi feito o estudo de caso e considerações gerais sobre a estratégia de capacidade da empresa para o longo prazo. O capítulo 4 tratará da descrição das lógicas utilizadas no modelo de simulação, algoritmos de circulação de trens e premissas adotadas. A análise dos resultados da simulação será apresentada no capítulo 5. Por fim, o Capítulo 6 apresentará as conclusões sobre a aplicação da ferramenta de simulação de eventos discretos para análise da capacidade do sistema de descarga de minério de ferro.

1.7 CRONOGRAMA

A Tabela 1 representa o cronograma proposto para o projeto com as etapas a serem desenvolvidas.

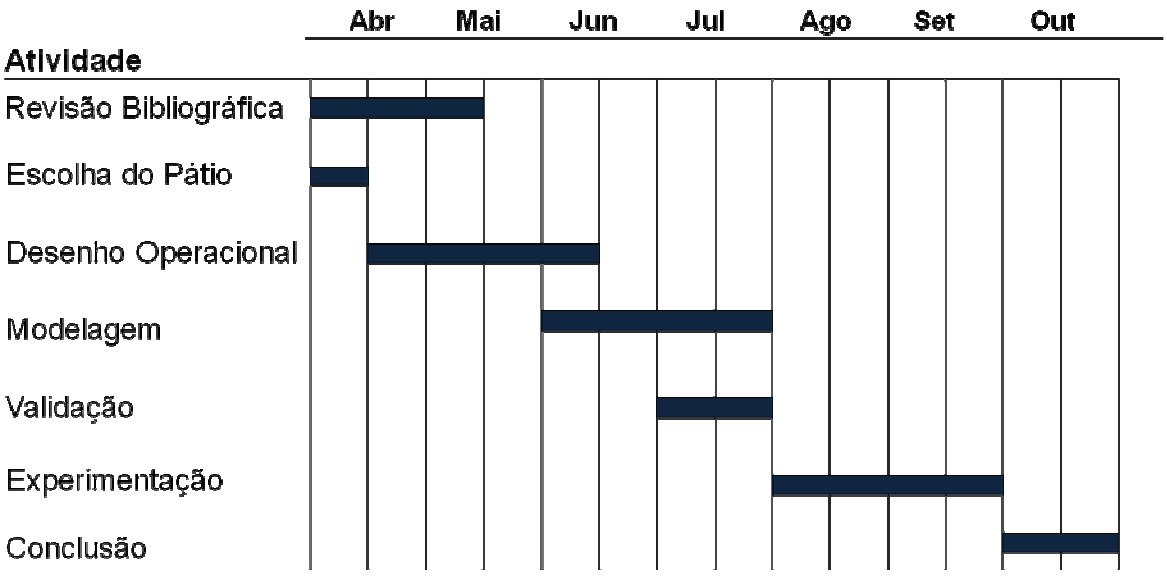

Tabela 1- Cronograma do Projeto

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 TRANSPORTES

2.1.1 Conceitos Básicos de Transportes

Para Bowersox (1986), “o transporte é a área operacional da logística que movimenta geograficamente o estoque”. Quanto mais desigual for a distribuição dos recursos mais importante será o setor de transportes.

De acordo com Alvarenga e Novaes (2000), para se organizar um sistema de transporte é necessário ter uma visão sistêmica, envolvendo planejamento, mas para isso é preciso que se conheçam: os fluxos nas diversas ligações da rede; o nível de serviço atual e o desejado; as características ou parâmetros sobre a carga; os tipos de equipamentos disponíveis e suas características.

Para FLEURY (2000), as mudanças econômicas vêm transformando a visão empresarial sobre logística, que passou a ser vista não mais como uma simples atividade operacional, um centro de custos, e sim como uma atividade estratégica, uma ferramenta gerencial que pode representar vantagem competitiva.

Portanto, o setor de transportes é necessário a qualquer atividade econômica, interferindo diretamente na eficiência de diversos outros setores da economia, absorvendo aproximadamente dois terços do total dos custos logísticos (BALLOU, 2001)

2.1.2 Modais de Transporte

Existem diversos modais de transporte, cada qual com suas características positivas e pontos negativos. Conforme proposto por Lício (1995), a integração entre os modais de transporte permite aumentar a competitividade da cadeia de suprimentos.

Na literatura, são encontrados normalmente os seguintes modais de transporte:

Aquaviário: O modal aquaviário é o mais antigo modal de transporte e, sua principal característica é a capacidade de transportar grandes quantidades de material em um único frete. É adequado para o transporte de grandes volumes onde o tempo de trânsito não seja um fator de grande relevância.

Rodoviário: A principal característica deste modal é a elevada flexibilidade proporcionada. É indicado para deslocamentos de pequenas e médias distâncias e sistemas de distribuição de varejo devido à sua flexibilidade.

Aeroviário: Este modal apresenta como maior vantagem sobre os demais a alta velocidade no transporte de médias e grandes distâncias. Possui elevado custo, o que inviabiliza seu uso quando o fator tempo não é de extrema relevância para o transporte em questão.

Dutoviário: A utilização do modal dutoviário está relacionada principalmente ao transporte de matérias-primas para outros processos, tais como petróleo, gás natural, produtos químicos, etc. Apresenta elevado custo fixo de implantação, mas reduzido custo de operação.

Dentre os modais de transporte disponíveis, destaca-se no presente trabalho o modal ferroviário, que será descrito no item abaixo:

2.1.3 Modal Ferroviário

Com relação aos custos, o modo ferroviário apresenta altos custos fixos em equipamentos, terminais e vias férreas entre outros. Porém, seu custo variável é baixo. Embora o custo do transporte ferroviário seja inferior ao rodoviário, este ainda não é amplamente utilizado no Brasil, como o modo de transporte rodoviário.

No Brasil, o transporte ferroviário é utilizado para o deslocamento de grandes quantidades de produtos homogêneos, por distâncias relativamente longas, tais como minério de ferro, e *commodities* agrícolas. (RIBEIRO, *et al), 2002.*

2.1.3.1 Elementos da Ferrovia

Todo sistema ferroviário é formado pelos seguintes elementos destacados abaixo, conforme proposto por Bustamante (2005):

Via Permanente: A via permanente é assim denominada por razões históricas, uma vez que era o único modal no século XIX a manter-se em operação nas épocas chuvosas.

A via permanente é dividida em Infraestrutura, que compreende as atividades para oferecer capacidade de suporte tais como pontes, viadutos e túneis; e Superestrutura, que compreende o lastro, dormentes e trilhos, cuja função é garantir o rolamento dos veículos e distribuição das cargas sobre os elementos da infraestrutura.

Material Rodante: Os veículos da ferrovia são classificados como material rodante e possuem duas subclasses, a saber: material rodante de tração, que compreende as locomotivas e automotrizes; material rodante rebocado compreende os vagões de carga e passageiros.

Terminais: Os terminais são pontos de acessibilidade, onde os trens são carregados ou descarregados, manobrados, consolidados ou estacionados para fins de cruzamento ou espera. Os terminais podem ser de extremidade ou intermediários.

Os terminais intermediários são também conhecidos como pátios. Segundo a Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários, um pátio ferroviário pode ser classificado como sendo uma área de esplanada em que um conjunto de vias é preparado para formação de trens, manobras e estacionamento de veículos ferroviários, cruzamento entre trens e outros fins. Alguns pátios, classificados como pátios pulmão, são utilizados pelos trens para aguardar em fila, fazendo estoque de segurança de material para os terminais de descarga.

2.2 CAPACIDADE DE TRANSPORTE

2.2.1 Conceitos Básicos de Estratégia de Capacidade

Conforme Hayes et al (2005), a capacidade de produção é de difícil definição e mensuração com precisão, uma vez que esta representa uma complexa integração entre espaço físico, taxas de produção, transporte, recursos humanos, políticas de atendimento entre outros fatores.

O desafio está em definir uma estratégia de capacidade que suporte as decisões de quando e quanto investir para se ajustar às mudanças de longo prazo na demanda. A literatura define três políticas para aumento de capacidade, quais sejam:

Capacidade conduz a demanda

Nesta política de capacidade, a empresa deve construir e manter capacidade acima da necessária, mantendo um colchão de capacidade a fim de que a probabilidade de falta de produtos seja diminuída. A adoção deste tipo de estratégia está baseada num aumento do nível

de serviço, que piora o desempenho em termos de custos em um dos elos da cadeia para alcançar o ponto ótimo da cadeia de suprimentos como um todo.

Capacidade em equilíbrio aproximado com a demanda

Esta política de aumento de capacidade consiste em tentar igualar a capacidade à demanda, realizando ajustes periódicos. Neste caso, a probabilidade de se ter estoque em excesso tende a ser igual à probabilidade de não ter capacidade para atendimento da demanda.

Capacidade defasada em relação à demanda

Este política de aumento de capacidade resulta num colchão de capacidade negativo. Portanto, a probabilidade de faltar produtos para atender à demanda é maior que a probabilidade de haver excesso de estoque. Esta é considerada a mais conservadora das três políticas, pois garante uma utilização maior da capacidade instalada e um retorno mais rápido do investimento nas instalações.

2.2.2 Capacidade de Transporte em Ferrovias

No início da implantação das estradas de ferro, a capacidade de transporte era uma questão de haver ou não linhas férreas. Entretanto, com o crescimento da demanda por transporte ferroviário e o conseqüente aumento do número de trens trafegando na malha, começaram a surgir problemas relacionados à capacidade das ferrovias. Inicialmente, os problemas foram resolvidos através da duplicação das estradas de ferro, mas com o passar do tempo outras soluções tecnológicas surgiram para desempenhar um papel de grande importância no aumento da capacidade dos sistemas de transporte ferroviário, tais como sistemas de sinalização e tecnologias de manutenção da via.

Krueger (1999) define que capacidade na ferrovia é equivalente ao máximo de volume de trens por dia que pode ser transportado segundo um modelo de operação de tráfego sem desrespeitar quaisquer restrições pré-estabelecidas.

Ainda segundo Krueger (1999), existem diferentes definições de capacidade que podem ser usados nos estudos de performance das ferrovias:

Capacidade Teórica

Representa o número máximo de trens que podem trafegar num determinado fluxo por um período de tempo definido e com as composições distribuídas uniformemente pela malha, formando um intervalo de tempo constante entre elas. Esse parâmetro define o limite máximo de transporte ao considerar um movimento homogêneo dos trens. É facilmente calculado por meio de métodos analíticos, mas apresenta deficiência na medida em que assume premissas pouco factíveis e ignora fatores importantes como confiabilidade de ativos, tornando impossível que se opere uma ferrovia em tais níveis de capacidade.

Capacidade Prática

Representa um limite prático para a circulação de trens em uma malha ferroviária, pois combina fatores relacionados à infraestrutura, modelo operacional, confiabilidade de ativos e condições de distribuição das composições na malha. Segundo Krueger (1999), a capacidade prática representa aproximadamente 2/3 da capacidade teórica e para seu cálculo normalmente é necessário o emprego de simulação de eventos discretos. A técnica de simulação de eventos discretos será melhor detalhada na seção 2.4.3 do presente trabalho.

Landex (2008) coloca que a medição da capacidade ferroviária é complicada pelo fato de que as características de circulação e comprimento do trem afetam quantos trens é possível operar por hora, porque as composições mais lentas ocupam as seções do bloco por um longo tempo e podem ter menores taxas de aceleração.

Abril *et al*. (2008) fizeram um estudo sobre alguns métodos de avaliação da capacidade de transporte de trens em ferrovias de linha singela e também em redes ferroviárias complexas e colocam que a capacidade de transporte do modal ferroviário é uma variável dinâmica e dependente de diversos fatores de operação e infraestrutura do sistema.

Dentre todos os fatores colocados, a velocidade dos trens apresenta-se como um fator de fundamental importância para o cálculo da capacidade dos sistemas ferroviários, exercendo influência considerável nos resultados alcançados. (BRINA, 1982)

É possível encontrar na literatura diversos trabalhos que apresentam diferentes métodos para análise da capacidade de sistemas de transporte ferroviário.

Janic (1984) propõe um modelo de cálculo de capacidade de ferrovia que leva em consideração a probabilidade de cruzamento entre dois trens, dadas as características geométricas, condições de tráfego e regras de circulação.

Krueger (1999) desenvolveu um modelo paramétrico para cálculo da capacidade utilizado para planejamento de circulação ferroviária, que preenche a lacuna entre os modelos empíricos e os modelos de simulação de eventos discretos utilizados atualmente.

Kozan e Burdett (2005) afirmam que uma boa aproximação da capacidade de sistemas ferroviários de transporte para fins de planejamento de longo prazo é encontrar a capacidade de circulação de trens numa seção crítica num dado intervalo de tempo.

A fórmula mais conhecida e citada por Krueger (1999) para cálculo de capacidade de malhas ferroviárias em linha singela deveu-se a *Colson*, um matemático belga que dedicou seu trabalho ao estudo de ferrovias. O método desenvolvido por ele é uma fórmula dada pela seguinte expressão:

$$n = 2 \times K \times \frac{(24 - t_b) \times 60}{t_i + t_v + t_e}$$

Onde:

n: Quantidade de pares de trens/dia

K: Coeficiente de eficiência ($0 \leq K \leq 1$)

tb: tempo de manutenção por dia em horas

ti: tempo de circulação no sentido ida em minutos

tv: tempo de circulação no sentido volta em minutos

te: tempo de espera em cruzamento

Entretanto, a fórmula de cálculo proposta por *Colson* produz uma aproximação teórica da capacidade. Métodos mais aproximados de cálculo de capacidade de tráfego ferroviário podem ser obtidos através da utilização de gráfico de trens ou diagrama espaço-tempo de trens conforme a Figura 2 a seguir ou por simulação de eventos discretos:

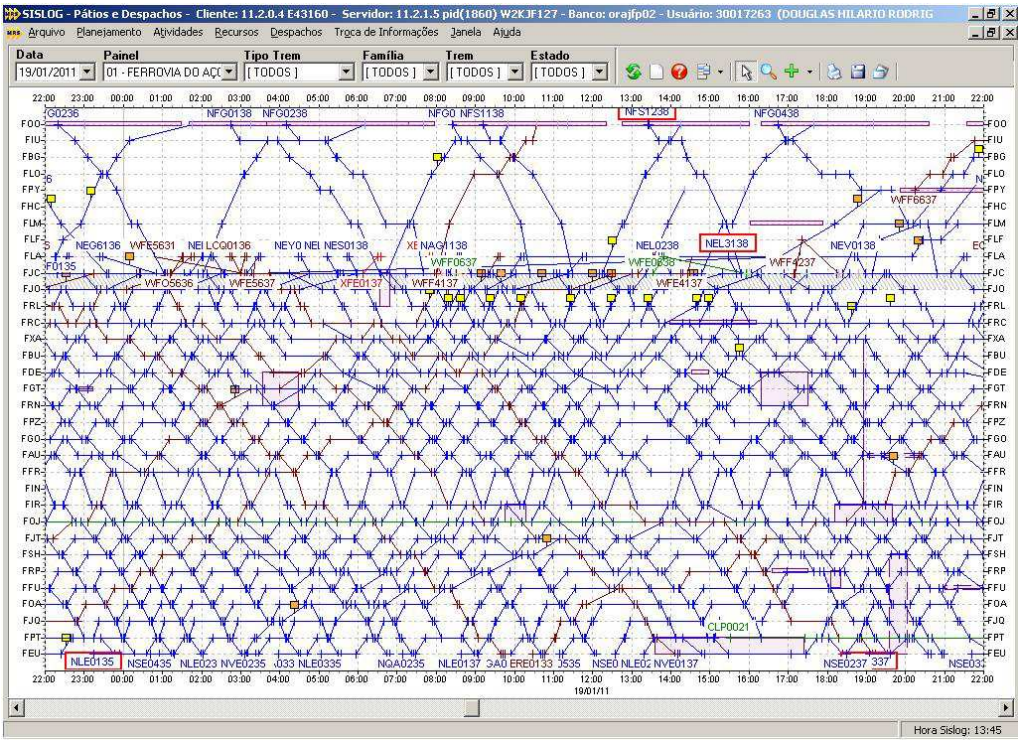

Figura 2 - Diagrama Espaço-Tempo de Trens
Fonte: MRS Logística S/A

2.3 ESTOQUE NA CADEIA DE SUPRIMENTOS

2.3.1 Conceitos Básicos de Estoques

Chopra (2008) define estoque cíclico como sendo o estoque médio mantido na cadeia de suprimentos quando cada elo produz ou compra lotes maiores que a demanda do cliente, mantendo assim certa quantidade retida.

“O gerenciamento de estoque é a atividade de planejar e controlar acúmulos de recursos transformados, conforme eles se movem pelas cadeias de suprimentos, operações e processos.” (BETTS, et. al. 2008, p. 295)

O gráfico que mostra o perfil do estoque cíclico em um elo da cadeia de suprimentos dada uma quantidade *Q* que representa o tamanho do lote de compra está demonstrado na Figura 3 a seguir:

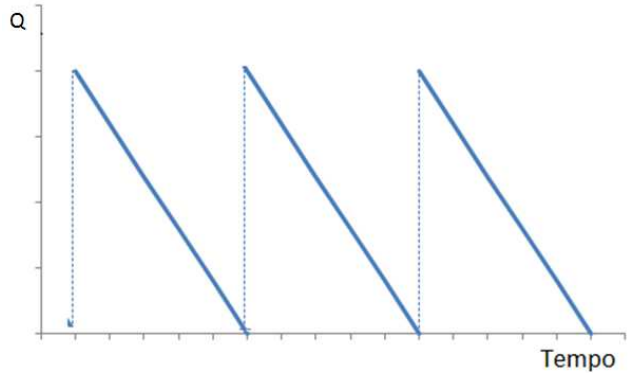

Figura 3 - Estoque
Fonte: O Autor

2.3.2 Estoque de Segurança

2.3.2.1 Definição de Estoque de Segurança

Vollmann *et* al, (2008) define que estoque de segurança assegura que a demanda do cliente possa ser satisfeita imediatamente e que o cliente não terá que esperar enquanto os pedidos são acumulados, garantindo assim um nível de serviço adequado.

Estoque de segurança é "[...] o estoque mantido com o propósito de atender a uma demanda que excede a quantidade prevista para um determinado período. O estoque de segurança existe porque as previsões de demanda são inexatas e pode haver falta de produto caso a demanda real ultrapasse o volume previsto" (CHOPRA, 2008)

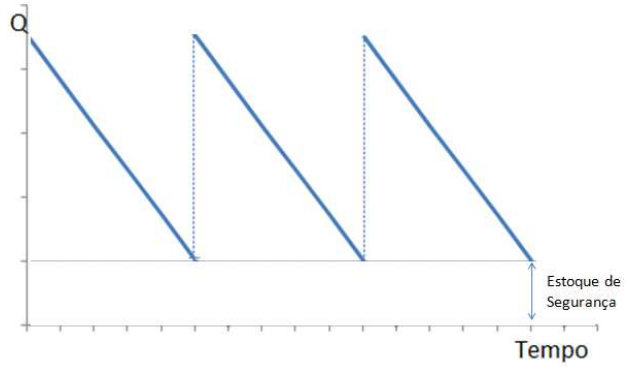

Figura 4 - Estoque de Segurança
Fonte: O Autor

A determinação do nível ótimo de estoque de segurança é função da incerteza relacionada à demanda do produto e também do nível desejado de disponibilidade do produto para o cliente, ou seja, para um mesmo nível de disponibilidade desejada do produto, quanto maior a incerteza relacionada ao suprimento ou à demanda, maior o nível de estoque de segurança exigido.

2.3.2.2 Medição da Disponibilidade do produto

Chopra (2008) coloca que a disponibilidade do produto é uma medida da capacidade da organização atender sua demanda diretamente a partir do seu estoque disponível. Alguns dos principais indicadores utilizados para medir disponibilidade de produto são:

Grau de atendimento do produto: este indicador é relacionado à porcentagem da demanda do produto que é atendida a partir do estoque. Equivale à probabilidade de a demanda do produto ser atendida com o estoque disponível.

Nível de serviço por ciclo (CSL): CSL do inglês *Cycle Service Level*, é relacionado à porcentagem dos ciclos de ressuprimento em que a demanda foi totalmente atendida. O CSL equivale à probabilidade de não haver ruptura de estoque em um ciclo de ressuprimento.

Quanto maiores o grau de atendimento do produto e o nível de serviço, maior o custo para a cadeia de suprimento. O desafio está em garantir um nível de serviço adequado ao cliente a um custo que seja viável para a cadeia remunerar.

Uma das técnicas adequadas para o estudo do balanço adequado entre o custo do serviço e tempo de espera é a modelagem da cadeia de suprimentos por Teoria das Filas.

2.4 TEORIA DE FILAS E SIMULAÇÃO

2.4.1 Conceito de Teoria de Filas

A Teoria de Filas utiliza-se de modelos de fila para representar vários tipos de sistemas de espera (sistemas que envolvem filas de alguma forma) que aparecem na prática. As fórmulas para cada modelo indicam qual a performance esperada do sistema em questão incluindo o tempo médio de espera sob uma variedade de circunstâncias. (HILLIER, 2008)

As filas em sistemas de produção representam um aumento no tempo na parcela de tempo que não agrega valor ao produto. Portanto, o estudo da capacidade do sistema e do tamanho das filas eventualmente geradas é uma etapa fundamental na determinação do nível de serviço adequado de operação. (CORREA, 2004)

2.4.1.1 Estrutura Básica dos Modelos de Fila

Um sistema de fila é formado por um conjunto de recursos conhecidos como servidores que atendem a entidades que chegam ao sistema e aguardam em fila para serem atendidas.

Os principais elementos de um sistema de filas estão representados na Figura 5 a seguir:

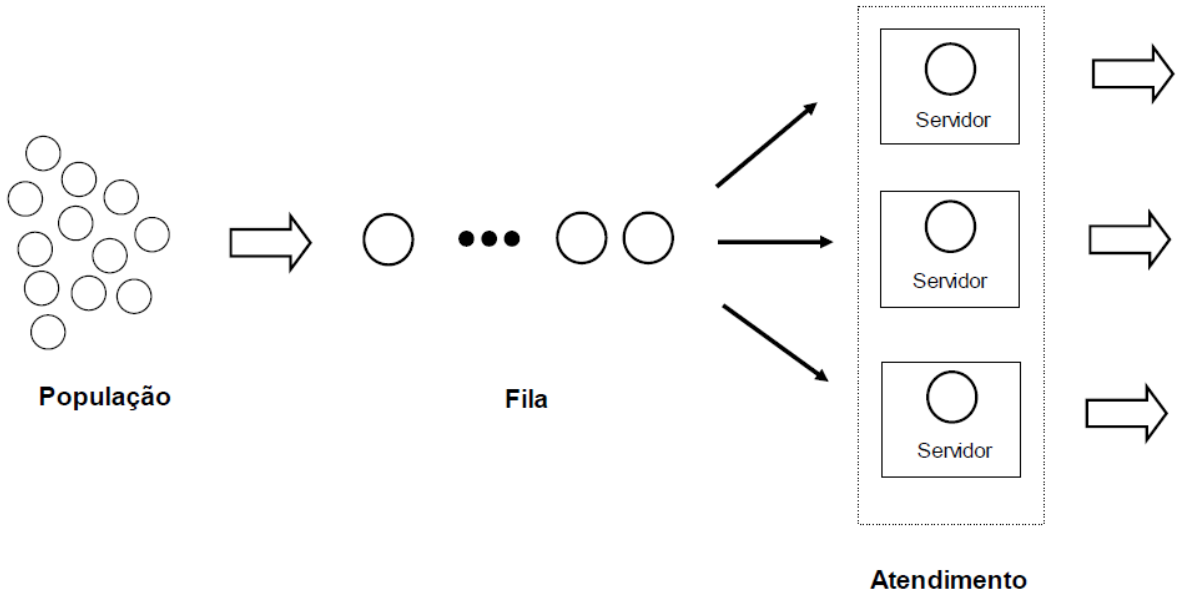

Figura 5 - Elementos de um Sistema de Filas
Fonte: Prado (2004)

- <u>População:</u> A principal característica da população que deve ser levada em consideração é o seu tamanho. Entende-se como o tamanho da população o número total de clientes que podem solicitar o atendimento em um período de tempo definido. Neste contexto a população pode ser classificada em finita ou infinita.

- <u>Processo de chegada:</u> O processo de chegada determina como os clientes vão entrar no sistema. Modela-se o intervalo entre chegadas de elementos no sistema para fins de análise da formação de filas antes do processo de atendimento.

- <u>Filas:</u> A fila é o local do sistema de filas onde os clientes aguardam antes de serem processados ou servidos. Um fator importante a ser considerado na modelagem de filas é a definição do número máximo suportado de clientes em espera. Outro fator importante a ser considerado é a disciplina da fila, ou seja, a ordem na qual os membros da fila são processados.

<u>- Processo de atendimento:</u> O mecanismo de serviço, ou processo de atendimento ocorre nos recursos conhecidos por servidores, que podem ou não estar posicionados para atender

paralelamente, como por exemplo, um conjunto de caixas de banco. O tempo transcorrido entre o início e o fim do processo de atendimento é chamado de tempo de serviço.

Entretanto, conforme colocado por Hillier (2008), quando o modelo de fila torna-se muito complexo, seu tratamento analítico torna-se inviável e a alternativa mais comum para esses casos é a obtenção de dados para desenvolvimento de um modelo de simulação da operação do sistema em estudo.

2.4.2 Simulação

Pedgen (1990) apud Freitas (2001) apresenta simulação como: "processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação". Dessa forma, o modelo pode ser usado para prever um comportamento futuro com alterações na operação.

Para Campos (2006), a simulação é uma representação de um processo do mundo real; ela envolve a geração de um sistema artificial e, através da observação deste sistema são tiradas as conclusões a respeito das características de operação do sistema real.

Outra definição é dada por Banks et. al.: "simulação é a imitação da operação de um processo real ou sistema ao longo do tempo". Segundo KELTON et. Al. (2004) simulação computacional está relacionada ao estudo de sistemas do mundo real por meio de avaliação numérica utilizando softwares para imitar as operações do sistema, normalmente ao longo do tempo.

Ainda segundo Freitas (2001), a simulação permite que sejam estudados sistemas que ainda não operam, buscando o desenvolvimento de projetos eficientes antes de iniciar mudanças físicas e ainda trazendo ganhos de produtividade e qualidade. As razões mais comuns para uso de modelos simulados englobam o fato do sistema ainda não existir, ou por experimentos no sistema real envolverem grandes gastos ou não serem apropriados.

2.4.2.1 Método de Monte Carlo

Segundo Freitas (2001), o *Método de Monte Carlo* (MMC), foi criado a partir da revisão da técnica matemática conhecida desde o século XX durante o trabalho secreto de cientistas do projeto *Manhattan*, para desenvolvimento da bomba atômica. Posteriormente, em 1985, Dudewics publicou artigo intitulado *"The Monte Carlo Method"*.

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

2.4.3 Simulação Computacional de Eventos Discretos

O objetivo de um modelo de uma simulação de eventos discretos é o de representar as atividades nas quais as entidades participam e, assim, observar algo sobre o comportamento dinâmico do sistema. O estado do modelo se mantém constante entre a ocorrência dos eventos, e um retrato completo do estado dinâmico do modelo é obtido por meio do avanço da simulação de um evento para o próximo (BANKS, 1998)

Freitas (2001) define as etapas para realização de um estudo de simulação, a saber:

- Formulação e análise do problema: Nesta etapa serão definidos os objetivos do projeto de simulação através da correta formulação do problema a ser estudado.

- Planejamento do projeto: Nesta fase do projeto de modelagem e simulação deve-se certificar que todos os recursos necessários para o desenvolvimento do estudo estão disponíveis. Nesta etapa serão definidos também todos os cenários a serem investigados e um cronograma das próximas etapas.

- Formulação do modelo conceitual: A formulação do modelo conceitual consiste na construção de esboço do sistema, normalmente através de fluxogramas e lógicas simplificadas a fim de levar a equipe de trabalho a um melhor entendimento do nível de detalhamento necessário, a forma de leitura dos dados de entrada e a forme de apresentação dos resultados.

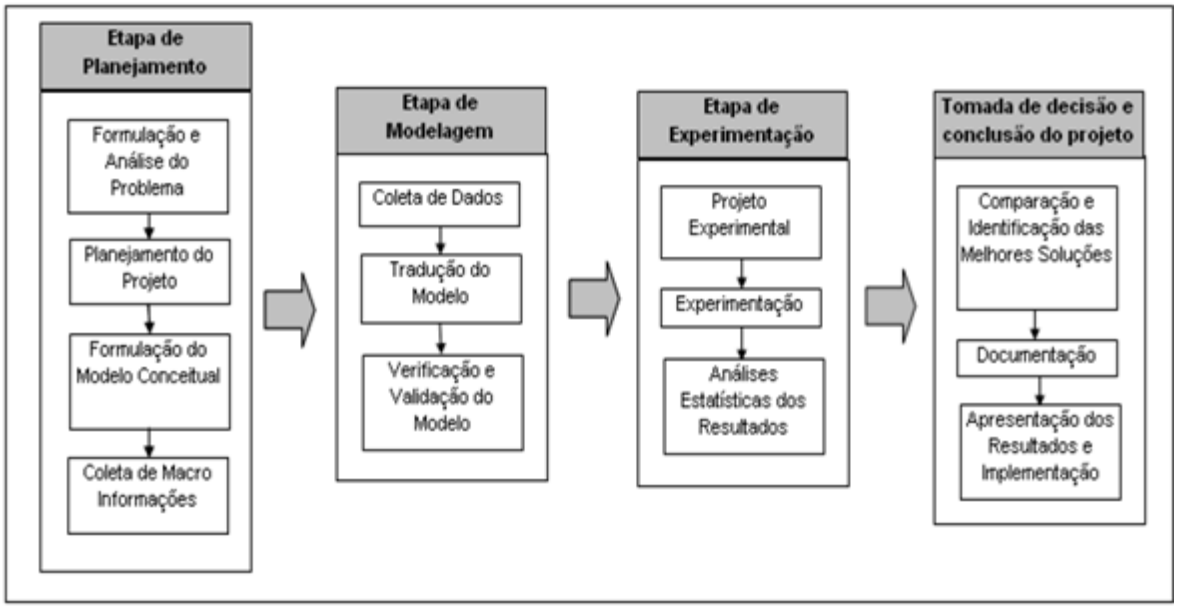

Figura 6 - Passos para formulação de um estudo de simulação
Fonte: Freitas (2001) Adaptado

- Coleta de macro-informações e dados: As macro-informações, advindas de observações ou bases de dados históricas, são aquelas que servem para direcionamento dos futuros esforços para definição dos parâmetros do modelo.

- Tradução do modelo: Na etapa de tradução do modelo, as lógicas e fluxogramas do sistema real são codificados para a linguagem do pacote computacional apropriado.

- Verificação e validação: Uma vez traduzido o sistema real para o modelo de simulação devem ser conduzidos testes para confirmar se o modelo opera de acordo com o esperado e os resultados representam valores confiáveis.

- Projeto experimental final: Nesta etapa são projetados os experimentos a serem realizados de acordo com o que foi planejado.

- Experimentação: Esta etapa do projeto compreende a execução das simulações para geração dos resultados que serão analisados nas etapas seguintes.

- Análise estatística dos resultados: Após a execução das simulações, a etapa de análise estatística dos dados consiste na utilização de inferências estatísticas para realização de estimativas de desempenho dos cenários gerados.

- Comparação e identificação dos melhores resultados: Quando o projeto de modelagem e simulação objetiva a comparação de diferentes cenários segundo algum critério de decisão, nesta etapa são feitas as comparações a fim de que seja identificado a melhor dentre as alternativas estudadas.

- Documentação: Nesta etapa, os resultados e conclusões das simulações geradas deverão ser organizados de forma que sejam registrados os parâmetros e premissas utilizados para os cenários e para que sirva de guia para futuras alterações.

- Apresentação dos resultados e Implementação: Os resultados do projeto devem ser mostrados de forma clara e objetiva e devem refletir os esforços de toda a equipe para chegar respostas às perguntas do início do projeto.

Os modelos de simulação são baseados em sistemas reais, e contêm muitos dados para serem processados, sendo empregado o uso de computadores com softwares de simulação. Entre os softwares mais conhecidos estão o Arena®, AutoMod, ProModel e SIMUL8.

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

Além de ser um software de simulação, o Arena® possui outras ferramentas úteis para o desenvolvimento dos modelos e análise dos resultados, entre elas: o Input Analyser, que permite uma análise estatística dos dados coletados para determinar qual curva de distribuição de probabilidade melhor aproxima dos dados reais; o Output Analyser, que permite análises estatísticas dos resultados da simulação; e o OptQuest, que permite otimizar o modelo de acordo com os parâmetros desejados.

2.4.4 Análise Estatística de Dados na Simulação Computacional de Eventos Discretos

A realização de simulações computacionais visa a obtenção de resultados por meio de replicação de experimentos. Freitas (2001) estabelece que durante o processo de análise de dados de entrada da simulação de eventos discretos sejam identificadas as distribuições teóricas de probabilidade que representam da melhor maneira possível o comportamento do sistema real. Os dados de saída da simulação permitem a realização de inferências e previsões sobre o funcionamento do sistema real.

Freitas (2001) coloca que os modelos de simulação apresentam comportamento estocástico assim como os sistemas reais que estão representando. Devido a essa

aleatoriedade, esses resultados devem ser tratados e analisados com o mesmo critério e rigor estatístico que seria utilizado para o sistema real.

2.4.5 Distribuições de Probabilidade

Segundo Montgomery (2003), no estudo de sistemas que apresentam comportamento estocástico, freqüentemente deseja-se estudar a probabilidade com que uma determinada variável aleatória assume um valor em particular.

A Distribuição de probabilidade de uma variável aleatória X qualquer é uma descrição das probabilidades associadas a cada valor possível de X

Seja uma função de probabilidade $f(x_i) = P(X = x_i)$. Então $f(x_i)$ é um distribuição de probabilidade discreta se, e somente se, $f(x_i) \geq 0$ para todo x_i e $\sum_{i=1}^{n} f(x_i) = 1$.

2.4.5.1 Principais Distribuições de Probabilidade Contínuas

- **Normal:** A Distribuição Normal, também conhecida como distribuição de De Moivre-Gauss, é, conforme ressaltado por Montgomery (2003), a distribuição mais largamente utilizada para estudos de variáveis aleatórias. Essa distribuição apresenta uma forma de sino, com dados distribuídos simetricamente em torno da média, conforme observado na Figura 7:

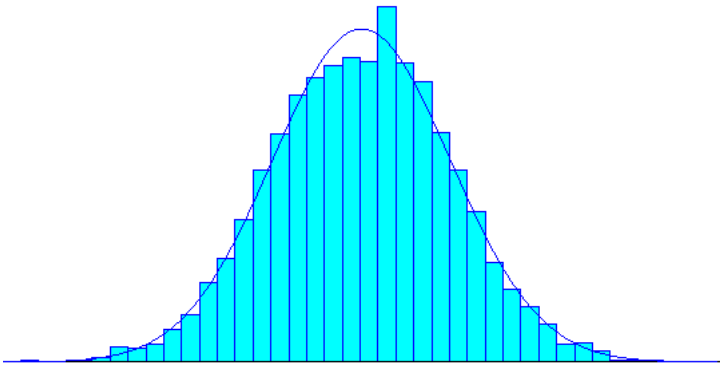

Figura 7 - Distribuição Normal

Freitas (2001) ressalta a importância do Teorema Central do Limite em estudos dessa natureza. O Teorema Central do Limite estabelece que a soma ou média resultante de um grande número de amostras aleatórias e independentes é distribuída normalmente. Como será visto adiante, esse teorema será útil para o processo de análise dos resultados das simulações.

- **Uniforme:** A distribuição Uniforme é definida por dois parâmetros, que representam o limite inferior e superior dos valores possíveis para a variável aleatória. Além disso, a distribuição Uniforme caracteriza-se por apresentar probabilidades iguais para todos os valores dentro do intervalo, conforme mostrado na figura abaixo:

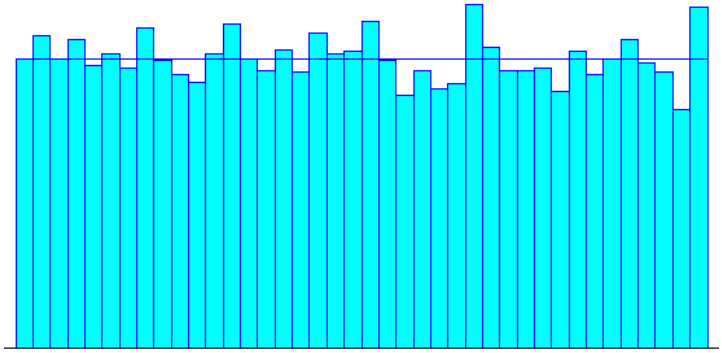

Figura 8 - Distribuição Uniforme

- **Triangular:** A Distribuição triangular é parametrizada quando se conhece o limite inferior e o superior, bem como o valor mais provável de uma variável aleatória contínua. A Figura 9 a seguir mostra um exemplo de distribuição triangular.

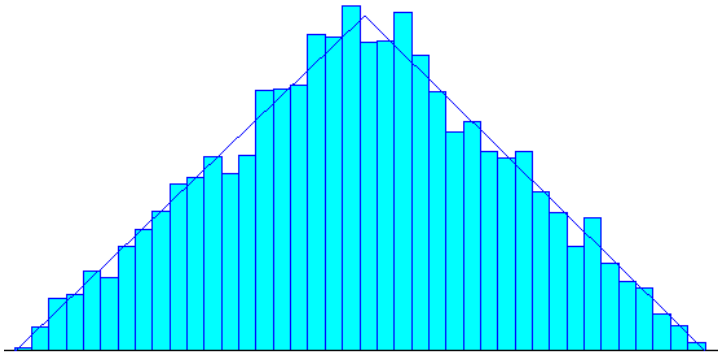

Figura 9 - Distribuição Triangular

- **Exponencial:** O nome dessa distribuição deve-se à função exponencial na função densidade de probabilidade. A principal característica da distribuição exponencial é a propriedade de perda de memória, que estabelece que $P(X < t_1 + t_2 \mid X > t_1) = P(X < t_2)$.

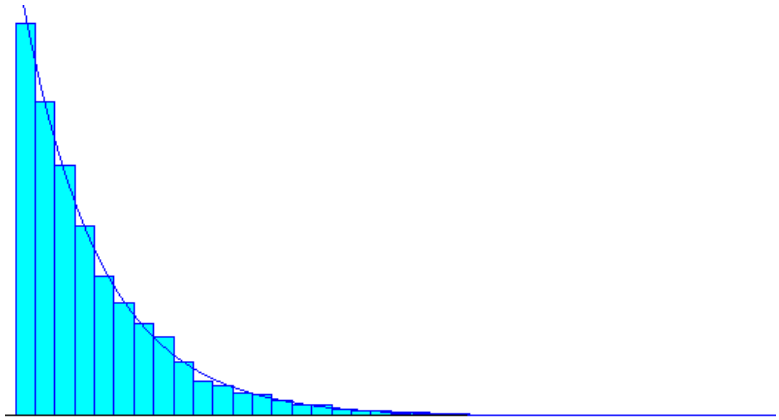

Figura 10 - Distribuição Exponencial

- **Lognormal:** A distribuição Lognormal é obtida através do logaritmo natural de uma variável aleatória distribuída Normalmente. Freitas (2001) observa que quando a variável aleatória em estudo é resultante de uma combinação de diversas variáveis aleatórias positivas, é muito comum que esta variável apresente uma distribuição Lognormal.

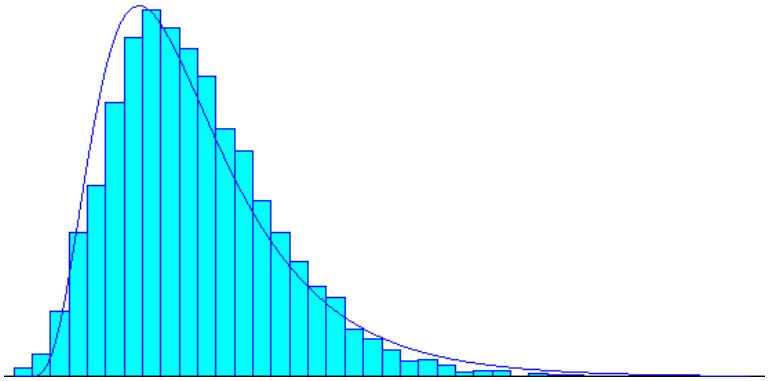

Figura 11 - Distribuição Lognormal

2.4.6 Experimentos Aleatórios

Montgomery *apud.* Freitas coloca que um experimento é um teste, em que as alterações são realizadas em um ambiente controlado dos fatores envolvidos no sistema, de maneira a possibilitar a identificação dos impactos ocorridos sobre as respostas.

A realização de experimentos com um único fator de comparação é realizada através de Análise de Variância (ANOVA). Segundo Montgomery (2003), para um experimento com *a* níveis diferentes de um único fator as observações podem ser descritas através do modelo linear estatístico:

$$y_{ij} = \mu + \pi_i + \varepsilon_i$$

Para i = 1, 2, ..., a e j = 1, 2, ..., n, onde y_{ij} é uma variável aleatória denotada pela ij-ésima observação, μ é um parâmetro comum a todos os níveis dos fatores, sendo denominado média global do experimento, π_i é o parâmetro do modelo associado ao i-ésimo nível do fator e ε_{ij} é o componente de erro aleatório.

Considerando que os fatores de erro aleatórios ε_{ij} sejam normalmente distribuídos e independentes entre si com média zero e variância σ^2, cada nível do fator pode ser interpretado como uma distribuição Normal com média $\mu_i + \pi_i$ e variância σ^2. Além disso, a realização de estudo de ANOVA requer que os dados das populações tenham variâncias iguais.

Baseado nas premissas acima, Montgomery (2003), afirma que neste tipo de experimento, o interesse está no teste da igualdade das médias π_i, que é o equivalente a testar a seguinte hipótese:

Ho: $\pi_1 = \pi_2 = ... = \pi_t = 0$

H_1: $\pi_i \neq 0$ para no mínimo um *i*

Dessa forma, se a Hipótese Nula Ho for verdadeira, cada observação consistirá na média global μ mais um componente aleatório $\varepsilon_i j$, e uma mudança nos níveis do fator testado não tem efeito na resposta média global do sistema estudado.

Montgomery (2003) coloca ainda que a variabilidade é dividida em dois componentes durante um estudo de ANOVA. O teste de hipóteses mostrado acima é baseado na comparação de duas estimativas da variância da população, em que a variabilidade total é dada por: $sQ_T = sQ_F + sQ_E$, em que SQt é a soma quadrática total dos erros, SQf e SQe são os somatórios dos erros dos tratamentos dos fatores e dos erros respectivamente. Para análise dos resultados, os dados são geralmente sumarizados na Tabela ANOVA.

Fonte	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F
Fatores	SQf	a -1	MQf	MQf / Mqe
Erro	Sqe	a(n - 1)	Mqe	-
Total	SQt	na - 1	-	-

Tabela 2 - Tabela ANOVA

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 A MRS LOGÍSTICA S/A

A MRS Logística S.A. é a concessionária ferroviária que opera a chamada Malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal, com aproximadamente 1.643 km de linhas férreas passando pelos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. A malha ferroviária da MRS pode ser dividida em quatro corredores principais, a saber: Linha do Centro, Ferrovia do Aço, Paraopeba e Ramal São Paulo (ver Figura 12).

Figura 12 - Malha da MRS Logística S/A
Fonte: MRS Logística

As operações da MRS Logística estão focadas no transporte ferroviário de cargas atendendo a indústria siderúrgica, cimenteira e da construção civil, mineração, agrícola, transporte de contêineres, carvão, coque, granéis minerais, extração vegetal e celulose, entre outras mercadorias, sendo o transporte dividido em duas categorias: Heavy-Haul e Carga Geral.

O transporte do tipo Carga Geral tem características diferenciadas como menores volumes e produtos distintos no mesmo trem. Envolve diversos produtos e clientes, o que implica em pontos de carga e descarga ao longo de todo o trecho de circulação. A operação de trens de carga Geral é baseada em grade horária, com horários fixos de chegada e partida em cada local.

O transporte classificado como sendo do tipo Heavy-Haul apresenta características como grandes volumes e grande dependência do modal ferroviário. As cargas de Heavy-Haul possuem características de serem de maior volume como produtos de minério de ferro, bauxita e carvão e coque para siderurgia, representando cerca de 75% do volume transportado pela MRS. O transporte Heavy-Haul é realizado por trens unitários (apenas um tipo de carga), com circulação baseada em tonelagem e com operações divididas em 4 etapas principais: Carga, Circulação Carregado, Descarga e Circulação Vazio. O presente trabalho abordará de maneira mais específica as operações na etapa de descarga dos trens Heavy-Haul.

3.2 OPERAÇÃO DE DESCARGA DE MINÉRIO DE FERRO

3.2.1 Descarga na Malha da MRS

Os principais destinos de minério de ferro são CSN (Volta Redonda), COSIPA (Piaçaguera ou São Bento), Porto de Sepetiba, Porto da Ilha de Guaíba e outros com menor volume de transporte mensal como Belgo (Juiz de Fora), Açominas e Patrag (Ouro Branco).

Os terminais de descarga de minério de ferro com maior volume de transporte na malha da MRS Logística S/A estão localizados no litoral do estado do Rio de Janeiro, mais especificamente na região de Sepetiba.

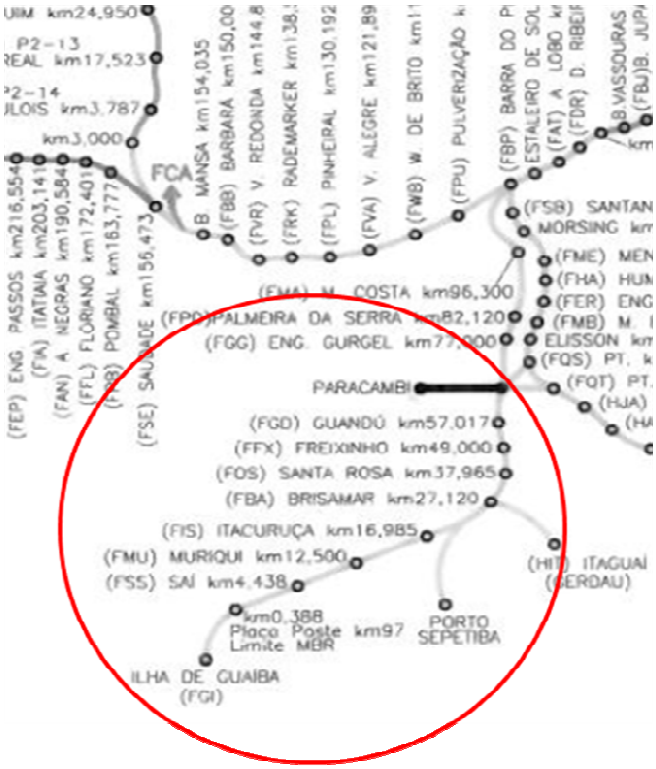

Figura 13 - Região de Descarga de Minério de Ferro (RJ)
Fonte: MRS Logística (2011) Adaptado

A eficiência de operação dos terminais depende principalmente da tecnologia de descarga utilizada, quais sejam as duas predominantes na região citada acima: Virador de Vagões e descarga por Moega.

3.2.1.1 <u>Descarga por Virador de Vagões</u>

Virador de Vagões (car dumper) é o equipamento com a função de virar os vagões carregados com granéis em geral. A máquina puxa a composição um a um, até o ponto de descarga, onde o Virador prende o vagão através sistemas hidráulicos e gira 180°, até que toda a carga seja despejada para um sistema de correias transportadoras para ser direcionado até as pilhas de minério no terminal.

Figura 14 - Virador de Vagões
Fonte: fotosdobrasil.fot.br

3.2.1.2 Descarga por Moega

O processo de descarga por moega requer a utilização de vagões específicos, do tipo *Hopper*, cuja principal característica é a existência de portas no fundo do vagão capazes de escoar a carga, quando acionadas. O processo de descarga por moega é mais demorado que o processo de descarga por virador de vagões, apresentando uma menor eficiência do ponto de vista de tempo gasto para descarga de uma mesma quantidade de vagões.

Figura 15 - Descarga de Vagões em Moega
Fonte: MRS Logística

3.2.2 Terminais de Descarga de Minério

A MRS Logística S/A atende demandas de diversos terminais em sua malha entre terminais de carga e descarga de minério, commodities agrícolas e terminais intermodais. Os

terminais de maior volume de movimentação de cargas são os terminais utilizados nos fluxos de exportação de minério, dentre os quais se destacam como sendo de grande importância para as operações da companhia aqueles listados na tabela abaixo:

Terminal	Sigla	Cliente	Localização
Guaíba	FGI	Vale	Mangaratiba
CPBS	FXS	Vale	Sepetiba
Tecar	FTX	CSN	Sepetiba
CSA	HSG	CSA	Itaguaí
Porto Sudeste	LLX	LLX	Itaguaí

Tabela 3 - Terminais de Descarga de Minério de Ferro
Fonte: MRS Logística (Adaptado)

Além disso, o terminal Tecar, do cliente CSN, também realiza operações de importação de carvão mineral para siderurgia.

3.3 MODELOS DE FORMAÇÃO DE TRENS

Uma das alternativas de aumento de capacidade de transporte em estudo pela MRS Logística é o aumento do tamanho das composições, de maneira que a tonelada útil transportada por trem seja maior. Existem algumas restrições a serem consideradas no aumento do tamanho dos trens tais como a capacidade de tração das locomotivas, aspectos de sinalização, treinamento de maquinistas e infraestrutura de via e terminais.

O principal ponto a ser considerado pela área de operações da companhia é a maneira como os trens maiores vão ser formados. Atualmente, existem três alternativas em estudo para atendimento dos fluxos de transporte no longo prazo.

3.3.1 Trem de 134 vagões

O trem de 134 vagões é o modelo utilizado atualmente para todos os fluxos de minério exportação pela MRS Logística. Sua formação é composta de duas ou três locomotivas na cabeça da composição e mais 134 vagões anexados. Este modelo de formação de trem atende a todos os terminais listados na Tabela 2.

3.3.2 Tração Distribuída

Tração Distribuída é denominação dada para as composições em que existe um ou mais conjuntos de locomotivas de tração distribuídas ao longo da composição. Este modelo de

formação de trens permite a operação de trens maiores, pois reduz os esforços nos engates de vagões, mas requer que a via e os terminais estejam preparados para sua correta operação. Devido ao fato de permitir operação de trens com maior quantidade de vagões, a operação com Tração Distribuída possibilita um aumento na capacidade de transporte em corredores ferroviários para uma mesma infraestrutura de via e sinalização, pois permite o transporte de uma maior tonelagem útil por trem, sem aumentar significativamente o tempo de circulação do trem.

3.3.2.1 Trem de 160 vagões com Tração Distribuída

A formação do trem de 160 vagões compreende 2 ou 3 locomotivas na cabeça, seguidas por um grupo de 80 vagões, mais 1 locomotiva no meio e mais um grupo de 80 vagões. Atualmente, a MRS Logística opera em fase experimental um fluxo com trem de 160 vagões com Tração Distribuída. Este modelo de formação de trem atende às restrições dos terminais listados na tabela abaixo:

Terminal	Sigla	Cliente	Localização
CPBS	FXS	Vale	Sepetiba
Tecar	FTX	CSN	Sepetiba
CSA	HSG	CSA	Itaguaí
Porto Sudeste	LLX	LLX	Itaguaí

Tabela 4 – Terminais atendidos pelo trem de 160 vagões

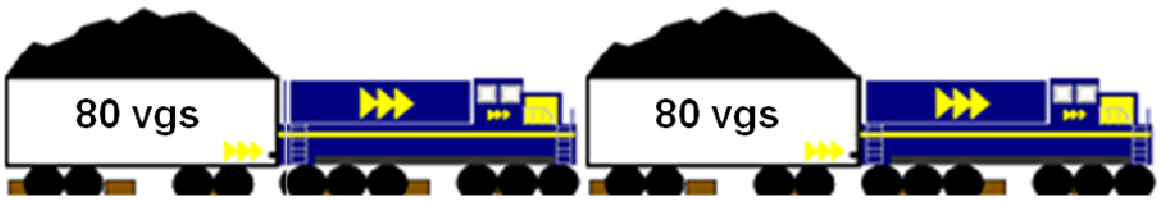

Figura 16 - Trem de 160 vagões com Tração distribuída
Fonte: O Autor

3.3.2.2 Trem de 202 vagões com Tração Distribuída

A formação do trem de 202 vagões compreende 2 ou 3 locomotivas na cabeça, mais 1 locomotiva no meio, intercaladas por grupos de 101 vagões. Com este modelo de formação de trem é possível atender apenas ao terminal Tecar, do cliente CSN, devido a restrições físicas dos demais terminais de descarga de minério de ferro.

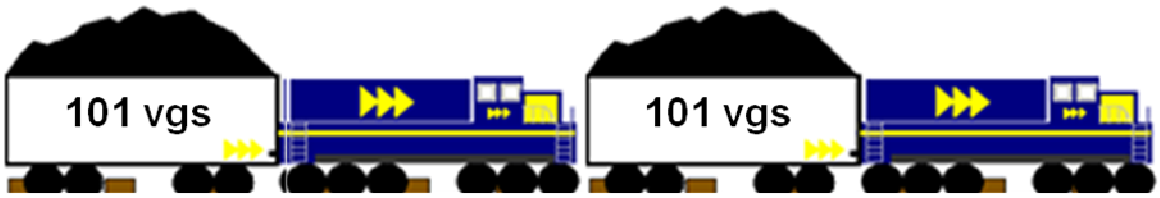

Figura 17 - Trem de 202 vagões com Tração Distribuída
Fonte: O Autor

3.4 PÁTIO SANTA ROSA

O atual pátio Santa Rosa (sigla FOS), localizado na cidade de Itaguaí, no estado do Rio de Janeiro, é um dos pátios que servem como ponto de cruzamento de trens na região da descarga de minério da malha da MRS Logística. Devido à importância estratégica da região em que o pátio está localizado para suportar o aumento de demanda previsto para os próximos anos, estão previstas obras de ampliação deste para que sirva de ponto de estocagem de trens para ofertar aos terminais.

O aumento do estoque de trens na região da descarga de minério visa o aumento no nível de serviço para atendimento dos terminais, porém implica num aumento nos custos de operação da ferrovia.

A operação prevista para o pátio Santa Rosa após a ampliação visa garantir oferta de trens de minério para os seguintes terminais de exportação de minério de ferro: Guaíba (FGI); Tecar (FTX); CPBS (FXS); CSA (HSG) e LLX, que está em fase de construção. Além disso, o pátio Santa Rosa também processará as manobras necessárias com os trens de importação de carvão com origem no terminal Tecar.

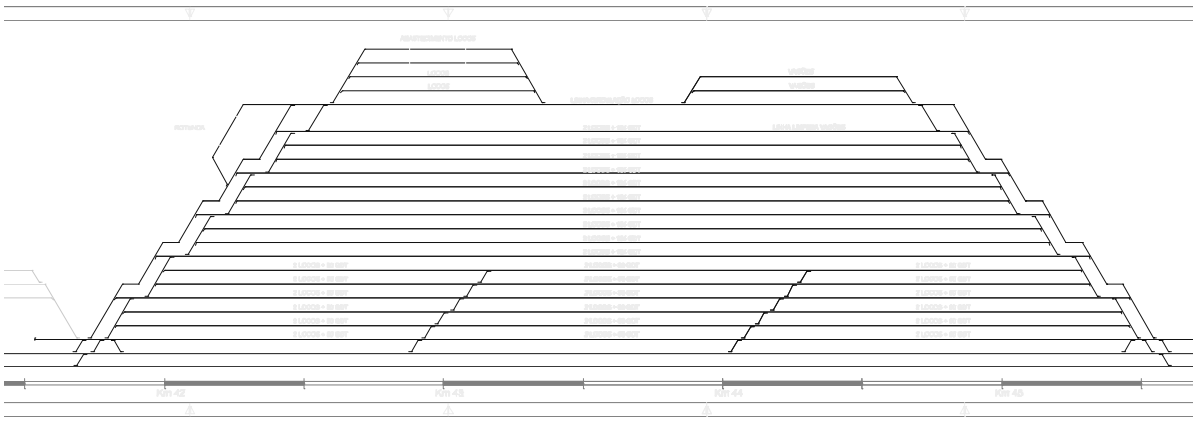

Figura 18 - Pátio Santa Rosa Ampliado
Fonte: MRS Logística

O novo pátio Santa Rosa terá 16 linhas para realização de manobras de troca de locomotivas, montagem e desmontagem de tração distribuída e estocagem de trens, com capacidades variáveis de acordo com o comprimento de cada linha, conforme mostrado na Tabela 4.

# Linha	Capacidade (vagões)
1	240
2	240
3	240
4	240
5	240
6	240
7	134
8	134
9	134
10	134
11	134
12	134
13	134
14	134
15	134
16	134

Tabela 5 - Capacidade das linhas do pátio Santa Rosa

Além das 16 linhas de manobra de trens de minério e carvão, está prevista a construção de linhas auxiliares para estocagem e abastecimento de locomotivas, recuo de vagões avariados e uma rotunda para manobra de locomotivas.

4 O MODELO DE SIMULAÇÃO

4.1 COLETA DE DADOS

Para análise da região do sistema de descarga de minério, foram coletados dados do sistema de bancos de dados da MRS, Sislog, onde todas as informações relativas ao planejamento e controle da operação ferroviária são organizadas.

Foram coletadas bases históricas de dados dos tempos de carga e descarga para cada terminal e tempos de manobra para anexação e desanexação de locomotivas.

Atividades em Santa Rosa			
Atividade	**Distribuição**	**Expressão**	**Erro Quadrático**
Anexar Locomotiva	Lognormal	LOGN(0.436, 0.285)	0.002672
Retirar Locomotiva	Gamma	6 + GAMM(9.17, 1.26)	0.016096
Link Locomotivas	Gamma	GAMM(0.0661, 5.25)	0.010002
Anexar/ Desanexar Tração Distribuída	Beta	BETA(1.67, 3.80353)	0.020921

Tabela 6 - Tempos de Atividade em Santa Rosa

Tempos de Descarga - Terminais			
Atividade	**Distribuição**	**Expressão**	**Erro Quadrático**
FGI	Lognormal	1.57 + LOGN(1.73, 0.784)	0.002109
FXS	Lognormal	1.45 + LOGN(1.83, 0.813)	0.006085
FTX	Lognormal	2 + LOGN(1.82, 1.07)	0.003877
CSA	Normal	NORM(4.64, 0.772)	0.023676
LLX*	Lognormal	1.45 + LOGN(1.83, 0.813)	0.006085
Carvão	Erlang	4 + ERLA(1.12, 5)	0.012984

Tabela 7 - Tempos etapa de descarga em terminais

Tempos Antes da Descarga - Terminais			
Atividade	**Distribuição**	**Expressão**	**Erro Quadrático**
FGI	Erlang	0.5 + ERLA(2.37, 5)	0.006992
FXS	Weibull	0.5 + WEIB(2.56, 0.663)	0.041175
FTX	Exponencial	0.999 + EXPO(6.07)	0.024832
CSA	Weibull	-0.001 + WEIB(2.44, 0.588)	0.003077
LLX	Weibull	0.5 + WEIB(2.56, 0.663)	0.041175
Carvão	Beta	0.5 + 11 * BETA(0.429, 1.98)	0.003178

Tabela 8 - Tempos etapa antes da descarga em terminais

Tempos Depois da Descarga - Terminais			
Atividade	**Distribuição**	**Expressão**	**Erro Quadrático**
FGI	Lognormal	0.18 + LOGN(0.402, 0.258)	0.013015
FXS	Lognormal	LOGN(0.238, 0.164)	0.017158
FTX	Lognormal	LOGN(0.238, 0.154)	0.016647
CSA	Beta	1.18 * BETA(0.903, 1.66)	0.008990
LLX*	Lognormal	LOGN(0.238, 0.164)	0.017158
Carvão	Lognormal	1.09 + LOGN(1.4, 0.65)	0.003122

Tabela 9 - Tempos etapa depois da descarga em terminais

Observa-se pela análise do erro quadrado que o ajuste das distribuições de probabilidade calculadas pela ferramenta Imput Analyzer do Arena® apresenta ajuste adequado para utilização no modelo de simulação. Para o terminal da LLX, que ainda não está em fase operacional, foram consideradas as curvas de distribuição de probabilidade de tempos do terminal FXS devido a semelhanças entre o layout dos dois terminais.

Além disso, por se tratar do dimensionamento de um sistema no futuro, foram adotadas algumas premissas para a realização do presente estudo. Os dados relativos à confiabilidade de Material Rodante e de Via Permanente no longo prazo foram estabelecidos com base em estudos de especialistas da área de Engenharia de Manutenção. Os tempos de circulação de trens entre os pátios foram considerados constantes com base em média histórica do período compreendido entre Janeiro de 2011 e Junho de 2011.

Os tempos entre chegadas de trens para cada terminal foram estabelecidos como premissa como seguindo uma distribuição Exponencial, cuja média é função da quantidade de trens por dia para atender ao volume de transporte. (Exemplo: Expo(24/V.Qtd_trens_dia_fgi))

4.2 MODELAGEM DO SISTEMA DE DESCARGA

O novo modelo de operação do sistema de descarga de minério de ferro na malha da MRS Logística S/A, após a ampliação do pátio Santa Rosa, será operado conforme descrito a seguir.

Os trens de minério de ferro para descarga nos terminais de Guaíba, CPBS, Tecar, CSA e LLX e os trens de importação de carvão com destino ao terminal Tecar circulam na região de descarga até a entrada do pátio Santa Rosa. O intervalo entre chegadas de trens no pátio Santa Rosa é diferente para cada terminal, sendo função do volume de transporte contratado.

Na entrada do pátio, caso o terminal de destino esteja ocioso, o trem segue diretamente para o terminal, caso contrário, acessa o pátio Santa Rosa para realizar as manobras de troca de locomotivas e desanexação da Tração Distribuída (trens de 160 e 202 vagões). Realizadas as atividades no pátio, o trem aguarda em uma das linhas do pátio Santa Rosa até que o terminal solicite para então seguir viagem ao destino.

Ao acessar o terminal, o trem realiza operação de desanexação da tração distribuída, no caso de ter circulado sem acessar o pátio Santa Rosa. Depois realiza a descarga ou a carga (no caso dos trens de carvão) e retorna para o pátio Santa Rosa.

No retorno ao pátio Santa Rosa, os trens acessam o pátio, destrocam locomotivas e refazem a tração distribuída, quando necessário. Depois de realizadas essas atividades, os trens seguem viagem em direção ao destino de carga, ou descarga no caso do trem de carvão mineral da CSN.

O fluxograma a seguir resume as operações previstas na região de descarga de minério de ferro na malha da MRS Logística:

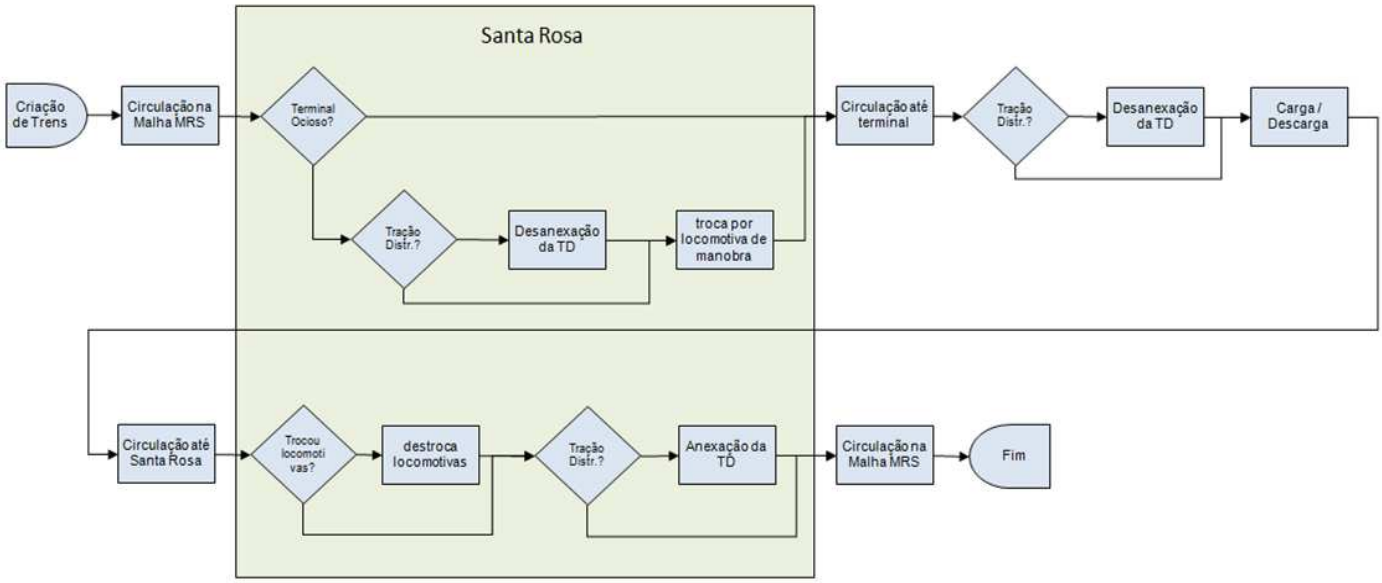

Figura 19 - Lógica Conceitual
Fonte: O Autor

4.3 MODELO EM ARENA®

As características de operação da região da descarga da malha da MRS Logística, incluindo a circulação de trens, operações para processamento de trens no pátio Santa Rosa e

operações nos terminais listados na Tabela 2 foram modelados no software de simulação Arena®, conforme mostrado na Figura 20.

O software Arena® foi utilizado para a simulação, pois além de ser um dos mais utilizados no meio acadêmico é também o software padrão para estudos de simulação na MRS Logística, por disponibilizar um ambiente que agrega facilidade de modelagem de lógicas através de diagramas, animação e ferramentas estatísticas para análise das entradas e dos resultados.

O modelo construído para este estudo compreende cinco conjuntos de lógicas que interagem entre si para representar o sistema real da forma mais acurada possível, quais sejam:

- **Lógica de Circulação de Trens:** Essa é a parte da lógica do modelo de simulação responsável pela inteligência de circulação dos trens na região de descarga de minério de ferro a fim de garantir que não ocorram travamentos na circulação durante as rodadas de simulação.
- **Lógicas de Descarga em Terminais:** Esse conjunto de lógicas tem função de representar os processos de carga e descarga nos terminais citados na Tabela 2 - Terminais de Descarga de Minério de Ferro.
- **Lógicas de Operação em Santa Rosa:** Devido à importância das operações do pátio Santa Rosa no sistema de descarga de minério de ferro na malha da MRS, foi criado um conjunto de lógicas a fim de representar em detalhes as operações dos trens no local.
- **Lógicas de Falhas e Manutenção:** A fim de tornar o modelo mais realista, foram criadas lógicas que representam falhas e as manutenções preventivas e corretivas na malha e no material rodante da MRS Logística.
- **Lógicas de Inicialização de Variáveis:** Esse conjunto de lógicas foi criado a fim de inicializar variáveis e controlar indicadores de forma a facilitar a análise dos resultados das simulações.

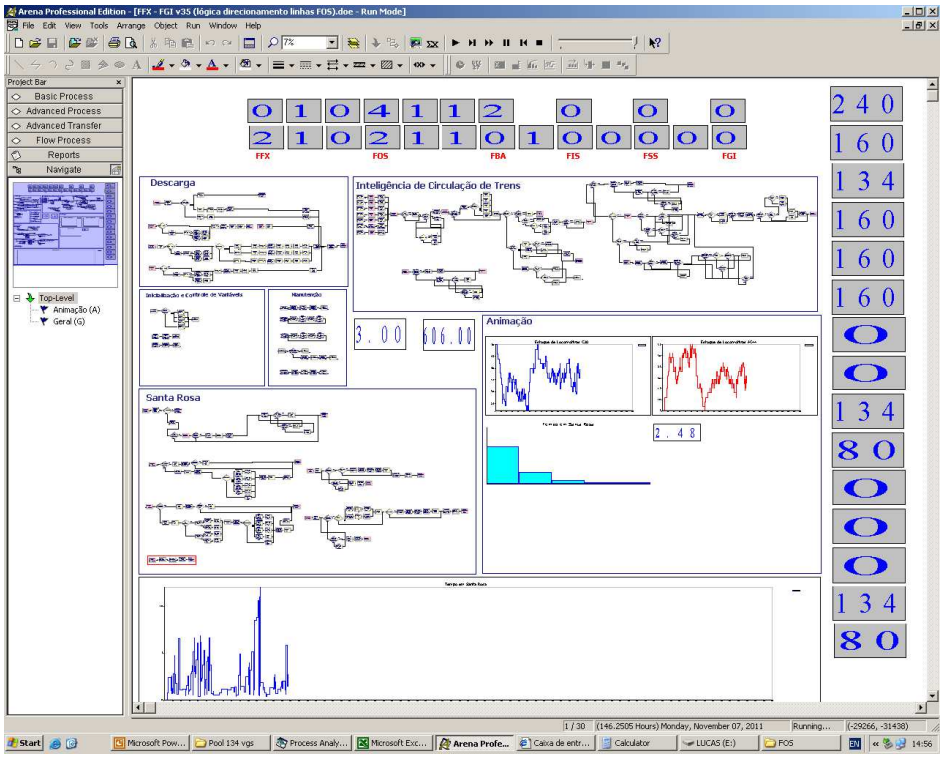

Figura 20 - Modelo de Simulação em Arena®

A partir dos dados levantados e da configuração da malha na região de descarga de minério de ferro, os parâmetros abaixo foram imputados no modelo de simulação:

Falha	MTBF*	MTTR**
Interdição Via	547	1,8
Restrição Velocidade 50%	54,9	2
Restrição Velocidade 10%	126,8	2

Tabela 10 - Indicadores de Confiabilidade de Via Permanente
Fonte: Manutenção da Malha

Falha	Tx de Ocorrência	MTTR**
Locomotiva	1,0%	1,8
Vagão	1,3%	1,6

Tabela 11 - Indicadores de Confiabilidade de Material Rodante
Fonte: Manutenção de Material Rodante

Onde MTBF indica o Tempo Médio Entre falhas (*Mean Time Between Failure*s) e MTTR indica o Tempo Médio para Reparo (*Mean Time to Repair*)

Cadastro da Malha				
Trecho	*Sentido 1 (minutos)	*Sentido 2 (minutos)	Tipo de Linha	# Linhas
FFX	3	3	Dupla	3
FFX_FOS(1)	8	6	Dupla	2
FFX_FOS(2)	7	5	Dupla	2
FOS	4	4	Dupla	18
FOS_FBA(1)	8	3	Dupla	2
FOS_FBA(2)	8	6	Dupla	2
FBA	3	3	Dupla	8
FBA_FIS	12	12	Singela	1
FIS	3	3	Singela	2
FIS_1	15	12	Singela	1
FSS	3	3	Singela	2
FSS_1	30	35	Singela	1
FGI	3	3	Singela	2

Tabela 12 - Informações de Cadastro da Malha Ferroviária
Fonte: Sislog

Na Tabela 11 acima, as colunas intituladas Sentido 1 e Sentido 2 indicam o tempo líquido de circulação em minutos dos trens no sentido exportação e importação respectivamente para o trem de 134 vagões. Para os outros tamanhos de trens foram considerados tempos proporcionais à quantidade de vagões, uma vez que a velocidade média de circulação projetada é a mesma para todos os trens.

Vagões / dia		
Terminal	2014	Descarga
FTX	1.550	3 viradores
FGI	1.131	2 viradores
LLX	696	2 viradores
FXS	615	1 virador
CSA	119	1 virador
Carvão	70	Moega

Tabela 13 - Quantidade planejada de vagões / dia para por terminal
Fonte: MRS Logística

Na Tabela 12 estão descritas as demandas em vagões por dia para o ano de 2014 para cada um dos terminais. Para as rodadas de simulação com diferentes configurações de formação de trens, foram estabelecidas as quantidades de trens / dia proporcionalmente à quantidade de vagões por trem e a demanda apresentada na Tabela 12.

Após a configuração de todos os parâmetros, foram rodadas as simulações com algumas combinações de modelos de formação de trens para atendimento aos terminais segundo a Tabela 13 abaixo. Para os três cenários de formação de trens estudados, foi considerado o pátio Santa Rosa com as 16 linhas operacionais e foram rodadas 30 replicações de simulação com 100 dias de duração cada. Nesta primeira fase do estudo, foi relaxada a condição de verificação do estoque de locomotivas de manobra.

Cenário	Formação	FGI	FXS	FTX	LLX	CSA	Carvão
Cenário 1	70						✔
	134	✔	✔	✔	✔	✔	
	160 TD						
	202 TD						
Cenário 2	70						✔
	134	✔					
	160 TD		✔	✔	✔	✔	
	202 TD						
Cenário 3	70						✔
	134	✔					
	160 TD		✔		✔	✔	
	202 TD			✔			

Tabela 14 - Resumo de Cenários de Modelos Operacionais

Depois de rodadas as replicações de simulação para teste dos três modelos operacionais, foram feitas as simulações para análise de sensibilidade do tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa em função do estoque de locomotivas de manobra. Nesta segunda fase do estudo, foi utilizada a condição de verificação da disponibilidade de locomotivas de manobra que havia sido relaxada anteriormente. Novamente, foram rodadas 30 replicações de 100 dias de duração cada.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir serão apresentadas as análises dos resultados das simulações executadas no modelo. A análise contempla a comparação dos três cenários de modelos de trem apresentados na Tabela 13 em termos de vagões descarregados e também a análise do tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa (FOS) em função da quantidade de locomotivas de manobra em estoque no pátio.

5.1 MODELOS DE TREM

O primeiro conjunto de simulações para cada um dos cenários de modelo de formação de trens apresentou os seguintes resultados:

5.1.1 Cenário 1

- Média de tempo em Santa Rosa: 1,85 hr
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (Carvão): 69,8
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (CSA): 119,5
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FGI): 1128,3
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FTX): 1547,0
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FXS): 614,2
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (LLX): 687,35

5.1.2 Cenário 2

- Média de tempo em Santa Rosa: 2,54 hr
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (Carvão): 70,5
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (CSA): 120,9
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FGI): 1123,9
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FTX): 1558,3
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FXS): 615,15
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (LLX): 699,63

5.1.3 Cenário 3

- Média de tempo em Santa Rosa: 1,95 hr
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (Carvão): 69,1
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (CSA): 123,81
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FGI): 1131,0
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FTX): 1554,4
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (FXS): 622,35
- Quantidade média de vagões descarregados por dia (LLX): 682,61

Pela análise das médias dos resultados das 30 replicações simuladas, observa-se que o cenário 1 é aquele que tem menor tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa, o que é explicado pela ausência de trens realizando atividades relacionadas à Tração Distribuída no local. Dentre os cenários com realização de atividades de Tração Distribuída, o cenário 3 é aquele com menor tempo de permanência em Santa Rosa. Isso se deve ao fato que, apesar do número maior de atividades em Santa Rosa, tais como, anexação e desanexação de blocos de vagões e link de locomotivas, a presença de trens com 202 vagões para o fluxo de atendimento ao terminal Tecar (FTX) causa uma redução da quantidade de trens / dia que o pátio deve processar, gerando uma folga maior no sistema. A Figura 21 abaixo resume os dados relativos ao tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa para cada cenário simulado.

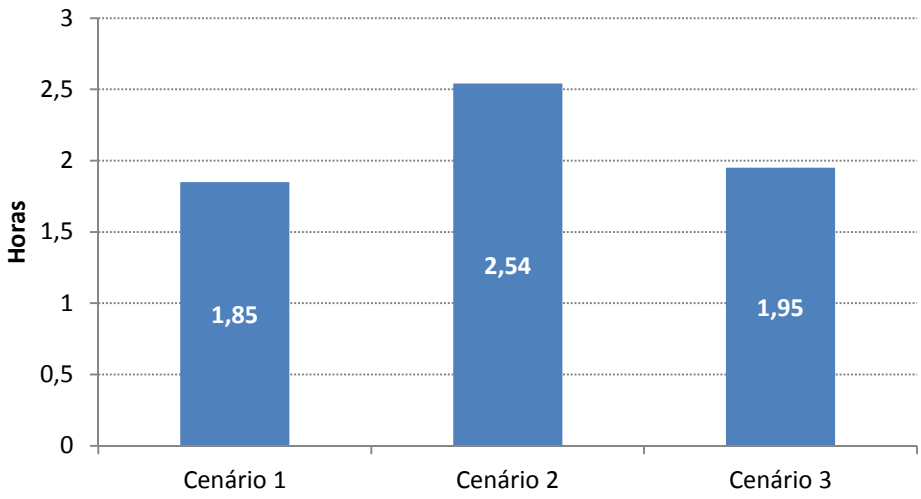

Figura 21 - Tempo de Permanência em Santa Rosa

O tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa pode ser analisado ainda sob a ótica da gestão de estoques na cadeia de suprimentos, conforme conceituado no capítulo 2 deste trabalho. O aumento do tempo de permanência dos trens em Santa Rosa implica num aumento do tempo de ciclo, causando a necessidade de aumento da quantidade de ativos para a manutenção do nível de serviço acordado.

As diferenças entre o tempo médio de permanência dos trens no pátio Santa Rosa para cada cenário são bastante significativas. No entanto, apenas a análise de médias de vagões descarregados por dia não é suficiente para uma correta tomada decisão acerca do melhor modelo de formação de trens para operação na região de descarga. Dessa forma, foi realizado um estudo de Análise de Variância (ANOVA) para verificar, ao nível de significância de 5%, qual o modelo de formação de trens que fornece melhor capacidade de atendimento à demanda prevista.

Para uma correta interpretação dos resultados durante a realização de um estudo de ANOVA faz-se necessário testar o ajuste dos dados a uma Distribuição Normal, pois o modelo linear estatístico mostrado no item 2.4.6 do capítulo 2 deste trabalho baseia-se na premissa da Normalidade dos dados. Apoiado no Teorema Central do Limite, uma vez que a variável de interesse, média da quantidade de vagões descarregados por dia, foi resultado de 30 replicações de 100 dias cada, podemos admitir que os dados em questão sigam uma Distribuição Normal. No entanto, foram realizados testes de ajuste dos dados à uma Distribuição Normal. A Tabela 10 a seguir apresenta os resultados dos testes de Normalidade dos dados para cada um dos cenários. A estatística de teste utilizada foi o teste de Anderson-Darling.

Teste de Normaldidade dos dados (P-value)			
Terminal	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
FGI	0,293	0,620	0,600
FXS	0,394	0,639	0,087
FTX	0,859	0,928	0,854
CSA	0,705	0,882	0,263
LLX	0,837	0,629	0,111
Carvão	0,478	0,910	0,590

Tabela 15 - Teste de Normalidade dos Dados

Pela análise dos resultados dos testes de Normalidade resumidos na Tabela 10 acima, infere-se que todos os dados referentes à quantidade média de vagões descarregados por dia em cada terminal para cada um dos três cenários de formação de trens estudados são Normais ao nível de significância de 5%.

Outra premissa para realização de um estudo de Análise de Variância é a igualdade das variâncias dos fatores estudados. Para testar a igualdade das variâncias foi utilizada a estatística de teste de Bartlett. Na Tabela 15 a seguir estão apresentados os resultados do teste de igualdade das variâncias. Os testes foram realizados no software estatístico Minitab 15.

Estatística de Bartlett	
Fluxo	**P-value**
FGI	0,426
FXS	0,329
FTX	0,073
CSA	0,411
LLX	0,349
Carvão	0,349

Tabela 16 - Teste de Igualdade das Variâncias

A análise dos resultados mostrados no teste da estatística de Bartlett para a igualdade das variâncias é feita através do P-value, que indica a probabilidade de as variâncias dos dados referentes à quantidade média de vagões descarregados serem iguais. Dessa forma é possível inferir, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), que não há evidência estatístisca para que seja rejeitada a Hipótese Nula do teste, ou seja, pode ser inferido que as variâncias são iguais, satisfazendo assim a premissa para realização da ANOVA. O Anexo B deste trabalho apresenta o relatório completo do software Minitab 15 com as Análises de Variância para todos os terminais considerados. (ANEXO B – TESTES DE HIPÓTESE PARA IGUALDADE DAS VARIÂNCIAS)

Satisfeitas as premissas para realização do teste, são apresentados a seguir os resultados das análises de variância da quantidade média de vagões descarregados por dia em cada terminal, onde o fator de interesse em estudo é cada um dos três cenários simulados. As ANOVAS foram geradas pelo software estatístico Minitab 15.

ANOVAs	
Fluxo	**P-value**
FGI	0,804
FXS	0,566
FTX	0,705
CSA	0,484
LLX	0,101
Carvão	0,782

Tabela 17 - Resultados ANOVAS Cenários de Formação de Trens

Conforme descrito no item 2.4.6 do capítulo 2 deste trabalho, a Análise de Variância baseia-se no teste da Hipótese Nula Ho: $\pi_1 = \pi_2 = ... = \pi_i$, em que o P-value mostrado na Tabela 16 representa a probabilidade de Ho ser verdadeira. Para um nível de significância de 5% (α = 0,05), pode ser inferido, portanto, que não há evidência para rejeição da Hipótese Nula do teste para todos os fluxos de atendimento, ou seja, não existe evidência estatística de que exista alguma diferença entre os três cenários estudados no que diz respeito à capacidade de descarga de vagões / dia em cada um dos terminais atendidos pela MRS Logística na região da descarga de minério de ferro.

A análise completa dos resultados da ANOVA envolve também a análise dos resultados da Tabela ANOVA referentes ao R^2 ajustado, que fornece uma medida de quanto os fatores são capazes de explicar a resposta, ou seja, quanto a mudança nos modelos de formação de trens são capazes de explicar a variação na quantidade de vagões descarregados por dia na região de descarga de minério de ferro da MRS Logística. A Tabela abaixo resume os dados do R^2 ajustado para cada terminal.

Ajuste Modelo	
Fluxo	**R^2 ajustado**
FGI	0,00
FXS	0,00
FTX	0,00
CSA	0,00
LLX	0,02
Carvão	0,00

Tabela 18 - Ajuste dos Modelos de ANOVA

Os valores apresentados pelo R^2 ajustado dos modelos de ANOVA na tabela acima para cada um dos terminais permitem inferir, ao nível de significância de 5% (α = 0,05), que não há evidência estatística para aceitar que a mudança nos modelos de formação de trens seja significativa para explicar a capacidade de descarga de vagões na região de descarga de minério de ferro. As ANOVAs permitiram concluir que, para a região de descarga de minério de ferro da MRS Logística não há diferença na operação dos três modelos de formação de trens tesados e, devido à capacidade instalada prevista, esses modelos não são gargalo para a operação do sistema.

O Anexo C deste trabalho apresenta o relatório completo do software Minitab 15 com as Análises de Variância para todos os terminais considerados. (ANEXO C – ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA))

5.2 ESTOQUE DE LOCOMOTIVAS DE MANOBRA

A segunda etapa do projeto de simulação, envolvendo a determinação da quantidade de locomotivas de manobra necessárias para a operação no pátio Santa Rosa, apresentou os resultados resumidos nas Figuras 22, 23 e 24 a seguir, onde foram medidos os tempos de permanência dos trens no pátio em função da quantidade de locomotivas disponíveis para manobra.

Observa-se que em todos os três cenários, existe um patamar limite mínimo para o tempo de permanência dos trens no pátio Santa Rosa, o que indica que a partir destes pontos o estoque de locomotivas deixa de ser um gargalo para operação do sistema. Não por acaso, os limites apresentados nos gráficos correspondem aproximadamente ao tempo de permanência no pátio Santa Rosa apresentados na primeira etapa do estudo de simulação, quando a condição de verificação do estoque de locomotivas foi relaxada para analisar somente o impacto dos modelos de formação de trens na capacidade do sistema.

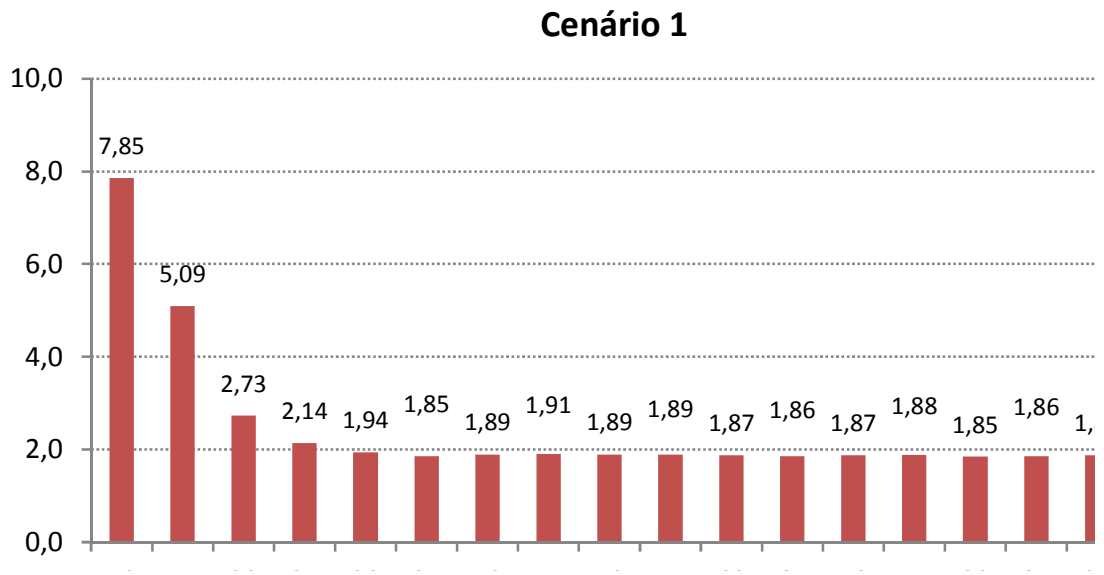

Figura 22 - Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 1)

Neste primeiro cenário de formação de trens, conforme observado na Figura 22, o limite para o tempo de permanência dos trens no pátio é alcançado para um estoque de 35 locomotivas de manobra.

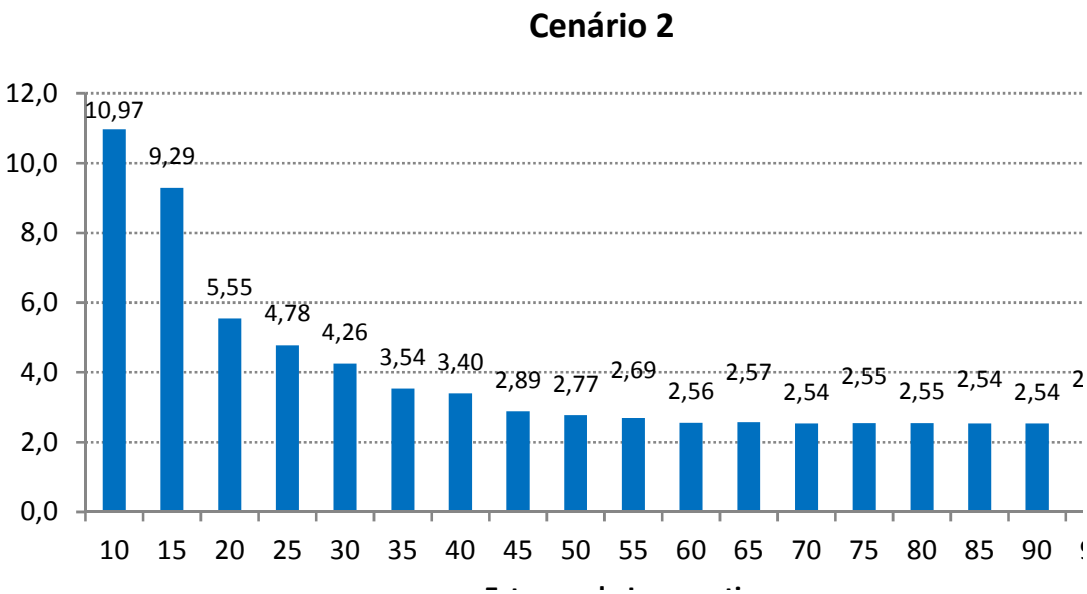

Figura 23 – Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 2)

No cenário 2 ocorre um expressivo aumento na quantidade necessária de locomotivas de manobra para operação em Santa Rosa. O patamar limite do tempo de permanência no pátio é atingido para um estoque de locomotivas igual a 60 locomotivas. Esse aumento na quantidade requerida de locomotivas de manobra deve-se ao fato que, diferentemente do cenário 1, o cenário 2 possui uma grande proporção de trens com Tração Distribuída, o que implica numa maior quantidade de locomotivas para realização de manobras.

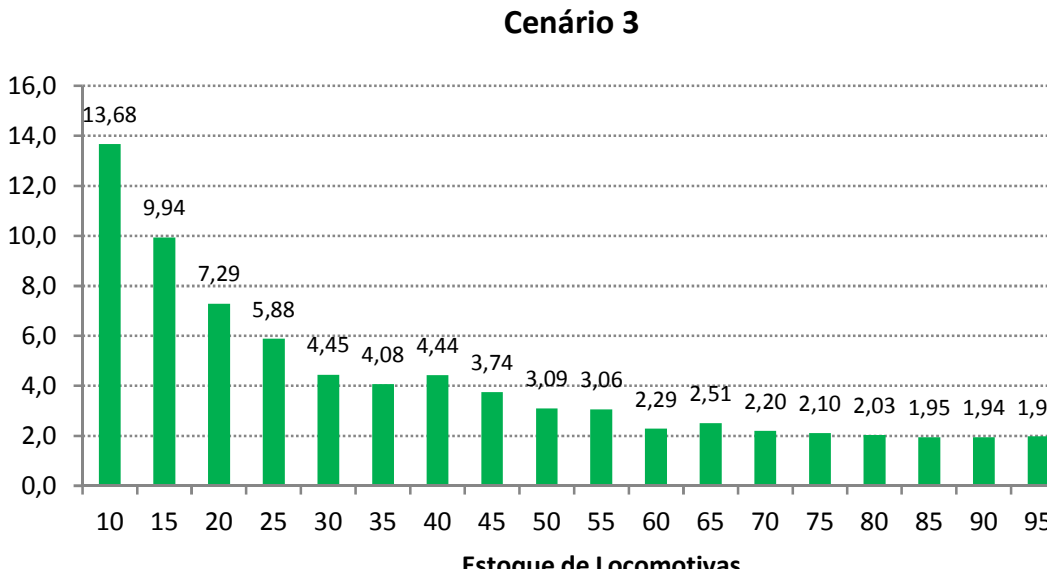

Figura 24 - Tempo em Santa Rosa x Estoque de Locomotivas (Cenário 3)

No Cenário 3 de formação de trens, o limite para o tempo de permanência no pátio é atingido quando o estoque de locomotivas está em torno de 85. Este resultado está alinhado com os demais, pois, se comparado com o cenário 1, a presença de trens com Tração Distribuída envolve a utilização de um número maior de locomotivas. Observa-se também um número maior de locomotivas de manobra sendo utilizado no cenário 3 se comparado com a necessidade de locomotivas do cenário 2, uma vez que a presença trens de 202 vagões com Tração Distribuída, apesar de provocar uma diminuição na quantidade de trens processados por dia no pátio Santa Rosa, requer uma maior quantidade de locomotivas para tracionar os blocos de vagões até os terminais.

Pode ser concluído ainda a partir dos resultados que o aumento na quantidade de locomotivas disponíveis no pátio reflete num aumento no nível de serviço, uma vez que reduz o tempo de espera dos trens por locomotivas de manobra, mas impacta num aumento dos custos de aquisição e manutenção desses ativos. Entretanto, conforme proposto na revisão bibliográfica, a redução na performance em termos de custos em um dos elos da cadeia deve ser avaliada a fim de se obter o ganho em toda a cadeia de suprimentos, que no caso estudado envolve também as operações nas minas e nos portos de operação de minério de ferro.

6 CONCLUSÃO

6.1 CONCLUSÕES

É possível dizer que os objetivos do trabalho foram plenamente alcançados, uma vez que, os resultados das simulações rodadas permitiram identificar pontos de restrição do sistema sem que haja a necessidade de realizar intervenções reais. Além disso, o objetivo deste trabalho vai além do escopo de análise dos resultados das simulações e tomada decisão. Este trabalho tange também aspectos de formação acadêmica e científica, sendo a pesquisa e o desenvolvimento dois fatores cruciais para a formação do Engenheiro de Produção.

Pela análise dos resultados das simulações foi possível identificar que todas as alternativas testadas garantem atendimento à demanda em 2014, contudo, faz-se necessário o planejamento integrado de capacidade de todo o sistema que compreende a malha da MRS Logística, incluindo região de carga e corredores ferroviários.

É possível afirmar também que, ao contrário do que se pensava anteriormente, a operação com tração distribuída, apesar das ineficiências com manobras na região da descarga de minério de ferro, mantém a mesma capacidade de atendimento à demanda de longo prazo em relação ao modelo atual com trens de 134 vagões, uma vez que não há evidência estatística para tal afirmação. Dessa forma, é possível implantar a operação com Tração distribuída de maneira a obter os ganhos esperados nos corredores ferroviários de ligação das minas aos portos sem perder eficiência nas operações de descarga.

6.2 SUGESTÕES E PROPOSTAS

Tendo em vista os resultados obtidos, sugere-se à MRS Logística a realização de estudos de outros modelos operacionais para conciliar a capacidade de atendimento à demanda prevista nos próximos anos com maior eficiência do ponto de vista de utilização dos ativos da companhia.

A operação com trens de Tração Distribuída é considerada uma das grandes iniciativas para aumento da capacidade de transportes em ferrovias de carga no mundo, mas esta operação implica também em uma maior complexidade no sistema. Logo, existe uma oportunidade para desenvolvimento de estudos de alternativas para operação mais eficiente desse modelo de formação de trem nas regiões de carga e descarga.

Sugere-se o estudo de modelo operacional no pátio Santa Rosa sem a necessidade de troca das locomotivas por locomotivas de manobra, evitando assim, o emprego de uma grande quantidade adicional de ativos (locomotivas de manobra) na operação do sistema de descarga de minério de ferro.

Além disso, identifica-se a oportunidade de realizar estudos similares aos realizados no presente trabalho para análise também do sistema das regiões de carga de minério de ferro a fim de que seja estruturado o modelo operacional de todo o sistema de transporte da malha da MRS Logística, resultando numa solução integrada de capacidade de transporte da companhia.

REFERÊNCIAS

ABRIL, M.; BARBER, F,; **Na assessment of railway capacity.** Transportation Research Part E, vol 44, nº 5, 2008.

ALVARENGA, A. C.; NOVAES, A. G. N. **Logística Aplicada: suprimento e distribuição física.** 2000

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento organização e logística empresarial.** Porto Alegre, 2001.

BANKS, J. CARSON. **Handbook of simulation : principles, methodology, advances, applications, and practice.** Wiley-IEEE, 1998.

BANKS, J.; CARSON II, J. S., NELSON, B. L., NICOL, D. M. **Discrete-event System Simulation.** New Jersey, 2004.

BETTS, A. ET. AL. **Gerenciamento de Operações e de Processos: Princípios e Práticas de Impacto Estratégico.** Porto Alegre, 2008.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logistical Management: the integrated supply chain process**. New York, 1986.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro.** Rio de Janeiro, 1982.

BUSTAMANTE, J. DE C. **Introdução ao Sistema de Transporte Ferroviário.** Apostila do Curso de Especialização em Transporte Ferroviário de Cargas do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2005.

CAMPOS, K. C. F. ET. AL. **Simulação em um Trecho Singelo de uma Malha Ferroviária utilizando o software Arena.** Encontro Nacional de engenharia de Produção. Fortaleza, 2006.

CHOPRA, S. MEINDL, P. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos : estratégia, planejamento e operação.** São Paulo, 2008.

CORRÊA, H. L. **Administração de produção e operações : manufatura e serviços : uma abordagem estratégica.** São Paulo, 2004.

FLEURY, P. F.; WANKE, P.; FIGUEIREDO, K. F. **Logística empresarial: uma perspectiva brasileira.** São Paulo, 2000.

FREITAS, P. J. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas.** Florianópolis, 2001.

HAYES, R.; PISANO, G.; UPTON, D.; WHEELWRIGHT, S. **Produção, Estratégia e Tecnologia: Em Busca da Vantagem Competitiva.** Porto Alegre, 2008.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional.**

JANIC, M. **Single track line capacity model.** Transportation Planning and Technology. 1984.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation With Arena 3rd Edition.** New York, 2004.

KOZAN, E.; BURDETT, R. L. **A railway capacity determination model and rail access charging methodologies.** Transportation Planning and Technology, 2005.

KRUEGER, H. **Parametric modeling in rail capacity planning.** Proceedings of the 31st Winter Simulation Conference. New York, 1999.

LANDEX, A. **Methods to estimate railway capacity and passenger delays.** PhD thesis, Technical University of Denmark, 2008.

LÍCIO, A. **"Os eixos estruturadores e dos corredores de transportes".** Revista de Política Agrícola. Brasília, 1995.

MONTGOMERY, D.; RUNGER, G. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2003.

PRADO, D. S. **Teoria das Filas e da Simulação.** Belo Horizonte, 2004.

RIBEIRO, P. C. C.; FERREIRA, K. A. **Logística e Transportes: Uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro.** Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Curitiba, 2002

VOLLMANN, T. E. ET. AL. **Sistemas de Planejamento e Controle da Produção para o Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos.** , 2008.

MRS Logística S/A, www.mrs.com.br. Acesso em: 01 jun. 2011

Agência Nacional de Transportadores Ferroviários, www.antf.org.br. Acesso em: 01 jun. 2011

Instituto Brasileiro de Siderurgia, ww.ibs.com.br. Acesso em: 05 jun. 2011

ANEXO A – DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE DAS AMOSTRAS

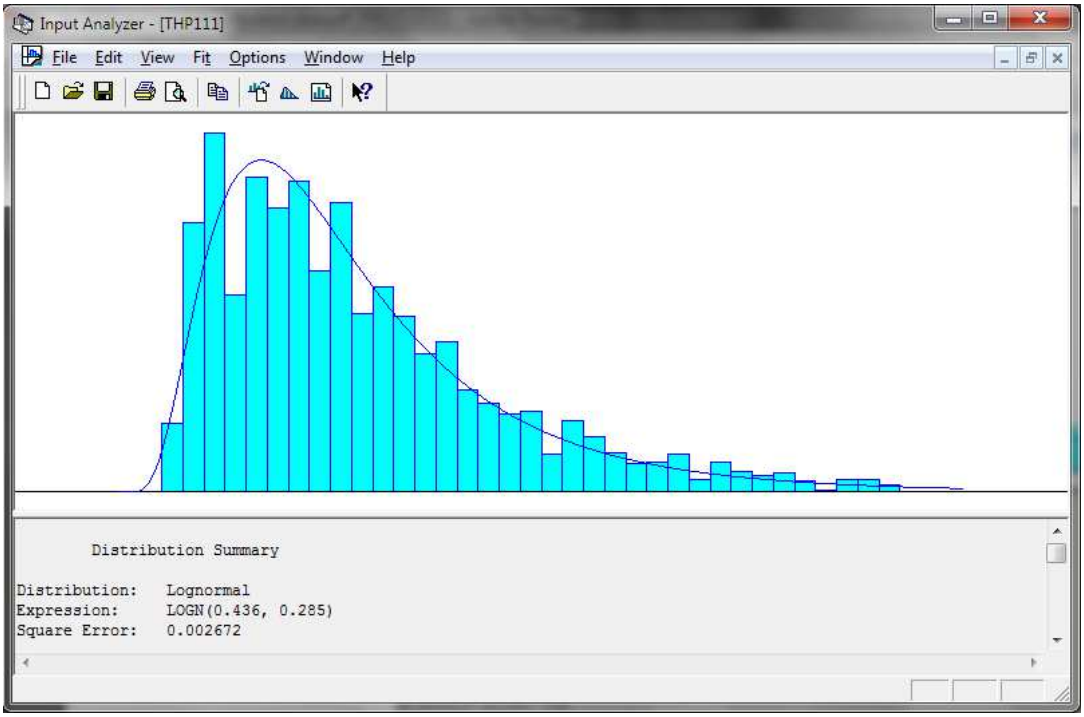

Figura 25 - Distribuição do Tempo da Atividade "Anexar Locomotiva"

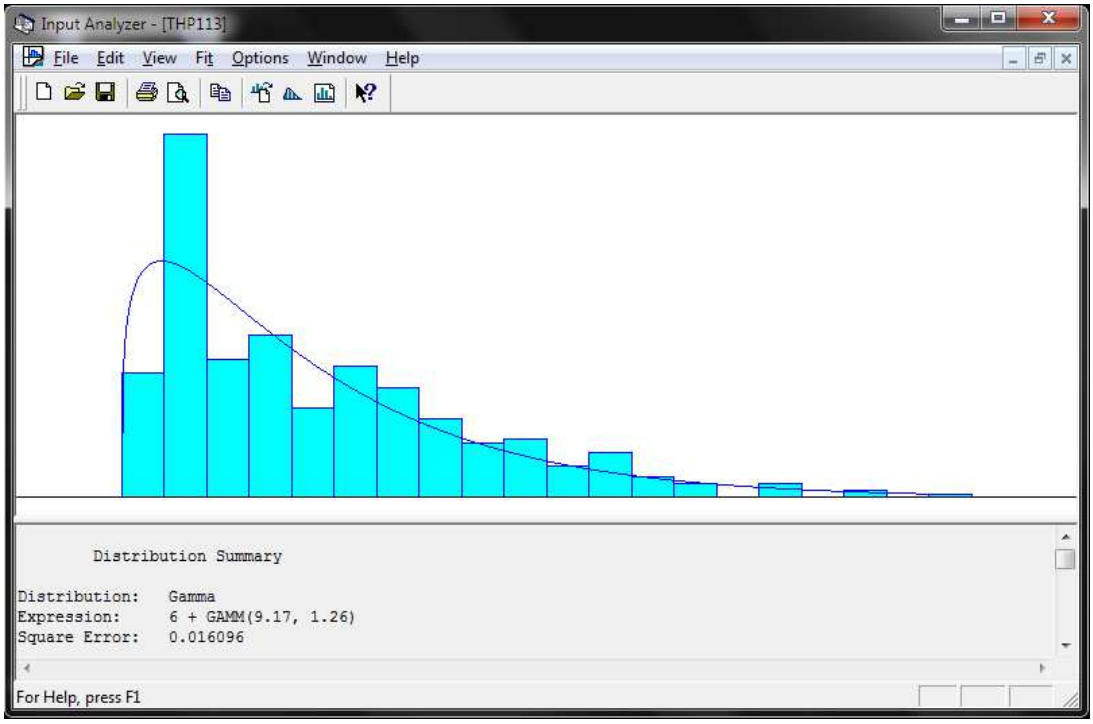

Figura 26 – Distribuição do Tempo da Atividade "Retirar Locomotiva"

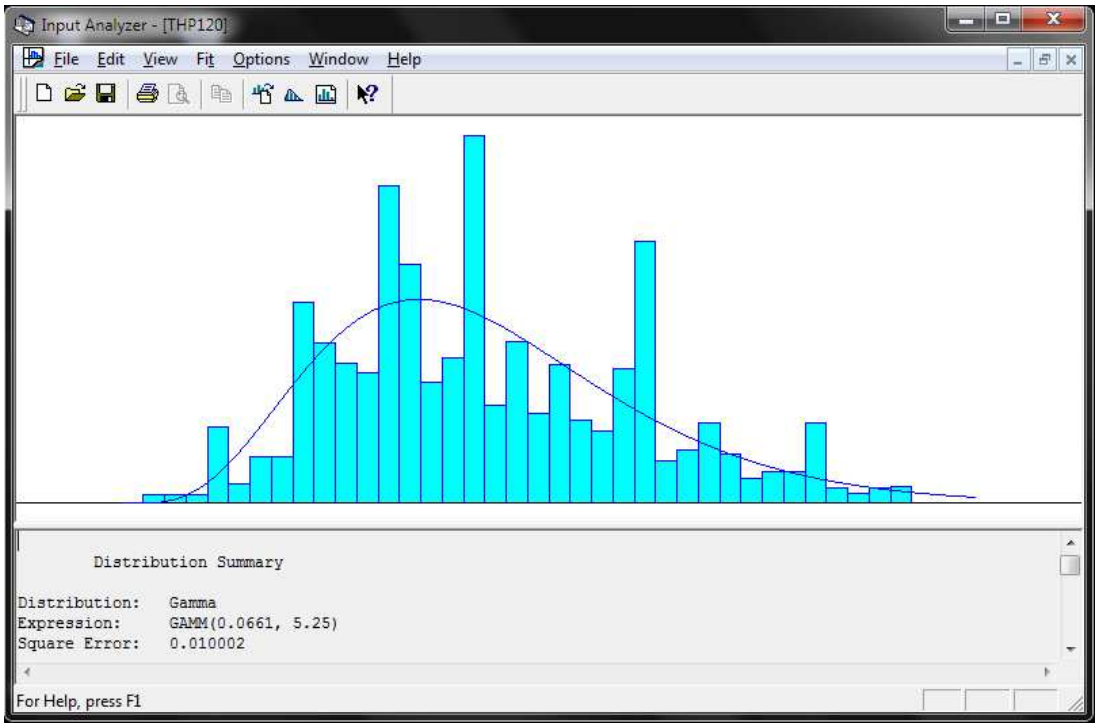

Figura 27 - Distribuição do Tempo da Atividade "Link Locomotivas"

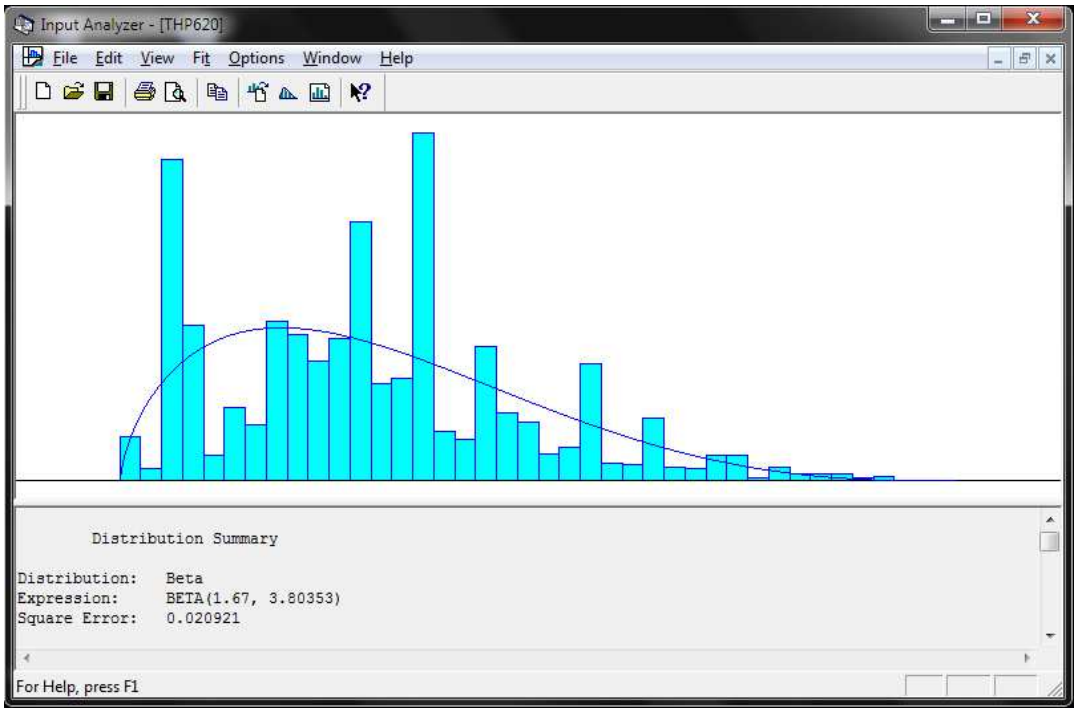

Figura 28 - Distribuição do Tempo da Atividade "Anexar / Desanexar Tração Distribuída"

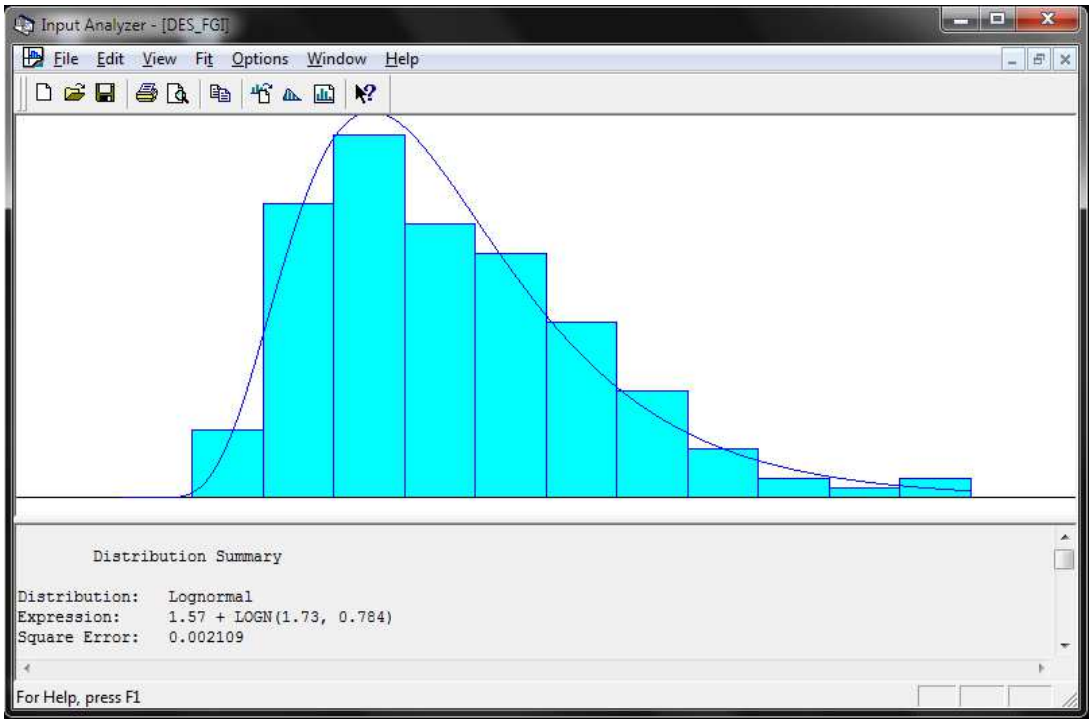

Figura 29 – Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FGI

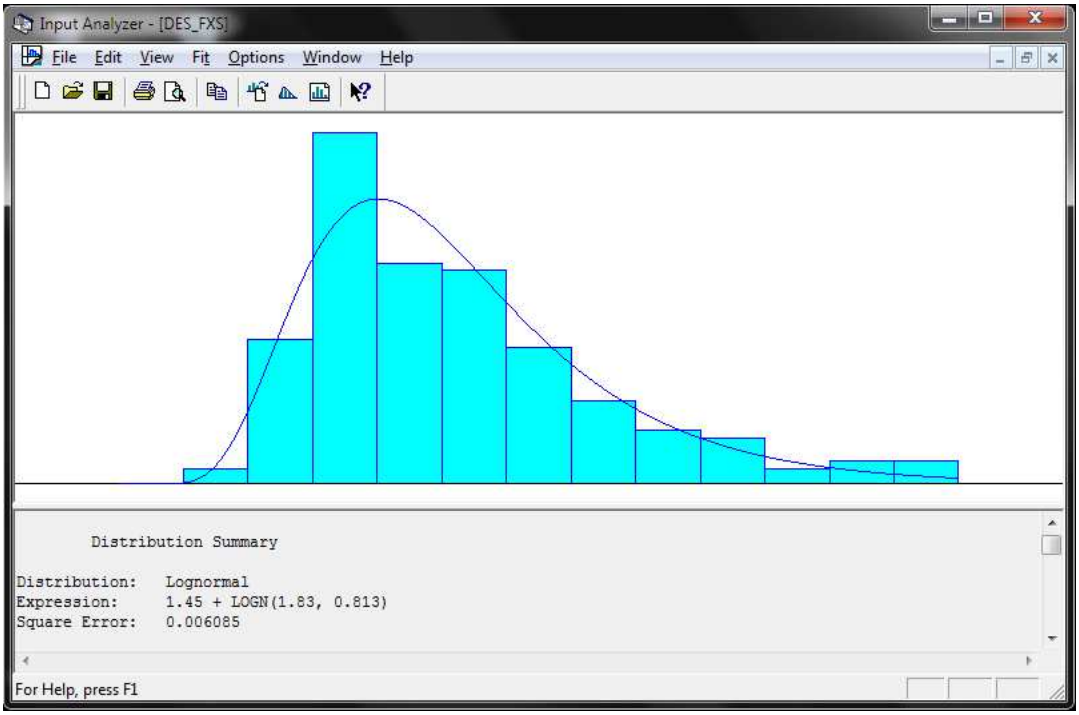

Figura 30 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FXS

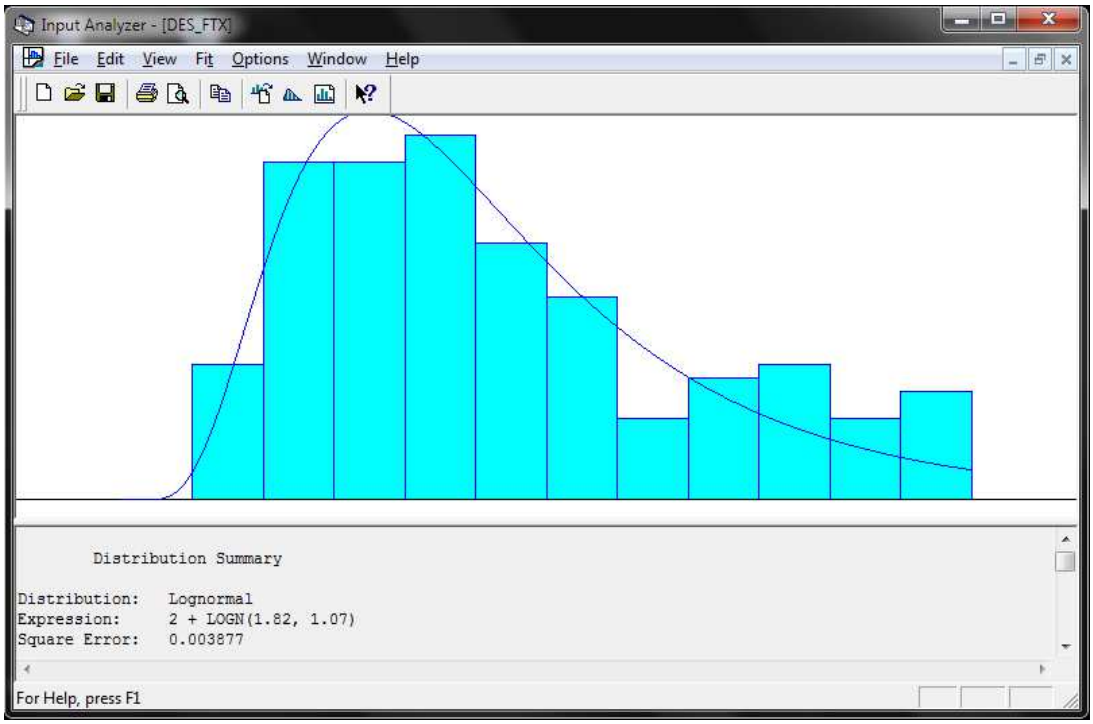

Figura 31 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal FTX

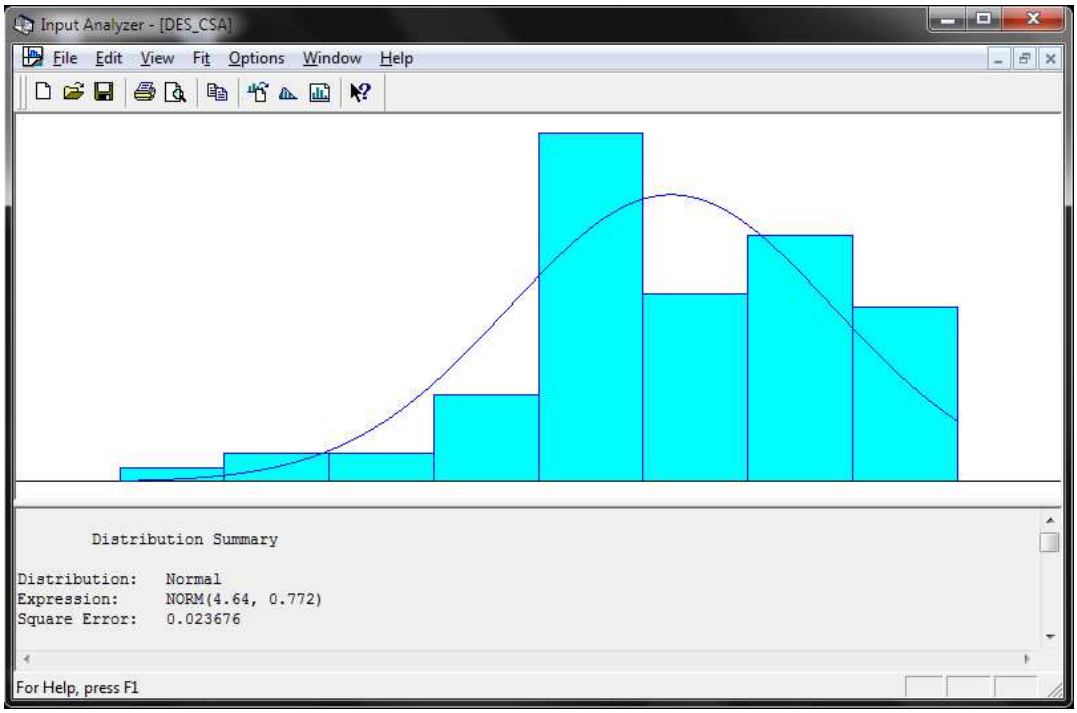

Figura 32 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal CSA

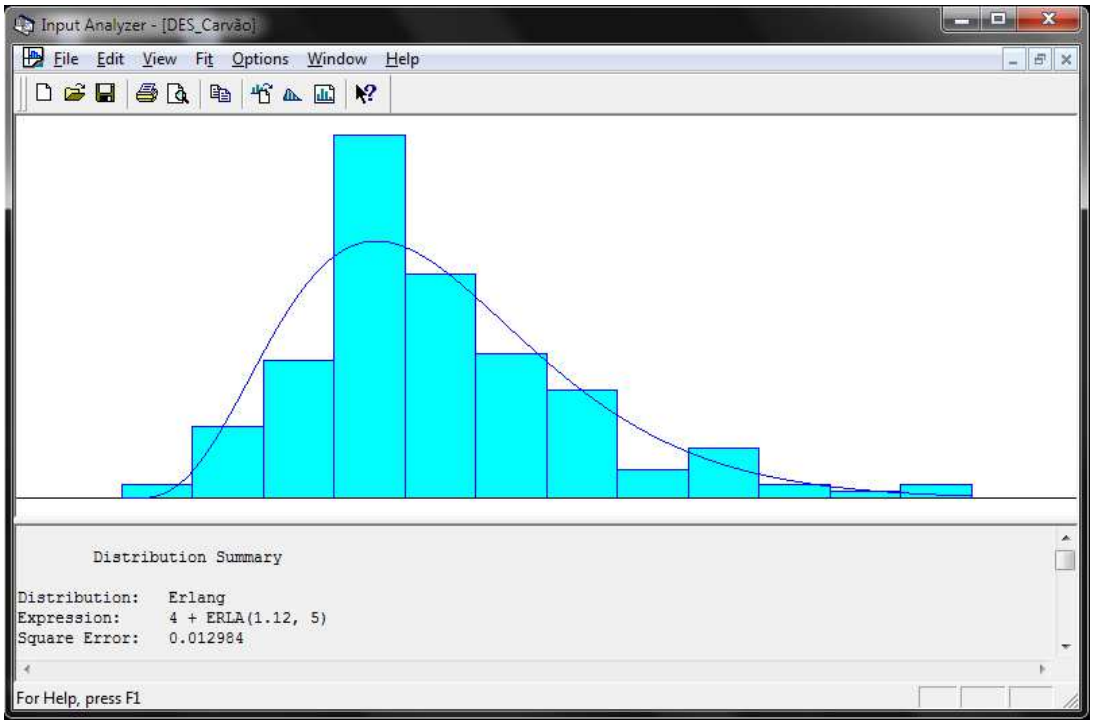

Figura 33 - Distribuição do Tempo de Descarga no Terminal de Carvão

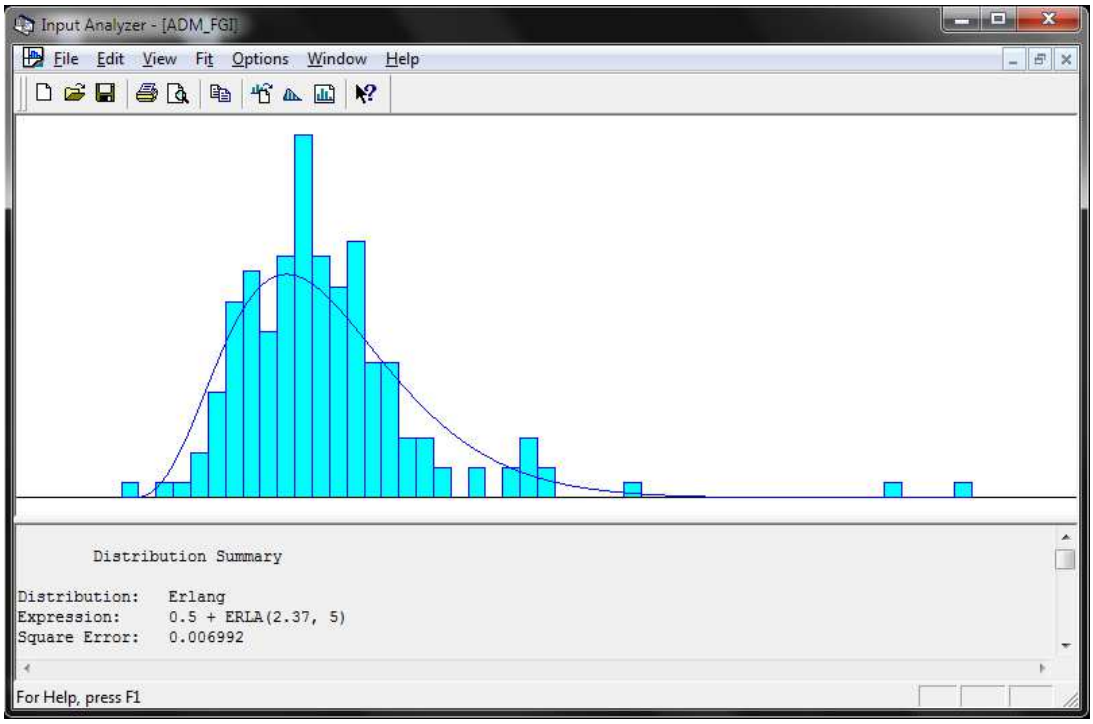

Figura 34 – Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FGI

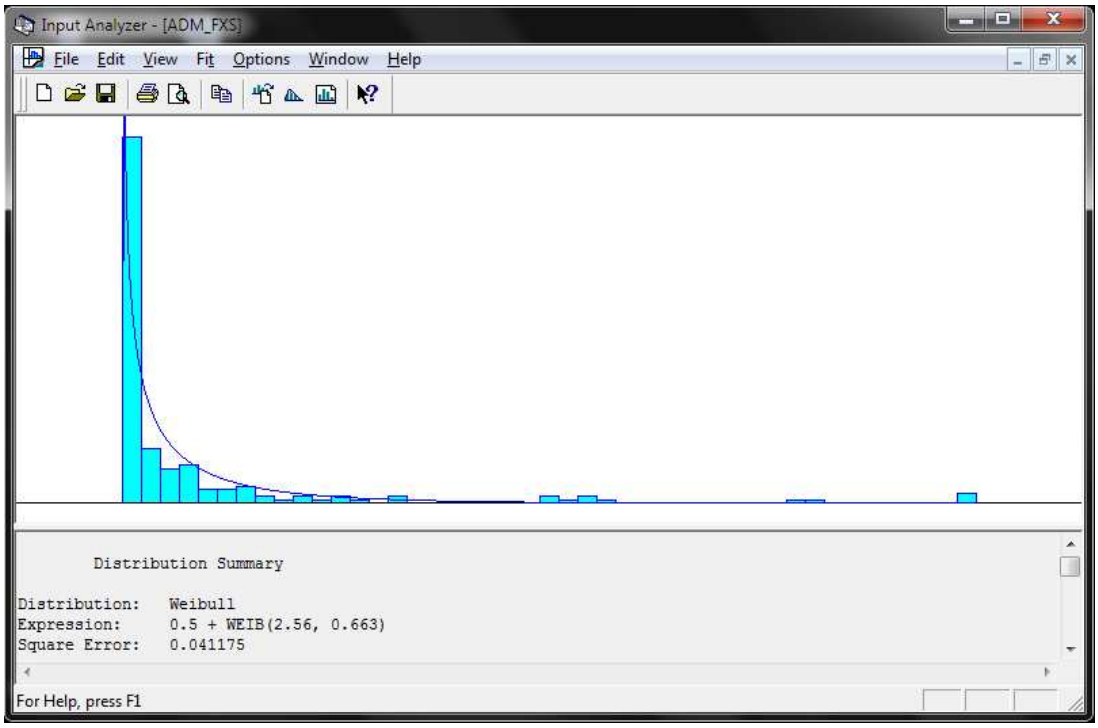

Figura 35 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FXS

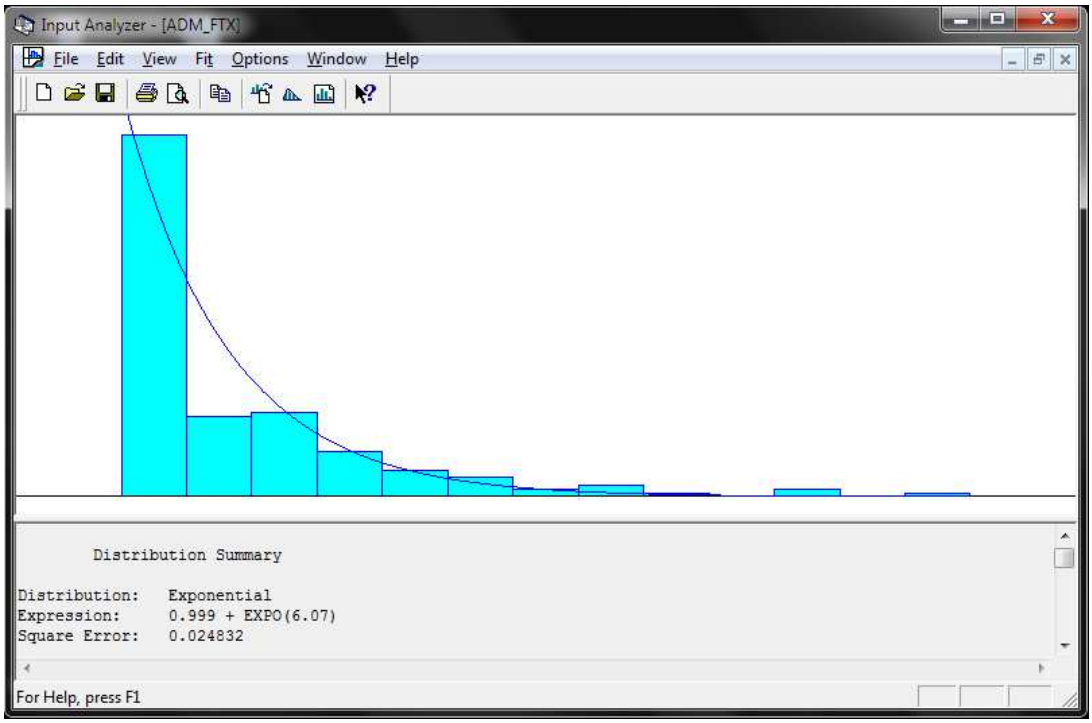

Figura 36 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal FTX

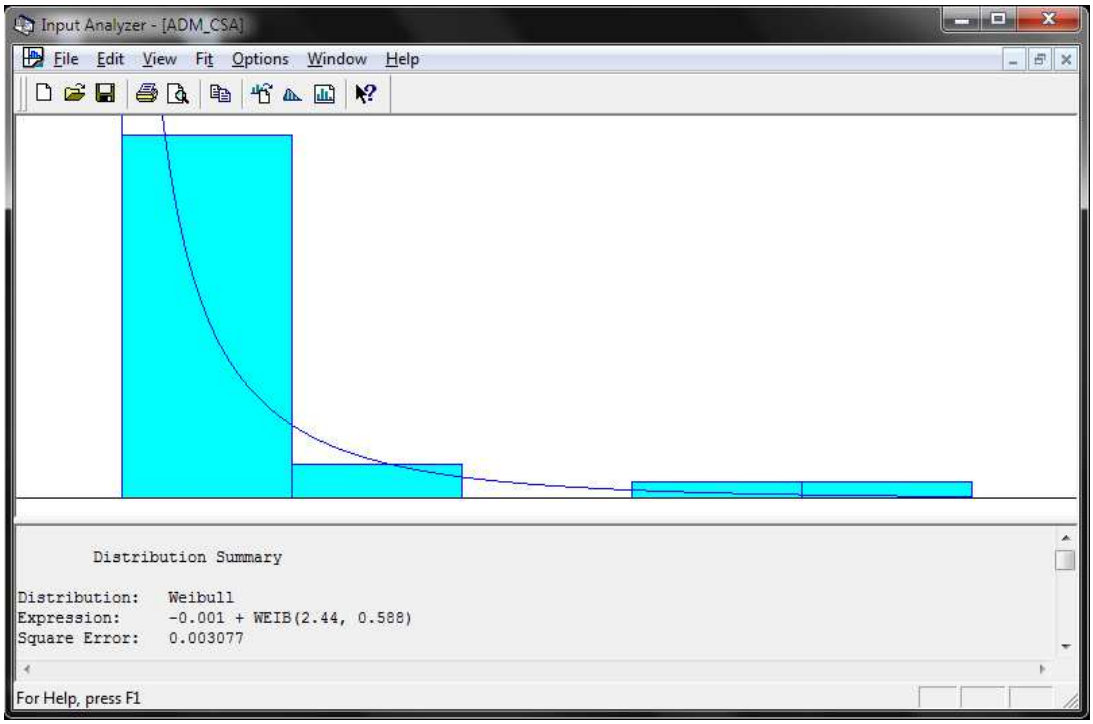

Figura 37 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal CSA

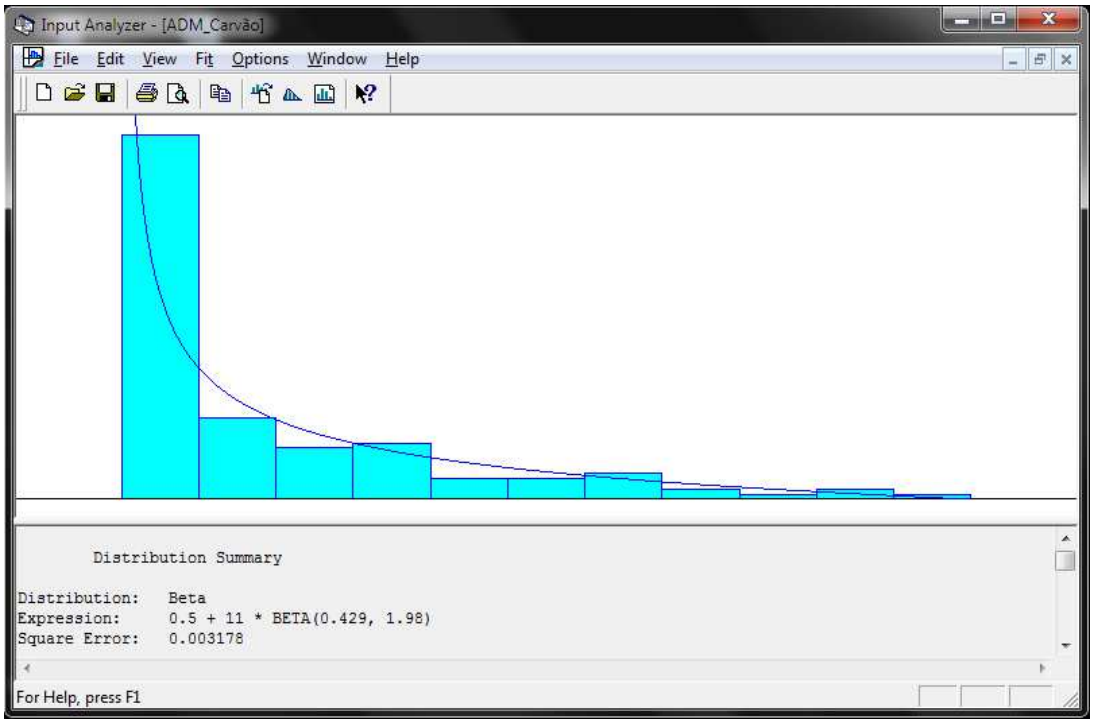

Figura 38 - Distribuição do Tempo Antes da Descarga no Terminal de Carvão

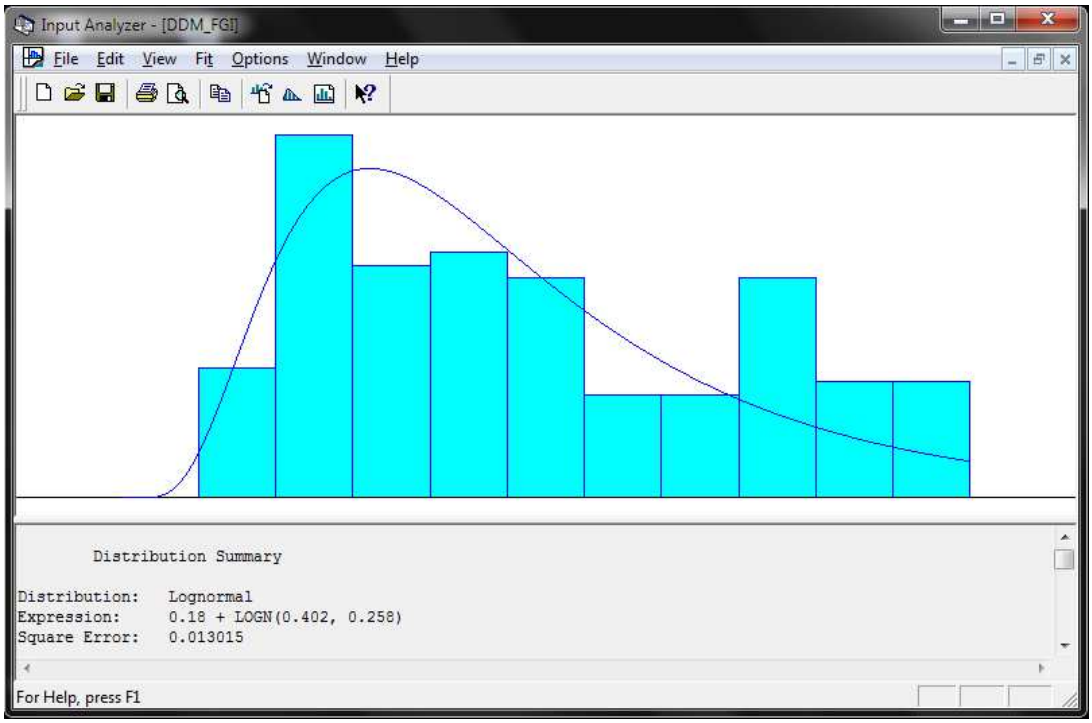

Figura 39 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FGI

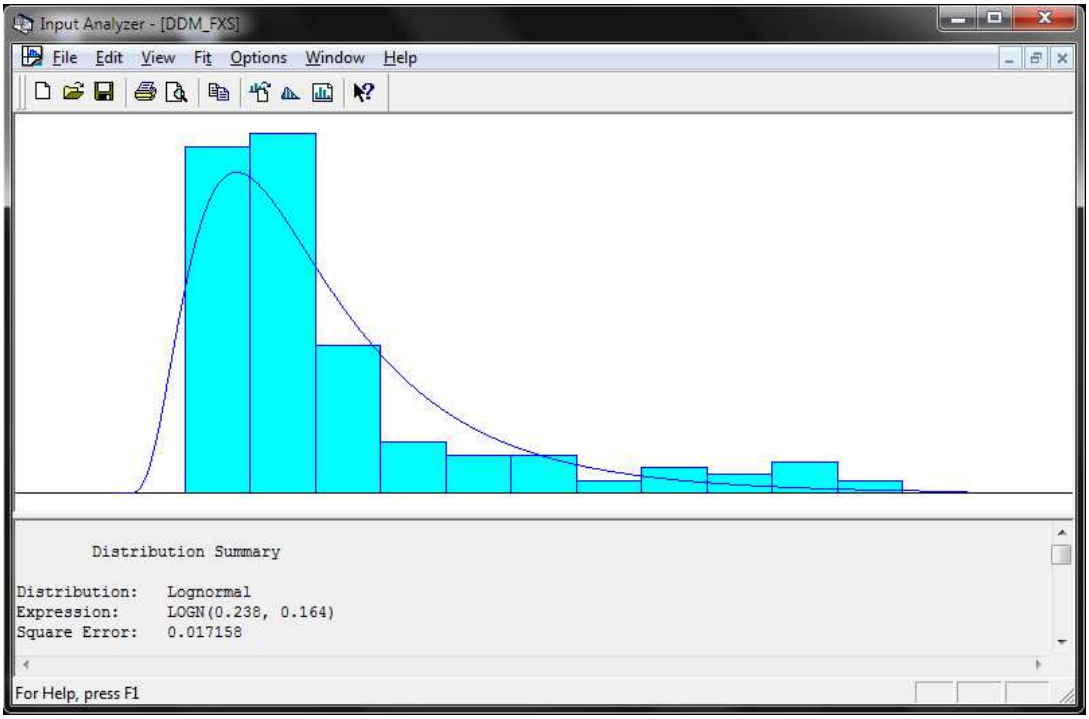

Figura 40 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FXS

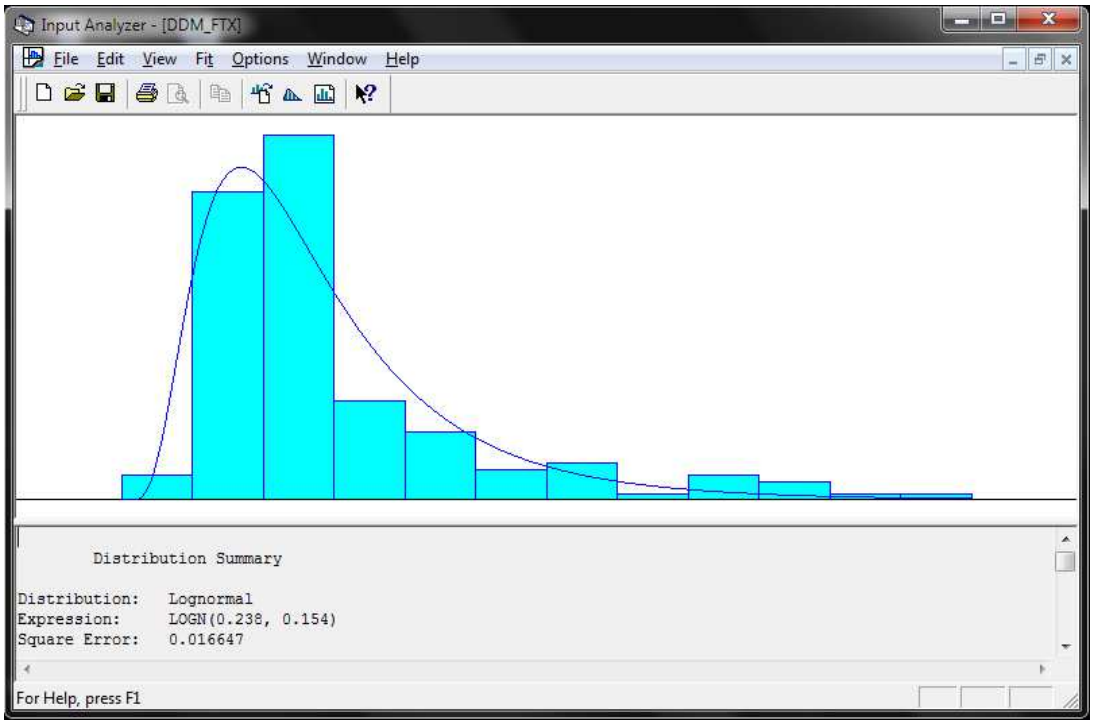

Figura 41 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal FTX

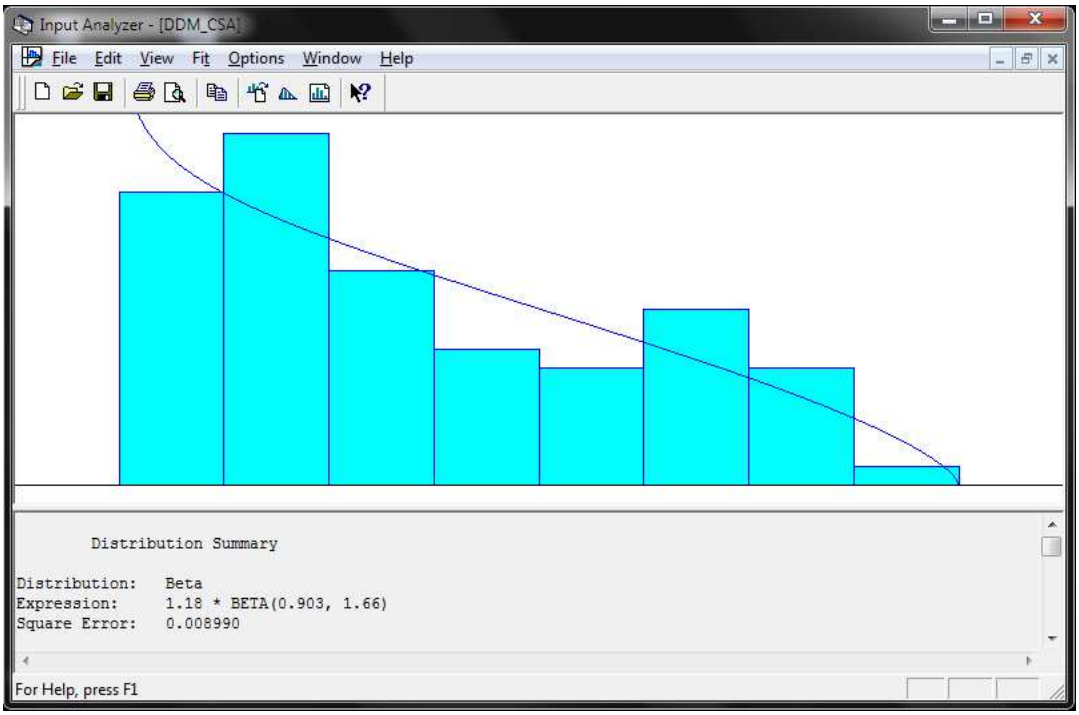

Figura 42 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal CSA

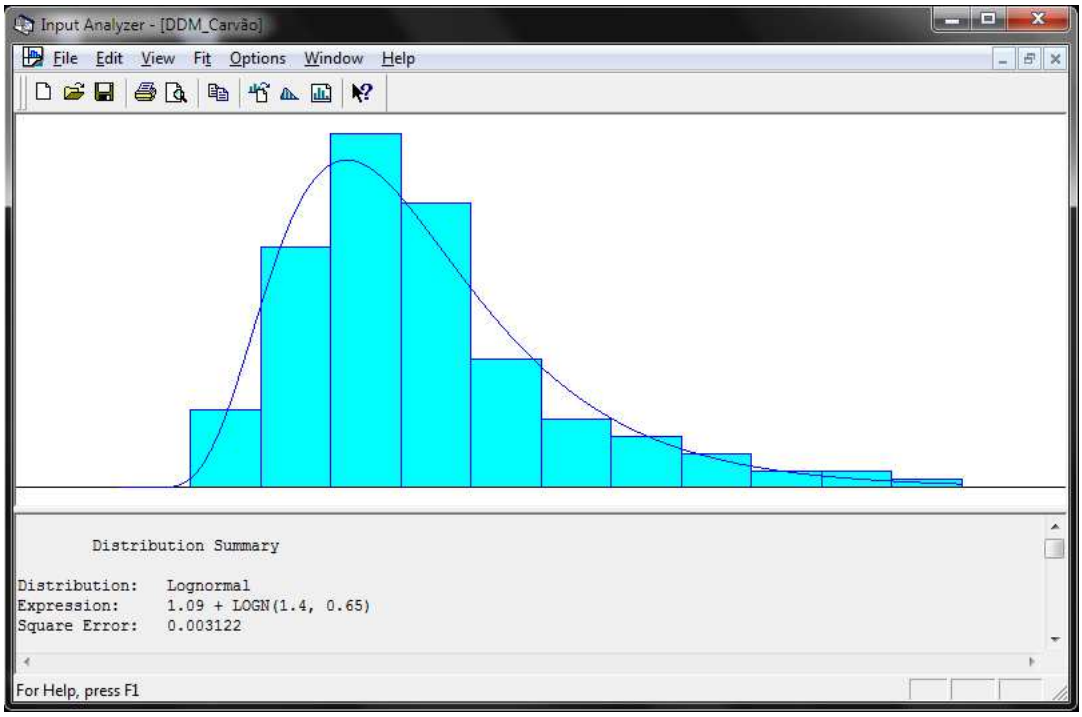

Figura 43 - Distribuição do Tempo Depois da Descarga no Terminal de Carvão

ANEXO B – TESTES DE HIPÓTESE PARA IGUALDADE DAS VARIÂNCIAS

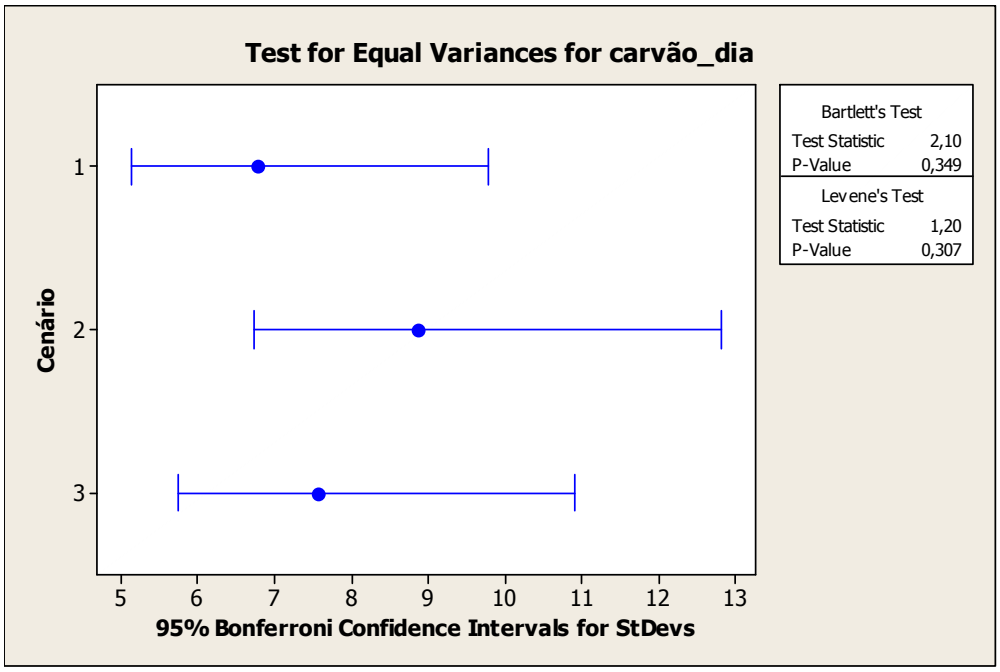

Figura 44 - Teste de Igualdade das Variâncias (Carvão)

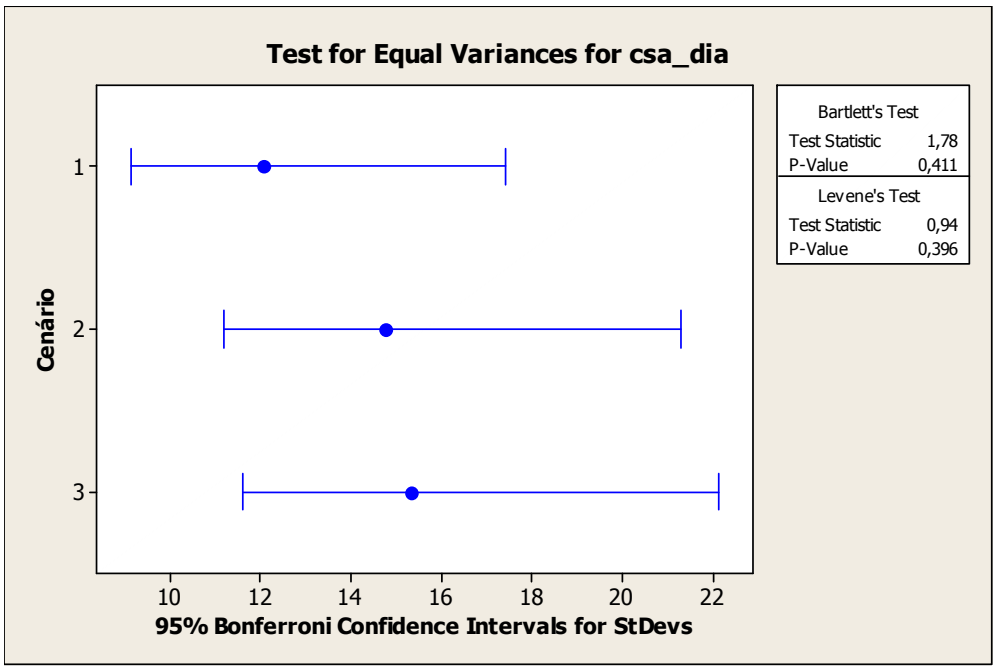

Figura 45 - Teste de Igualdade das Variâncias (CSA)

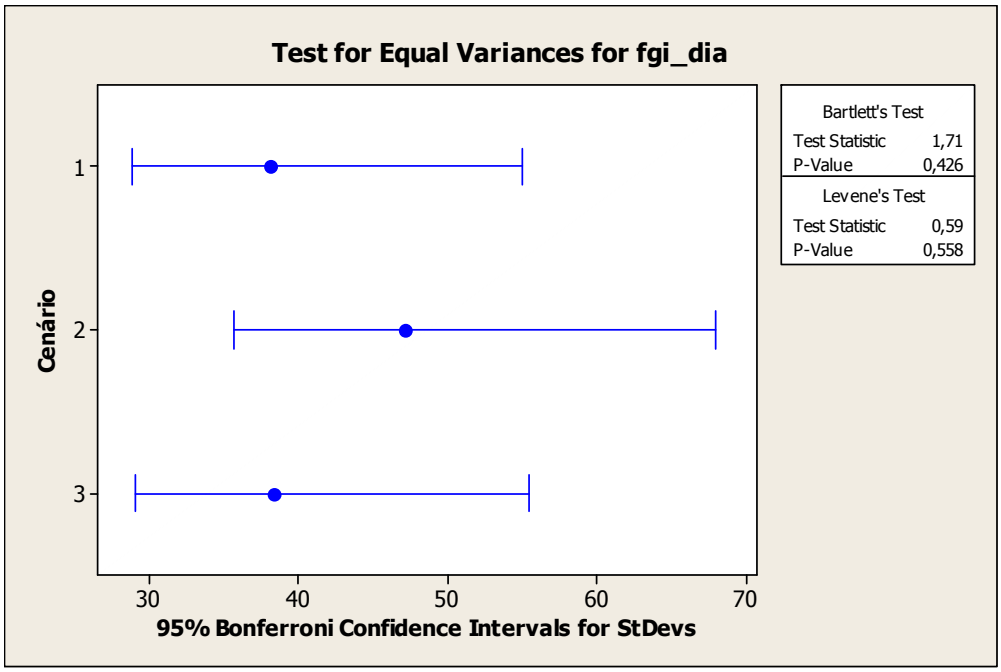

Figura 46 - Teste de Igualdade das Variâncias (FGI)

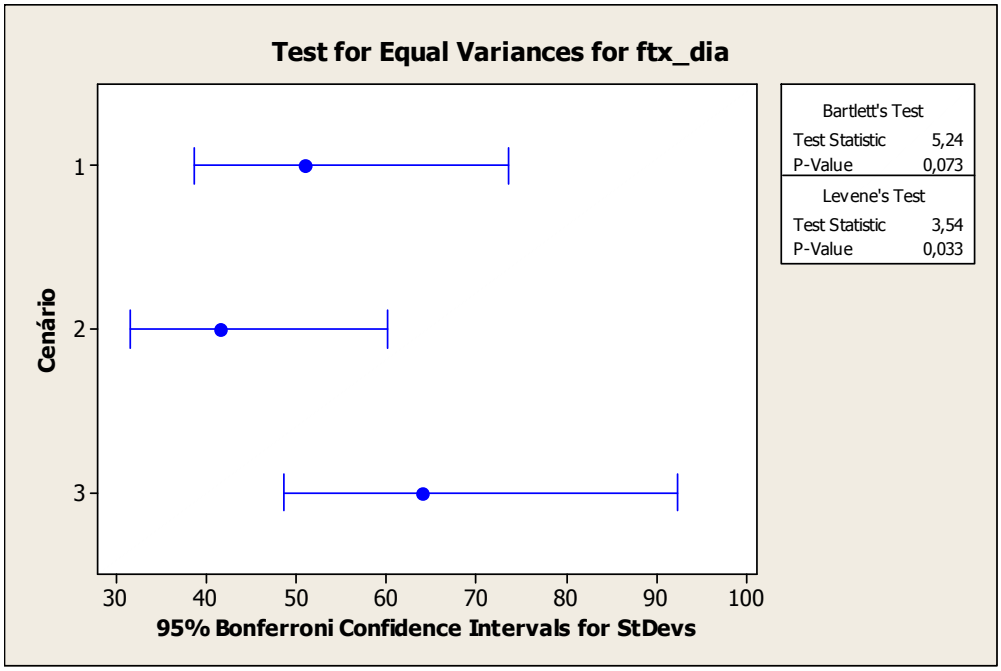

Figura 47 - Teste de Igualdade das Variâncias (FTX)

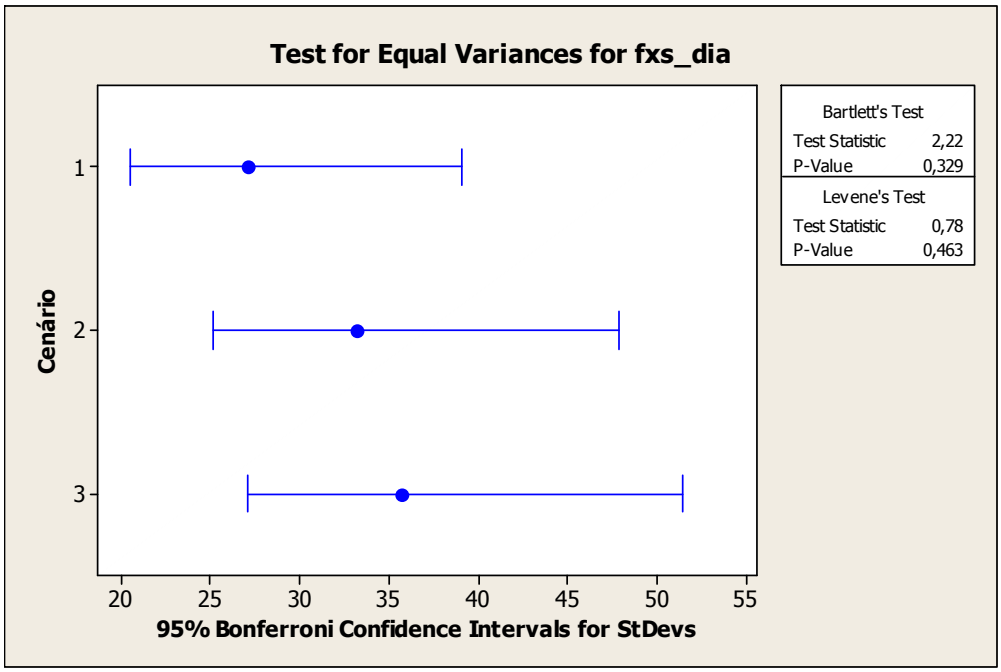

Figura 48 - Teste de Igualdade das Variâncias (FXS)

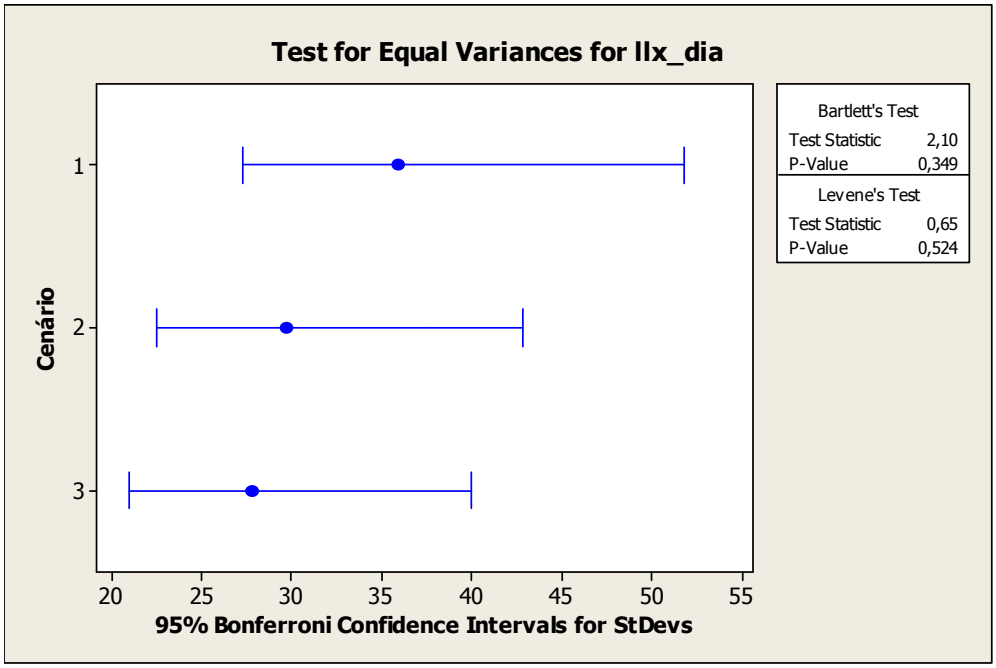

Figura 49 - Teste de Igualdade das Variâncias (LLX)

ANEXO C – ANÁLISES DE VARIÂNCIA (ANOVA)

One-way ANOVA: carvão_dia versus Cenário

```
Source    DF      SS    MS     F      P
Cenário    2    30,0  15,0  0,25  0,782
Error     87  5285,8  60,8
Total     89  5315,8

S = 7,795   R-Sq = 0,56%   R-Sq(adj) = 0,00%


                           Individual 95% CIs For Mean Based on
                           Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  ---------+---------+---------+---------+
1      30  69,820  6,793      (-------------*-------------)
2      30  70,480  8,882         (-------------*--------------)
3      30  69,067  7,565  (-------------*-------------)
                           ---------+---------+---------+---------+
                                 68,0      70,0      72,0      74,0

Pooled StDev = 7,795
```

Figura 50 - ANOVA Trens Terminal de Carvão

One-way ANOVA: csa_dia versus Cenário

```
Source    DF     SS   MS     F      P
Cenário    2    292  146  0,73  0,484
Error     87  17389  200
Total     89  17681

S = 14,14   R-Sq = 1,65%   R-Sq(adj) = 0,00%


                           Individual 95% CIs For Mean Based on
                           Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  ----+---------+---------+---------+-----
1      30  119,48  12,09  (------------*------------)
2      30  120,91  14,77     (------------*------------)
3      30  123,81  15,34             (------------*-----------)
                           ----+---------+---------+---------+-----
                           116,0     120,0     124,0     128,0

Pooled StDev = 14,14
```

Figura 51 - ANOVA Trens Terminal CSA

One-way ANOVA: fgi_dia versus Cenário

```
Source   DF      SS    MS     F      P
Cenário   2     753   376  0,22  0,804
Error    87  149581  1719
Total    89  150334

S = 41,46   R-Sq = 0,50%   R-Sq(adj) = 0,00%


                          Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev   -+---------+---------+---------+--------
1      30  1128,3   38,2       (--------------*--------------)
2      30  1123,9   47,1   (--------------*--------------)
3      30  1131,0   38,5          (--------------*--------------)
                          -+---------+---------+---------+--------
                         1110      1120      1130      1140

Pooled StDev = 41,5
```

Figura 52 - ANOVA Trens Terminal FGI

One-way ANOVA: ftx_dia versus Cenário

```
Source   DF      SS    MS     F      P
Cenário   2    1977   989  0,35  0,705
Error    87  245170  2818
Total    89  247147

S = 53,09   R-Sq = 0,80%   R-Sq(adj) = 0,00%


                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  --+---------+---------+---------+-------
1      30  1547,0   51,0  (------------*------------)
2      30  1558,3   41,7          (------------*------------)
3      30  1554,4   64,1       (------------*------------)
                          --+---------+---------+---------+-------
                         1530      1545      1560      1575

Pooled StDev = 53,1
```

Figura 53 - ANOVA Trens Terminal FTX

One-way ANOVA: fxs_dia versus Cenário

```
Source    DF     SS    MS     F      P
Cenário    2   1186   593  0,57  0,566
Error     87  90145  1036
Total     89  91331

S = 32,19   R-Sq = 1,30%   R-Sq(adj) = 0,00%


                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  -------+---------+---------+---------+--
1      30  614,23  27,10  (--------------*-------------)
2      30  615,15  33,17   (--------------*--------------)
3      30  622,35  35,69            (--------------*--------------)
                          -------+---------+---------+---------+--
                             608,0     616,0     624,0     632,0

Pooled StDev = 32,19
```

Figura 54 - ANOVA Trens Terminal FXS

One-way ANOVA: llx_dia versus Cenário

```
Source    DF     SS    MS     F      P
Cenário    2   4626  2313  2,36  0,101
Error     87  85441   982
Total     89  90067

S = 31,34   R-Sq = 5,14%   R-Sq(adj) = 2,96%


                          Individual 95% CIs For Mean Based on
                          Pooled StDev
Level   N    Mean  StDev  ---------+---------+---------+---------+
1      30  687,35  35,94       (----------*-----------)
2      30  699,63  29,74                   (-----------*----------)
3      30  682,61  27,75  (-----------*----------)
                          ---------+---------+---------+---------+
                                 680       690       700       710

Pooled StDev = 31,34
```

Figura 55 - ANOVA Trens Terminal LLX

ANEXO D - TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

_____	_____
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
_____	_____
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.