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

LEANDRO ROBERTO PEREIRA

SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM UM TRECHO DE CAPACIDADE DE CIRCULAÇÃO REDUZIDA: SISTEMA CREMALHEIRA MRS LOGÍSTICA S.A.

JUIZ DE FORA
2014

LEANDRO ROBERTO PEREIRA

SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM UM TRECHO DE CAPACIDADE DE CIRCULAÇÃO REDUZIDA: SISTEMA CREMALHEIRA MRS LOGÍSTICA S.A.

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.

Orientador: Prof. Fernando Marques de Almeida Nogueira, D.Sc.

Co-Orientador: Eng. Marcelo Neder Machado

JUIZ DE FORA

2014

Pereira, Leandro Roberto.
SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM UM TRECHO DE CAPACIDADE DE CIRCULAÇÃO REDUZIDA: SISTEMA CREMALHEIRA MRS LOGÍSTICA S.A. / Leandro Roberto Pereira. -- 2014.
48 f.

Orientador: Fernando Marques de Almeida Nogueira
Coorientador: Marcelo Neder Machado
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2014.

1. Simulação de Eventos Discretos. 2. Transporte Ferroviário. I. Marques de Almeida Nogueira, Fernando, orient. II. Neder Machado, Marcelo, coorient. III. Título.

LEANDRO ROBERTO PEREIRA

SIMULAÇÃO DE UMA OPERAÇÃO FERROVIÁRIA EM UM TRECHO DE CAPACIDADE DE CIRCULAÇÃO REDUZIDA: SISTEMA CREMALHEIRA MRS LOGÍSTICA S.A.

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 03 de Junho de 2014.

BANCA EXAMINADORA

_____

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

Universidade Federal de Juiz de Fora

_____

Eng. Marcelo Neder Machado (Co-Orientador)

MRS Logística S.A.

_____

M.Sc., Eduardo Pestana de Aguiar

Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter guiado todos meus passos até aqui e ter concedido mais essa vitória em minha vida.

Aos meus pais José Roberto e Nelsa, por terem me ensinado os verdadeiros valores da vida, pela paciência e pelo incentivo em todos os momentos.

A meu irmão Iago, por compreender os momentos em que estive ausente e por, mesmo sem saber, ser um dos grandes motivadores para esta conquista.

Aos meus avós Lourdes e Silvestre (*in memorian*), por terem sempre acreditado em meus sonhos e nunca terem medidos esforços para que estes se tornassem realidade.

A todos os familiares e amigos com os quais sempre pude contar nos piores e melhores momentos dessa caminhada.

Ao Fernando, orientador deste trabalho, não só pelos conhecimentos aqui compartilhados, mas por todos aqueles transmitidos ao longo do curso.

Ao Marcelo, pela amizade construída e por toda confiança e apoio transmitido desde que nos conhecemos.

Ao Eduardo, pelas sugestões, incentivos e disponibilidade em me auxiliar neste trabalho.

A Mais Consultoria Jr. e a MRS Logística por, mais que terem contribuído para minha formação pessoal e profissional, terem me dado a oportunidade de conhecer e conviver com pessoas fantásticas.

A todos os mestres que se dispuseram a contribuir para meu crescimento e aprendizado como Engenheiro de Produção.

Aos Pijamas e aos Improdutivos, por terem compartilhados os melhores momentos que a Faculdade de Engenharia poderia ter oferecido e por terem feito desse período o melhor da minha vida. Que o futuro sempre nos reserve momentos como estes.

A todos, o meu MUITO OBRIGADO!!!

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos que permita estudar alternativas de investimentos para uma operação ferroviária em um trecho de capacidade de transporte reduzida: o Sistema Cremalheira da MRS Logística S.A.. Único no mundo, o Sistema Cremalheira se diferencia de uma operação ferroviária convencional por estar localizado num trecho bastante íngreme e, por conseqüência disso, gerar uma série de restrições quanto ao tamanho e peso das composições que circulam pelo local. Para a empresa estudada, ter um correto dimensionamento da capacidade de transporte do Sistema é essencial dado que este constitui seu principal acesso ao Porto de Santos, o maior do país. Neste trabalho, foram avaliados cenários de investimentos de expansão para o Sistema Cremalheira e o nível de serviço (quantificado através do tamanho médio das filas para acesso a ele) gerado por cada um deles para atender à demanda informada pela companhia para os próximos anos. A partir dessa relação, geraram-se informações que poderão auxiliar a empresa no processo decisório de conciliar o atendimento de sua demanda à estratégia de atendimento aos seus clientes.

Palavras-chave: Simulação de Eventos Discretos. Capacidade de Transporte. Ferrovia.

ABSTRACT

This paper aims to develop a model of discrete event simulation that allows the studying of investment alternatives for a railway operation in a low capacity of transportation stretch: MRS Logística S. A.'s *Rack System*. A unique model in the world, the *Rack System* differs from a conventional railway operation because it is located in a rather steep stretch and, as a result, it demands a range of restrictions concerning the height and weight of the railroad trains that round the place. It is essential to the company in question to have an accurate idea of the *System's* capacity of transportation dimensioning, as far as this is its main way of accessing Santos Port, the biggest in the country. In this paper, different expansion investment scenarios for *Rack System* and the level of service (measured by the average size of the lines to access it) generated by each one of them to meet the demand informed by the company to the next years have been evaluated. From this relation, it has been collected further information that might help the company in the decision making process of conciliating its demand led and the strategy of offering a good service to customers.

Keywords: Discret Event Simulation. Transportat Capacity. Railway.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Previsão de movimentação de carga no Porto de Santos (em milhões de tonelada) 13
Figura 2: Formas de estudar um sistema 22
Figura 3: Relacionamento dos componentes da simulação 26
Figura 4: Mudanças de estado em modelos contínuos 27
Figura 5: Mudanças de estado em modelos discretos 28
Figura 6: Malha da MRS Logística S.A. 29
Figura 7: Sistema Cremalheira 30
Figura 8: Cremalheira (vista de Raiz da Serra) 31
Figura 9: Pátio de Paranapiacaba 32
Figura 10: Pátio de Raiz da Serra 33
Figura 11: Pátio de Campo Grande 34
Figura 12: Pátio de Piaçaguera 35
Figura 13: Modelo de simulação em Arena 39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cenários avaliados (horizonte 2014-2018)..... 40
Tabela 2: Cenários avaliados (horizonte 2019-2021)..... 40
Tabela 3: Resultados da simulação (Cenários 1-4) 42
Tabela 4: Resultados da simulação (cenários 5 - 12) 43

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CODESP – Companhia Docas do Estado de São Paulo

CPTM – Companhia Paulista de Trens Metropolitanos

FIFO – *First in, first out* (Primeiro a entrar, primeiro a sair)

ICG – Pátio de Campo Grande

IPA – Pátio de Paranapiacaba

IPG – Pátio de Piaçaguera

IRS – Pátio de Raiz da Serra

LIFO – *Last in, first out* (Último a entrar, primeiro a sair)

PIB – Produto Interno Bruto

PN – Passagem em nível

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

S.A. – Sociedade Anônima

® - Marca Registrada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 13
1.2 OBJETIVO 14
1.3 JUSTIFICATIVA 15
1.4 ESCOPO 15
1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA 16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 17

2. REVISÃO DE LITERATURA 18

2.1 ANÁLISE DE CAPACIDADE 18
2.1.1 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA CAPACIDADE 18
2.1.2 CAPACIDADE E FORMAÇÃO DE FILAS 20
2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS 22
2.2.1 ANÁLISE DE SISTEMAS 22
2.2.2 TEORIA DAS FILAS 23
2.2.3 SIMULAÇÃO 25

3. DESENVOLVIMENTO 29

3.1 A MRS LOGÍSTICA S.A. 29
3.2 O SISTEMA CREMALHEIRA 30
3.2.1 CREMALHEIRA 31
3.2.2 PÁTIOS PARANAPIACABA (IPA) E RAIZ DA SERRA (IRS) 32
3.2.3 PÁTIO DE CAMPO GRANDE (ICG) 33
3.2.4 PÁTIOS DE PIAÇAGUERA (IPG) 35
3.3 O MODELO DE SIMULAÇÃO 36
3.3.1 COLETA DE DADOS E PREMISSAS 36
3.3.2 MODELAGEM 37

4. ANÁLISE DE RESULTADOS 41

4.1 ADERÊNCIA DO MODELO 41
4.2 FORMAÇÃO DE FILAS 42

5. CONCLUSÃO 44

6. REFERÊNCIAS 45

7. ANEXO 1 – TERMO DE AUTENTICIDADE 47

8. ANEXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA 48

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Segundo previsões divulgadas pela Companhia Docas do Estado de São Paulo (CODESP, 2013), o Porto de Santos poderá apresentar nos próximos 10 anos um crescimento de até 90% do volume movimentado anualmente atingindo um patamar de 230 milhões de toneladas em 2024

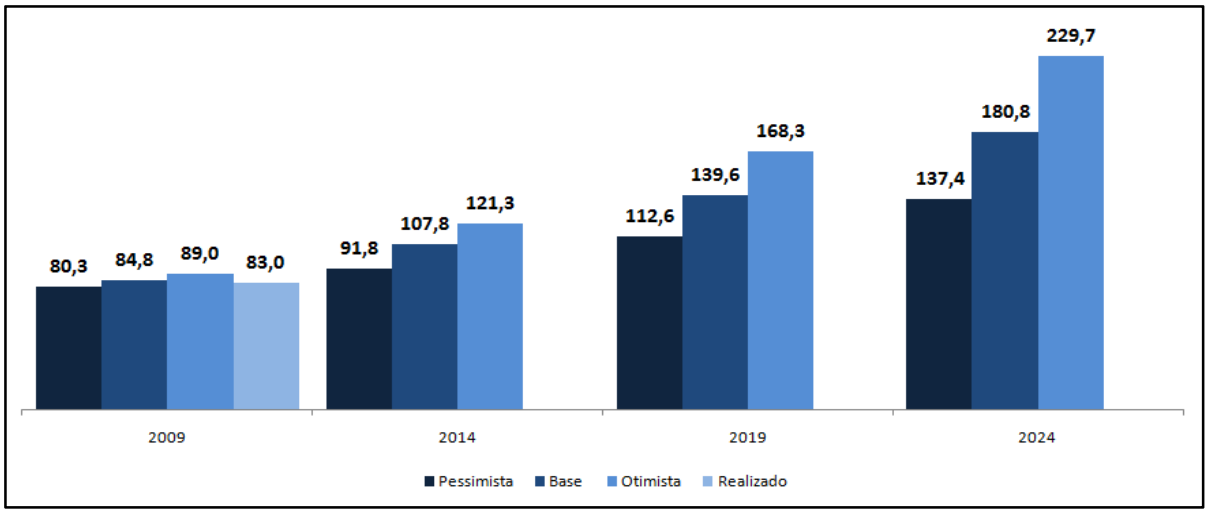

Figura 1: Previsão de movimentação de carga no Porto de Santos (em milhões de tonelada)
Fonte: CODESP (2013)

Fica evidente que para movimentar tal volume é necessário um eficiente sistema logístico que permita que as mercadorias cheguem e saiam do porto de forma adequada. A atual matriz de transportes brasileira, majoritariamente constituída pelo modal rodoviário, entretanto, se mostra um modelo inadequado para suportar este crescimento trazendo um risco do país vivenciar um verdadeiro caos logístico que trará prejuízos para as diversas partes envolvidas no comércio exterior.

Alguns efeitos desse caos logístico já podem ser percebidos. No primeiro trimestre de 2013, foi noticiado pelos principais jornais do país a fila de caminhões gerada para acessar os terminais de grãos em Santos devido à supersafra de soja ocorrida naquele ano e que levou ao atraso dos embarques e o cancelamento da compra de milhões de toneladas da *commoditie* pela China, uma das principais importadoras.

Em 2012, 68% dos transportes terrestres do porto foi realizado via rodovia, 24% via ferrovia e 8% por dutos (CODESP, 2013). Para especialista do setor, está claro que a principal

alavanca para a solução do gargalo no local é aumentar a participação do modal ferroviário, a exemplo de outros portos como Hamburgo, na Alemanha, e Houston, nos Estados Unidos, onde a ferrovia tem uma participação de cerca de 60% do volume total movimentado em terra.

Diante deste cenário, cabe a todos os envolvidos no processo logístico tomar as medidas necessárias para mudar este *status*. Enquanto o governo tem o papel decisivo de promover as políticas que direcionam ao alcance dos objetivos pretendidos, cabe às empresas públicas e privadas do setor estruturarem suas operações, elevando-a a novos padrões de eficiência e desenvolver planos de expansão de sua capacidade que tornem viável a realização do volume projetado.

Estes planos, entretanto, envolvem de maneira geral investimentos de grande porte e, naturalmente, é esperado que os retornos trazidos pelos mesmos sejam maiores que o valor despendido. Assim, os projetistas e tomadores de decisão se defrontam com o problema de comprovar que os benefícios serão maiores que o investido, e que, portanto, o projeto proposto deve receber a atenção devida. Hoje, porém, já existem ferramentas que facilitam este processo. São ferramentas que simulam o processo atual e as modificações propostas e a partir das comparações destes cenários, permitem inferir sobre a viabilidade ou não do novo projeto (VIEIRA, 2006).

Segundo TOZI & CORREIA (2007) a simulação é uma ferramenta que se ajusta a muitos problemas relativos a sistemas logísticos e de transportes, sendo que as questões na área mais apropriada para estudos através deste método são: a criação de novos sistemas logísticos; a avaliação de alternativas de *designs*; e o refinamento e redesenho de sistemas logísticos que já existem a fim de melhorar sua eficiência e eficácia

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo:

- Desenvolver um modelo de simulação por eventos discretos que represente o Sistema Cremalheira da MRS Logística S.A;.

- Avaliar quantitativamente o nível de serviço (fila) gerado pelos cenários que serão avaliados;

- Comparar os cenários através da relação diferentes tipos de investimentos necessários X nível de serviço (fila) gerado.

1.3 JUSTIFICATIVA

A MRS Logística S.A é a concessionária ferroviária federal que atua nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, sendo responsável pelo acesso ferroviário ao porto de Santos. Diante do cenário de crescimento do volume movimentado pelo porto, a empresa tem planos de expandir sua operação local a fim de aumentar sua capacidade de transporte.

O principal acesso da MRS à Baixada Santista é realizado através do Sistema Cremalheira. O Sistema Cremalheira, cujo processo será melhor abordado no capitulo 3, porém, gera uma série de restrições para os trens que circulam por ele, o que o torna o principal gargalo para a operação local, sendo seu correto dimensionamento essencial para o atendimento ao volume projetado.

Investimentos ferroviários, entretanto, envolvem altos custos o que torna fundamental a existência de critérios que favoreçam o processo decisório. A empresa, porém, não conta hoje com nenhum instrumento que forneça informações com o nível de abrangência esperada para avaliar os investimentos do sistema em análise.

Assim, as principais motivações para a escolha deste tema são: a importância que este trabalho tem para a empresa citada e para os diversos setores da sociedade que utilizam os seus serviços e também o grande potencial de desenvolvimento acadêmico gerado por sua realização.

1.4 ESCOPO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos para o Sistema Cremalheira da MRS Logística S.A. Como Sistema Cremalheira é considerado o conjunto formado pelo trecho da malha da companhia localizado entre os pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra (que corresponde à Cremalheira) e os quatro pátios de apoio à sua operação o que inclui, além dos dois já citados, Campo Grande e Piaçaguera.

Todos os dados de entrada no modelo, tais como informações de demanda e tempo de atividades foram fornecidas pela própria companhia.

Foram avaliados o cenário atual, bem como outros cenários formulados a partir de soluções já mapeadas internamente pela companhia. A avaliação de cada cenário consistiu em medir o nível de serviço (quantificado pelo tamanho da fila de acesso ao sistema) para o atendimento das demandas definidas até o horizonte de 2021.

Assim, o esperado deste trabalho é estabelecer a relação “tipo de investimentos necessários x nível de serviço esperado”.

1.5 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Segundo a classificação estabelecida por MIGUEL (2010), este estudo pode ser definido como sendo de natureza aplicada, objetivos exploratórios e abordagem quantitativa, tendo como método de pesquisa o uso de modelagem e simulação.

É de natureza aplicada por que objetiva gerar conhecimentos para a solução de um problema especifico e real, ou seja, de aplicação prática. Seus objetivos são exploratórios por buscarem um maior conhecimento acerca do problema analisado, possibilitando a proposição de soluções. E a abordagem é quantitativa, pois todas as análises e conclusões serão realizadas através dos resultados obtidos por meio de uma ferramenta de simulação.

Dado o método escolhido para o trabalho, o mesmo foi estruturado em etapas baseadas na metodologia definida por FREITAS (2008) intitulada “Passos na Formulação de um Estudo Envolvendo Modelagem e Simulação”. Segue relação com as etapas estabelecidas e sua descrição:

- Formulação e análise do problema: etapa inicial onde os objetivos e escopo foram definidos. Corresponde aos itens 2, 3 e 4 deste capitulo.

- Planejamento do projeto: apesar de contemplar uma abordagem mais generalista, dado a natureza deste trabalho, seu planejamento ficou restrito a um cronograma temporal das atividades que seriam desenvolvidas.

- Coleta de macro informações e dados: nesta etapa pretende-se avaliar as particularidades da operação do sistema a fim de obter informações para a construção do modelo. Paralelamente, espera-se obter os valores a serem considerados para todas as variáveis utilizadas como *input* para a simulação, tais como tempo das atividades e a demanda em número de trens.

- Tradução do modelo: consiste em transformar as diversas informações obtidas na etapa anterior numa linguagem de simulação apropriada. Para este trabalho será utilizado o software *Arena*®, desenvolvido pela empresa americana Rockwell Automation.

- Verificação e validação: verificar consiste em confirmar se o modelo opera de acordo com o esperado (sem erros); e validar, se ele representa os resultados do modelo real.

Esta etapa tem o objetivo garantir que o modelo criado tem a capacidade de gerar as respostas esperadas.

- Experimentação: aqui serão executadas as simulações que irão gerar o resultado alvo para cada cenário a ser avaliado.

- Comparação de sistemas: esta etapa consiste em comparar os resultados dos cenários através da análise do nível de serviço gerado (quantificado pelo tamanho médio das filas de entrada no sistema) e os níveis de investimentos realizado.

- Documentação, apresentação de resultados e implementação: será elaborado um relatório contendo o desenvolvimento e as conclusões obtidas através do estudo que serão posteriormente apresentados à Universidade, como requisito para colação de grau do autor, e Empresa, para conhecimento das conclusões e ferramenta para sua tomada de decisão.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para a melhor organização das informações e facilitar a compreensão das atividades desenvolvidas, este trabalho está estruturado em cinco capítulos:

O capitulo 1 tem por objetivo apresentar uma visão geral do mesmo, situando o leitor sobre o tema desenvolvido. Ao longo deste serão apresentados os objetivos almejados, os motivos que justificaram sua escolha, o escopo a qual está submetido e também a metodologia utilizada.

O capitulo 2 trará a revisão bibliográfica sobre Análise de Capacidade e Modelagem e Simulação, conceitos empregados no desenvolvimento do estudo.

No capitulo 3, além de um maior detalhamento da unidade no qual o trabalho foi realizado e do problema a qual se propõe solucionar, será apresentado o modelo de simulação, com as lógicas e premissas adotadas.

O capitulo 4 se propõem a apresentar e analisar os resultados obtidos através da execução do modelo.

Por fim, no capitulo 5, serão discorridos sobre o alcance dos objetivos pretendidos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ANÁLISE DE CAPACIDADE

2.1.1 Planejamento e Controle da Capacidade

De acordo com CORRÊA & CORRÊA (2004) a capacidade produtiva de uma unidade de operações pode ser definida como o volume máximo de atividade de agregação de valor que pode ser atingido por ela sob condições normais de operação.

Para SLACK *et al*. (2009), a tarefa de determinar a capacidade de uma operação de forma que ela responda à demanda é chamada de Planejamento e Controle da Capacidade. De acordo com BRITO (2007), quanto maior o tempo necessário para implementação de uma expansão na capacidade, maior a criticidade de seu planejamento. Segundo o autor, se a capacidade de uma operação pode ser ampliada em poucos dias, um plano para os próximos cinco anos pode parecer desnecessário. Entretanto, se for necessário meses ou anos para sua execução, um planejamento estratégico de capacidade é indispensável.

SLACK *et al.* (2009) aponta ainda que enquanto muitas empresas operam abaixo de sua capacidade, seja devido à falta de demanda ou propositalmente devido à políticas internas que favoreçam ao rápido atendimento de pedidos, outras, encontram partes de sua operação funcionando abaixo da capacidade ao mesmo tempo em que outras partes estão trabalhando em seu limite. A estas partes, ele chama de restrições de capacidade. Por ser um fator limitante de toda a operação, é esperado que as restrições tenham prioridade ao se fazer qualquer expansão no sistema.

Ao decidir o nível de capacidade que deve manter ao longo do tempo, uma organização deve avaliar o *trade-off* entre a sua falta e o seu excesso. Enquanto o primeiro pode incorrer em perdas de clientes pelo nível de serviço deficiente, o segundo pode levar a um custo de oportunidade ou a estratégias forçadas para o aumento da demanda, como, por exemplo, a redução de preços. BRITO (2007).

Assim, uma correta gestão da capacidade se torna imprescindível para o alcance do sucesso pelas organizações. Para tal, SLACK *et al*. (2009) define três etapas para a realização do planejamento da capacidade: medir a demanda e capacidade agregadas; identificar as políticas alternativas; e escolher a mais adequada e aplicá-la.

HAYES *et al*. (apud LIBRELATO *et al*., 2011) afirma que a capacidade pode ser

mensurada por meio de diversos parâmetros envolvidos na operação, como: tempo, pessoas, equipamentos ou estações de trabalho. Já SLACK *et al*. (2009) diz que apenas operações altamente padronizadas e repetitivas conseguem definir sem ambigüidade sua capacidade. Segundo este mesmo autor, enquanto operações de natureza mais simples, com baixa variabilidade de produtos, podem medir sua capacidade com base no volume de produção, aquelas com maior quantidade de produtos e com demandas diferentes para os recursos dos processos podem medi-la pela disponibilidade destes.

Ainda conforme SLACK *et al*. (2009), há três políticas alternativas de capacidade "puras", sendo que as organizações normalmente utilizam mais de uma simultaneamente, nas chamadas políticas mistas. As três políticas definidas pelo autor são:

Política de Capacidade Constante: onde se ignora as flutuações da demanda e mantêm os níveis de atividade constante.

Política de Acompanhamento da Demanda: onde a capacidade é ajustada para refletir qualquer alteração ocorrida na demanda

Política de Gestão da Demanda: nesta política, a organização tenta mudar sua demanda a fim de ajustá-la à capacidade.

Uma abordagem normalmente utilizada para dimensionamento de capacidade consiste em tratar a demanda em função de seus volumes acumulados. Com a utilização deste método, é possível ignorar determinados picos de produção que excedem a capacidade do processo, a partir da presunção de que o volume extra pode ser produzido num período anterior, onde há sobra de capacidade, e estocado até quando necessário. Para tanto, essa abordagem objetiva que a curva de demanda acumulada esteja sempre abaixo da capacidade acumulada para um mesmo período de forma que aquela seja sempre atendida. Certamente que determinados fatores devem ser avaliados para adoção da política, sendo o principal deles o *trade-off* entre os custos envolvidos para expandir a capacidade e aqueles gerados pela produção de estoques (SLACK *et al*., 2009).

2.1.2 Capacidade e Formação de Filas

Apesar de um método muito útil para operações onde há possibilidade de estocagem dos produtos acabados, a utilização de representações acumuladas não ajudaria muito àquelas cuja à produção só é iniciada após a confirmação da demanda. Este tipo de operação, que ocorre mais comumente em empresas de serviços, tem por característica o fato da produção acumulada nunca poder estar acima da demanda acumulada e, por conseqüência, gerar filas no sistema (SLACK *et al*., 2009).

O conceito de fila segundo LOVELOCK & WRIGHT (2002 *apud* SCHONS & RADOS, 2009) é a "representação de uma linha de pessoas, veículos, outros objetos físicos ou intangíveis que aguardam sua vez de serem atendidos, ocorrendo quando o número dos que chegam excede à capacidade de atendimento do sistema".

SLACK *et al*. (2009) aponta que filas são formadas quando a chegada de demanda individuais em uma operação é difícil de prever ou o tempo para produção de um produto ou serviço é incerto, ou em ambos os casos. Além desse, os autores definem também outros conceitos que são comumente utilizados em sistema com formação de fila:

População: é a fonte de suprimento de clientes para o sistema, podendo ser finita (quando o número de possíveis clientes é conhecido) ou infinita.

Taxa de Chegada: é a proporção em que os clientes chegam. Raramente os clientes chegam com uma taxa constante, havendo uma variabilidade nesta. Por esta razão, esta taxa é normalmente descrita em termos de distribuições de probabilidade, o que pode levar o sistema a ficar um determinado período sem que nenhum cliente chegue e, num outro período de igual tempo, ter todos os seus clientes chegando próximos uns dos outros.

Fila: formada por clientes que esperam para ser atendidos. Alguns sistemas podem ainda ter uma limitação da quantidade de clientes que podem ficar em espera simultaneamente (capacidade).

Rejeição: ocorre quando a fila atinge sua capacidade e não aceita um novo cliente.

Recusa: acontece em casos onde os clientes têm vontade própria (seres humanos) e se recusam a juntar-se à fila.

Deserção: similar a Recusa, mas neste caso o cliente fica na fila por um tempo e depois a abandona.

Disciplina da Fila: é o conjunto de regras que determina a ordem na qual os clientes que esperam na fila serão atendidos. Apesar do vasto número de possibilidades de determinação de disciplinas de filas, algumas delas são mais conhecidas e utilizadas:

First in, First Out (FIFO): o primeiro cliente que chega ao sistema é o primeiro a ser atendido.

Last In, Last Out (LIFO): o ultimo cliente que chega ao sistema é o primeiro a ser atendido.

Prioridades ao consumidor: diferentes níveis de prioridade ou importância são dados a cada cliente seguindo os mais variados critérios, sendo aqueles que têm maior prioridade são atendidos primeiramente.

Ordem Aleatória: neste serviço a ordem de atendimento é feito por sorteio no qual todos elementos da fila têm igual chance se serem o próximo a ser atendido, independente de ordem de chegada ou qualquer outro critério

Atendentes (servidores): é a entidade que processa os clientes da fila. Em um sistema pode haver um número qualquer de atendentes, sendo que estes podem estar dispostos em paralelo ou em série. Os tempos de processamento, assim como as taxas de chegadas, normalmente sofrem variação para cada atendimento e, por isso, são normalmente expressos como uma função de probabilidade.

JOHSTON & CLARK (2002) entendem que as filas são de certo modo uma conseqüência natural das atividades de serviço, visto que as estratégias de nivelamento de capacidade não são totalmente eficazes e a formação de filas são geralmente inevitáveis.

Uma das questões centrais que devem ser respondidas pelo Planejamento da Capacidade em sistemas com fila é o número de atendentes que estarão disponível num dado momento. Como tanto a taxa de chegada, quanto o tempo de processamento são descritos por meio de funções probabilistas, é difícil coincidir a chegada de um cliente com a habilidade da operação lidar com ele. Assim, se a primeira for maior que a segunda, filas serão formadas, o que poderá trazer como conseqüência a perda de clientes que se recusam a ficar nela ou que em ocasiões futuras não utilizarão o serviço novamente. Já se ocorrer o contrário, os recursos terão uma baixa utilização e ficarão ociosos. Assim, para sistemas com formação de fila, o

maior problema está no *trade-off* entre o tempo de espera do cliente (nível de serviço) e a utilização do mesmo. (SLACK *et al*., 2009).

2.2 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

2.2.1 Análise de Sistemas

Sistemas podem ser definidos como “um conjunto de objetos, entre os quais se podem encontrar ou definir algum tipo de relação, que atuam e interagem (cooperam) com a intenção de alcançar um objetivo ou um propósito lógico” (TAYLOR apud FREITAS, 2008).

Segundo LEAL (2011), os sistemas podem ser estudados de duas maneiras: através da atuação direta sobre o mesmo ou pela utilização de modelos.

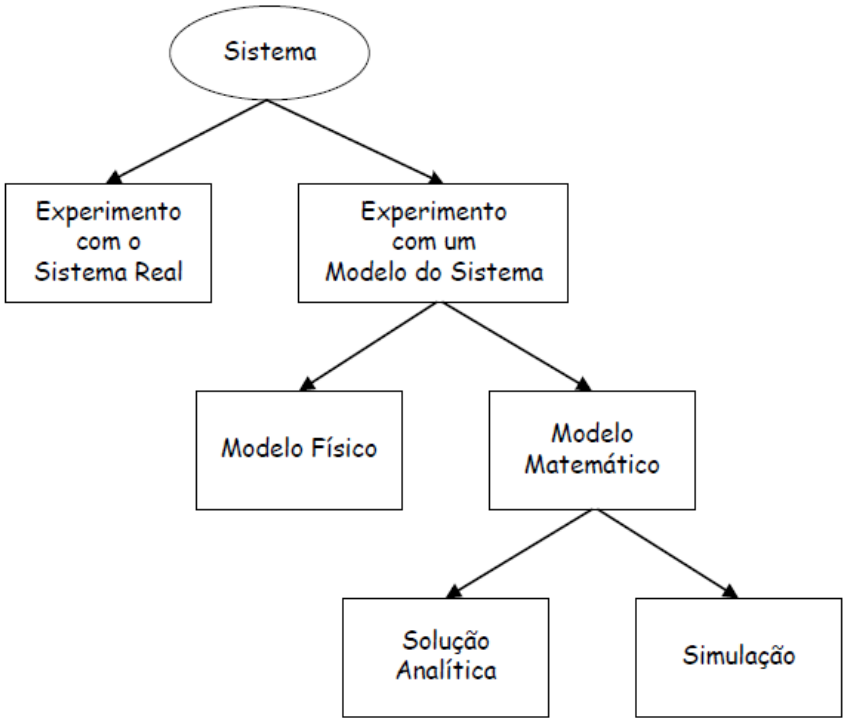

Figura 2: Formas de estudar um sistema
Fonte: LAW (*apud* LEAl, 2011)

PIDD (1999) define modelo como sendo “uma representação externa e explicita de parte da realidade da forma em que esta é vista pelas pessoas que a desenvolvem seja para entendê-la, mudá-la, gerenciá-la ou controlá-la”.

BANKS (1998) simplesmente o caracteriza como sendo a representação de um sistema real.

De acordo com a abordagem utilizada, os modelos, podem ser classificados como Físicos ou Matemáticos.

Os modelos físicos são baseados na construção de protótipos que posteriormente serão sujeitos as mesmas condições de funcionamento ou operação que o sistema real. Uma maquete de uma aeronave em projeto para estudar o comportamento do ar fluindo em sua fuselagem em um túnel de vento é um exemplo de aplicação de uma modelagem física (LEAL, 2011).

A modelagem matemática, por sua vez, consiste transformar a realidade numa relação de números, equações e/ou lógicas, podendo abranger soluções analíticas ou numéricas (simulação). De acordo com FREITAS (2008), enquanto na abordagem analítica emprega-se o uso de um conjunto de fórmulas matemáticas que permitem calcular as respostas desejadas, a abordagem via simulação implica na utilização de um programa computacional que executa uma série de instruções que após processadas transmitem ao usuário a sensação que o modelo representa, de fato, o sistema em que está fundamentado.

2.2.2 Teoria das Filas

O primeiro trabalho realizado com intenção de entender o comportamento das filas foi realizado na Dinamarca na década de 1910, quando o matemático A. K. Erlang começou a aplicar conceitos da teoria de probabilidade para resolver os problemas de tráfego da Telefônica de Copenhague e que acabou resultando na publicação do livro "*Solutions of some problems in the theory of probabilities of significance in automatictelephone exchanges*", em 1917. A partir daí, diversos outros setores passaram a usufruir das técnicas desenvolvidas por Erlang, que por essa razão, acabou sendo conhecido como pai do que ficou conhecido como "Teoria das Filas". (FREITAS, 2008; GARCIA, 2006; LAMARCA, 2008)

SINAY (2004 *apud* GARCIA, 2006), diz que a Teoria das Filas consiste na "modelagem analítica de processos ou sistemas que resultam em espera e tem como objetivo determinar e avaliar quantidades, denominadas medidas de desempenho, que expressam a produtividade/operação dos mesmos, citando entre essas medidas: número de elementos na fila, tempo de espera pelo atendimento e tempo ocioso dos prestadores do serviço".

ARENALES (et al. 2007 apud CHAVES et al. 2011), por sua vez, define Teoria das Filas como sendo um "método analítico que aborda o assunto por meio de fórmulas matemáticas, onde se estuda as relações entre as demandas e os atrasos sofridos pelo usuário

do sistema, para avaliação das medidas de desempenho dessa relação em função da disposição deste sistema".

De acordo com FREITAS (2008), para a modelagem de sistemas de fila, é comum se empregar notações que representam, de maneira resumida, a natureza física do mesmo e de seus processos. Dentre essas notações a mais conhecida é chamada de "notação de Kendall", que possui a forma A/S/m/B/K/SD, onde:

A: distribuição do tempo chegada;
S: distribuição do tempo de serviço;
M: número de servidores;
B: capacidade do sistema (*default* é ∞);
K: tamanho da população (*default* é ∞);
SD: disciplina da fila (*default* é FIFO);

Ainda segundo FREITAS (2008), os tipos de distribuição para tempos de chegada e de atendimento também são representados por uma nomenclatura, como se segue abaixo:

M: Exponencial;
$\mathbf{E_K}$: Erlang com parâmetro K;
$\mathbf{H_K}$: Hiperexponencial com parâmetro K;
D: Determinística (tempos constantes e variância zero);
G: Geral (o modelo não é especificado e o resultado válido para qualquer distribuição);

Dessa forma, por exemplo, uma notação de Kendall que retrata um sistema como sendo M/M/1/∞/∞/FIFO, indica que tanto o tempo de atendimento, quanto de chegadas têm distribuição exponencial (M e M), que há apenas um servidor (1), sem limitações de capacidade (∞), população ilimitada (∞) e fila com disciplina do tipo "Primeiro a chegar, primeiro a sair" (FIFO).

Como abordado, a Teoria das Filas é uma metodologia analítica, e, portanto, busca converter o sistema em fórmulas que descrevem seu comportamento. Modelos de naturezas diferentes, porém, têm um conjunto de fórmulas diferentes que o representam. Para modelos de filas mais comuns e simples, estas fórmulas já foram desenvolvidas por pesquisadores e

cientistas de gestão e podem ser encontradas em literaturas especificas da área. Sistemas mais complexos, entretanto, podem tornar muitas dessas fórmulas extremamente complicadas, sendo que para estes casos, programas de computadores que prevêem o comportamento da fila, a partir do uso de simulação, são quase sempre utilizados (SLACK *et al*., 2009).

2.2.3 Simulação

2.2.3.1 Introdução

Diferentes autores conceituam simulação de diferentes formas.

BANKS (1984) a define como a imitação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo.

GOTTFRIED (*apud* LEAL, 2011) conceitua simulação com sendo “uma atividade por meio da qual se pode obter inferências à respeito do comportamento de um sistema, por meio de um modelo correspondente, cujas relações de causas e efeitos são as mesmas que ocorrem no sistema em estudo”.

SCHIRIBER (*apud* FREITAS, 2008) diz que a simulação implica na modelagem de um processo ou sistema de forma que ele imite as respostas do sistema através de uma sucessão de eventos.

PEDGEN (*apud* FREITAS, 2008) é mais completo e cita que “simulação é o 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 de operações”.

A simulação vem cada vez mais sendo aceita e utilizada no mundo corporativo. O desenvolvimento de interfaces gráficas cada vez mais amigáveis, aliada à geração de respostas mais detalhadas e rápidas que os métodos tradicionais, permitem que analistas de diversos segmentos a utilizem para atender aos mais variados objetivos das indústrias, tais como: aumento de performance de processos existentes; teste de novos processos antes de sua implantação; redução de custos; teste de alternativas de modificações futuras e auxilio na tomada de decisão, dentre outros. (FREITAS, 2008; VIEIRA, 2006)

2.2.3.2 Componentes da Simulação

De acordo com GARCIA (2006) e LAMARCA (2009), uma simulação pode ser vista como um conjunto de partes que se organizam e interagem para formar a estrutura do modelo. Os autores estabelecem ainda parte destes elementos, sendo os principais definidos abaixo de acordo a terminologia utilizada por FREITAS (2008):

Variáveis de Estado: são as variáveis cujos valores determinam o estado de um sistema. Constituem o conjunto de informações que permitem compreender o que se está passando nele num determinado instante do tempo.

Evento: são os acontecimentos, programados ou não, que quando ocorrem alteram o estado do sistema. A chegada/saída de um cliente e o inicio/fim de um atendimento são exemplos de eventos.

Entidades e atributos: entidades são as pessoas ou objetos envolvidos no modelo estudado e podem ser dinâmicos ou estáticos. Cada entidade é definida por uma série de características próprias chamadas atributos. Entidades do mesmo tipo têm os mesmos atributos, embora os valores destes sejam normalmente diferentes.

Recursos e filas de recursos: os recursos podem ser considerados uma entidade estática que fornece serviço às dinâmicas. Sempre que uma entidade dinâmica não puder acessar um recurso ela aguardará por ele numa fila.

Atividade: período de tempo predeterminado que uma vez iniciado, seu final pode ser programado.

A figura a seguir relaciona como os componentes da simulação interagem entre si:

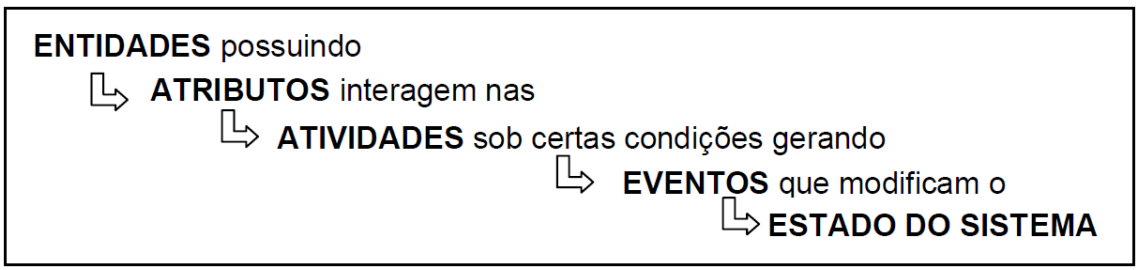

Figura 3: Relacionamento dos componentes da simulação
Fonte: DE OLIVEIRA (2004 *apud* GARCIA, 2006)

2.2.3.3 Simulação Contínua X Simulação Discreta

De acordo com a maneira em que ocorrem as mudanças nas variáveis de estado em um modelo, o mesmo pode ser classificado em contínuo ou discreto.

Os modelos contínuos são aqueles cujas variáveis de estado variam continuamente com o tempo e normalmente são descritos através de equações diferenciais. Já nos modelos discretos, as variáveis de estado ficam, por certo intervalo de tempo, inalteradas, podendo seus valores ser modificados pela ocorrência de eventos. Estes modelos utilizam funções probabilísticas e, normalmente, consegue-se representar sistemas mais complexos. (GARCIA, 2006; VIEIRA, 2006; FREITAS, 2008)

Ainda, alguns autores como JULIÁ (2010) destacam que modelos contínuos podem ser discretizados após realizar algumas suposições sobre as variáveis de estado visando facilitar o processo de modelagem.

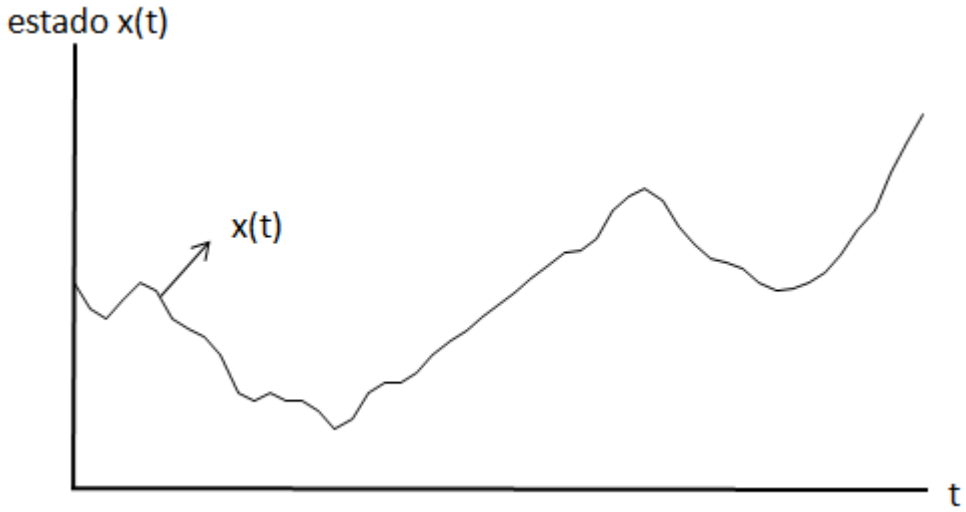

Figura 4: Mudanças de estado em modelos contínuos
Fonte: O autor

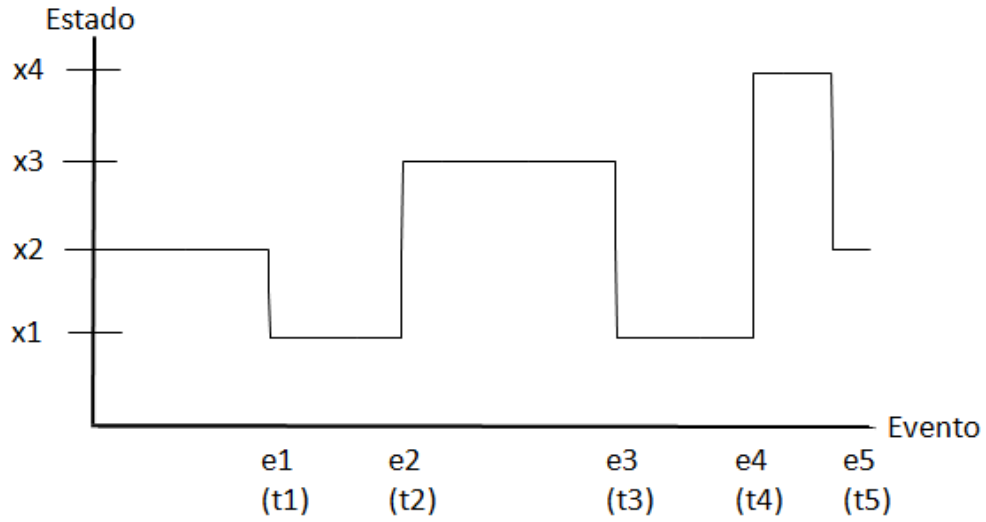

Figura 5: Mudanças de estado em modelos discretos
Fonte: O autor

2.2.3.4 Arena®

Originado da junção de dois outros programas (SIMAN e CINEMA) em 1993, o Arena® é um *software* estatístico, atualmente pertencente à Rockwell *Software*, que tem sido utilizado para simular os mais diversos ambientes, desde linhas de produção, minas, tráfego e diversos ambientes e se baseia num ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem, animação, análise estatística e análise de resultados (FREITA E SILVA *et al*., 2007).

O Arena® é composto por um conjunto de blocos (ou módulos) utilizados para descrever uma aplicação real e que funcionam como comandos de uma linguagem de programação. Os elementos básicos da modelagem em Arena® são as entidades, as estações de trabalho que demonstram onde será realizado algum serviço ou transformação, e por fim, o fluxo que representa os caminhos que a entidade irá percorrer ao longo de estações (PRADO, 1999).

FIORINI (2007 *apud* AGUILAR, 2009) explica que conceitualmente, o Arena® funciona da seguinte maneira: ao construir o modelo, o usuário descreve todos elementos estáticos e as regras de comportamento que será seguida. Ao se iniciar a simulação, entidades dinâmicas entram no modelo, interagem com os elementos estáticos e circulam conforme as regras que foram modeladas.

O software foi constantemente aprimorado desde seu lançamento, encontrando-se hoje na versão 14.0. Além da versão profissional, utilizada para fins comerciais e no qual é possível utilizar todo potencial do software, também é disponibilizada a versão estudante, que apesar de gratuita, possui limitação quanto ao número de entidades no modelo.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 A MRS LOGÍSTICA S.A.

Empresa responsável pela concessão ferroviária da malha Sudeste da Rede Ferroviária Federal, a MRS Logística S.A. controla, opera e monitora um trecho de aproximadamente 1643 km nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, região que concentra mais de 55% do PIB nacional (MRS LOGÍSTICA S.A, 2014).

Figura 6: Malha da MRS Logística S.A.
Fonte: MRS Logística S.A (2014)

A MRS tem foco no transporte ferroviário de cargas, sendo seu negócio normalmente dividido em duas categorias: *Heavy Haul* e Carga Geral.

O *Heavy Haul*, no qual estão inclusos os transportes de minério e carvão, corresponde a cerca de 75% do volume transportado pela companhia caracterizando, portanto, uma operação de baixa variedade e alto volume. Seus principais fluxos incluem o transporte de minério, produzido na região do quadrilátero ferrífero em Minas Gerais, para o abastecimento do mercado interno (com clientes espalhados nos três estados de sua atuação) e para exportação (através dos portos de Sepetiba e Guaíba, no Rio de Janeiro), além do carvão, que é importado para uso próprio pelas usinas siderúrgicas nacionais.

Já a Carga Geral é caracterizada pela grande variabilidade dos produtos transportados, dentre os quais se destacam: siderúrgicos, cimentos, bauxita, químicos, cargas conteinerizadas e agrícolas. Da mesma forma que o *Heavy Haul*, a Carga Geral pode incluir tanto a

distribuição interna de mercadorias de empresas instaladas ao longo da área de atuação da companhia, quanto às operações de importação e exportação, possíveis graça ao acesso aos portos de Itaguaí e Santos (o mais importante da América Latina).

3.2 O SISTEMA CREMALHEIRA

O Sistema Cremalheira é o principal gargalo da operação da MRS Logística na Baixada Santista e pode ser definido como o conjunto formado pelo trecho da malha da companhia localizado entre os pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra e os quatro pátios de apoio a sua operação que incluem, além dos dois já citados, Campo Grande e Piaçaguera. A figura 7, abaixo, representa geograficamente a disposição de cada um desses constituintes.

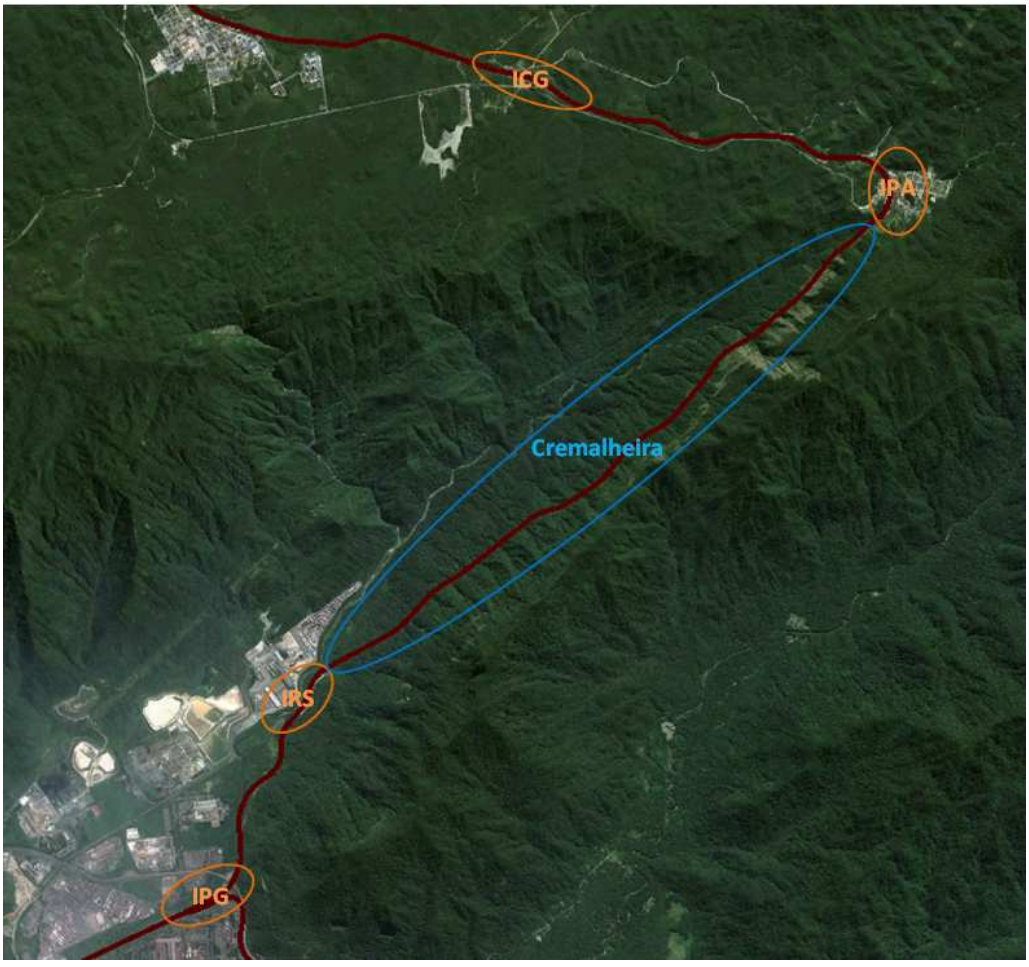

Figura 7: Sistema Cremalheira
Fonte: Google Earth (adaptado)

A seguir, cada um dos componentes do sistema será melhor detalhado, a começar pela Cremalheira e, posteriormente, os quatro pátios.

3.2.1 Cremalheira

Cremalheira é o nome dado na MRS para o trecho de sua malha compreendido entre os pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra, fazendo a ligação entre a região Metropolitana de São Paulo e a Baixada Santista através da Serra do Mar. Corresponde a um trecho íngreme de 8,132 km de comprimento e um desnível de cerca de 800 metros, gerando uma rampa de 10%, valor no qual a operação ferroviária em condições normais se torna inexeqüível. Por este motivo, a Cremalheira é operada sob um regime diferenciado onde é necessário um modelo especial de locomotiva que contêm, além de eixos comuns, um sistema de engrenagem alimentado por eletricidade que se movem por um terceiro trilho dentado, possibilitando a geração de força extra para suportar as descidas e subidas (as locomotivas sobrem atrás da composição, empurrando-a, e descem à frente desta, segurando-a). A empresa possui hoje sete dessas locomotivas, todas fabricadas pela empresa suíça Stadler. As locomotivas são normalmente organizadas em duplas de tração, sendo que a locomotiva restante está em manutenção ou à disponibilidade da operação em caso de falha de alguma outra. Além disso, o sistema também gera restrições quanto ao tamanho (200m) e peso (750t) da composição que circula a cada viagem fazendo com que os trens, que geralmente têm características maiores que essas, sejam fragmentados para realizar a travessia e reconstituídos no outro lado.

Figura 8: Cremalheira (vista de Raiz da Serra)
Fonte: MRS Logística S.A. (2014)

O fluxo na cremalheira ocorre em ambos os sentidos e engloba vagões vazios e carregados. Como o trecho é singelo (apenas um linha) e sem possibilidades de cruzamento, a circulação fica limitada a um único sentido por vez. A fim de otimizar o processo, as três duplas circulam no mesmo sentido e em série sendo que, posteriormente, têm seus sentidos invertidos.

3.2.2 Pátios Paranapiacaba (IPA) e Raiz da Serra (IRS)

As restrições impostas pela cremalheira ocasiona a necessidade de fragmentar as composições em lotes de, normalmente, 6 ou 7 vagões carregados e aproximadamente 15 vagões vazios. Dessa forma, visando obter a máxima utilização das locomotivas e da Cremalheira, os lotes dos vagões já são deixados previamente preparados para circular nos pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra de forma que, quando as duplas de locomotivas chegam nestes locais, possam anexá-los imediatamente após terem deixado a carga que trouxeram em outra linha do pátio.

Assim, cada um desses pátios é constituído por um conjunto de 10 linhas principais, sendo 5 delas destinadas para os lotes que ainda vão atravessar a Cremalheira e 5 para os que já a atravessaram e irão se recompor. Os desenhos esquemáticos dos pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra podem ser visualizados nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

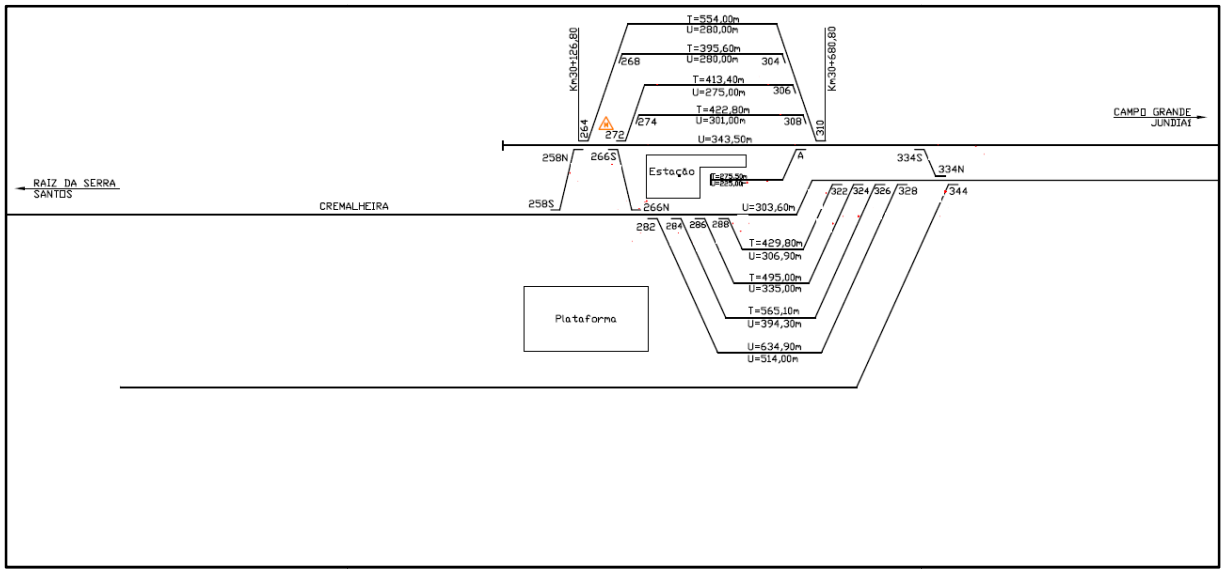

Figura 9: Pátio de Paranapiacaba
Fonte: MRS Logística S.A. (2013)

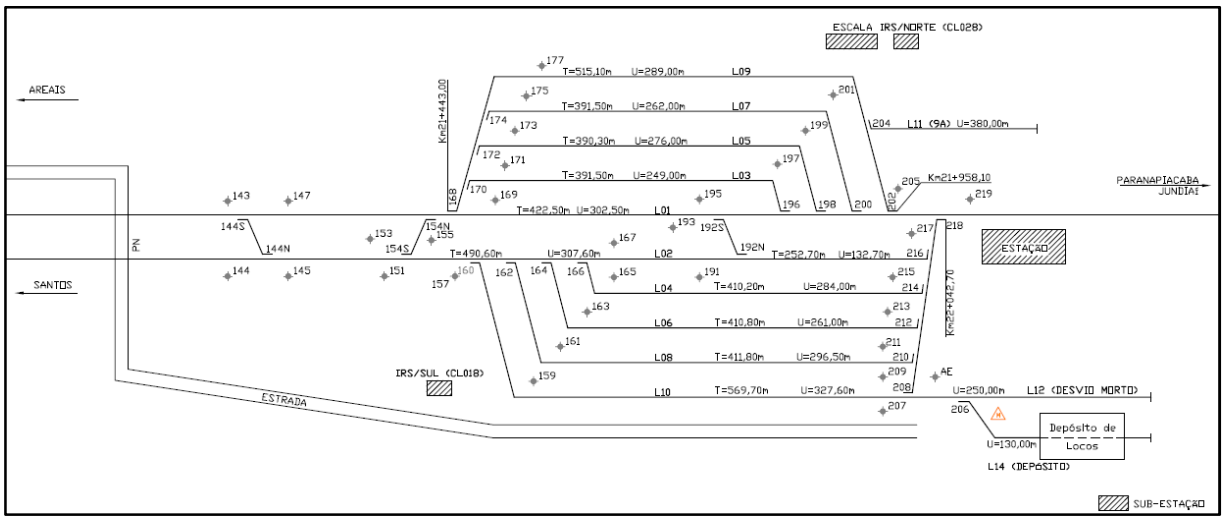

Figura 10: Pátio de Raiz da Serra
Fonte: MRS Logística S.A. (2013)

Como pode ser observado, além das linhas citadas, os pátios também possuem linhas com funções secundárias. No caso de Raiz da Serra, elas são utilizadas para desviar vagões e locomotivas. Em Paranapiacaba, a linha denominada “L12” tem por objetivo fazer a recomposição do trem de minério vazio oriundo da Usiminas de Cubatão à medida que os lotes vão chegando, possibilitando que ele já saia formado do pátio.

Os pátios de IPA e IRS podem ainda realizar as operações de fragmentação e reconstituição dos lotes da composição completa de forma a agilizar o processo e otimizar os recursos de tração e equipagem, desde que para isso, não impactem em outro trem e na circulação da Cremalheira e que tenham linhas disponíveis para tal. Para além desses casos, e a exceção do trem de minério vazio da Usiminas citado anteriormente, estas atividades ficam sob responsabilidade dos pátios de Campo Grande e Piaçaguera.

3.2.3 Pátio de Campo Grande (ICG)

Campo Grande é um importante pátio da MRS, sendo utilizado atualmente tanto para suportar as operações da companhia no atendimento à Baixada Santista e também à Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

O pátio é o local de acomodação da fila dos trens que irão descer a Cremalheira e também onde é realizada, quando necessário, a fragmentação destes nos lotes de vagões que vão para Paranapiacaba e a recomposição daqueles que já subiram a Cremalheira.

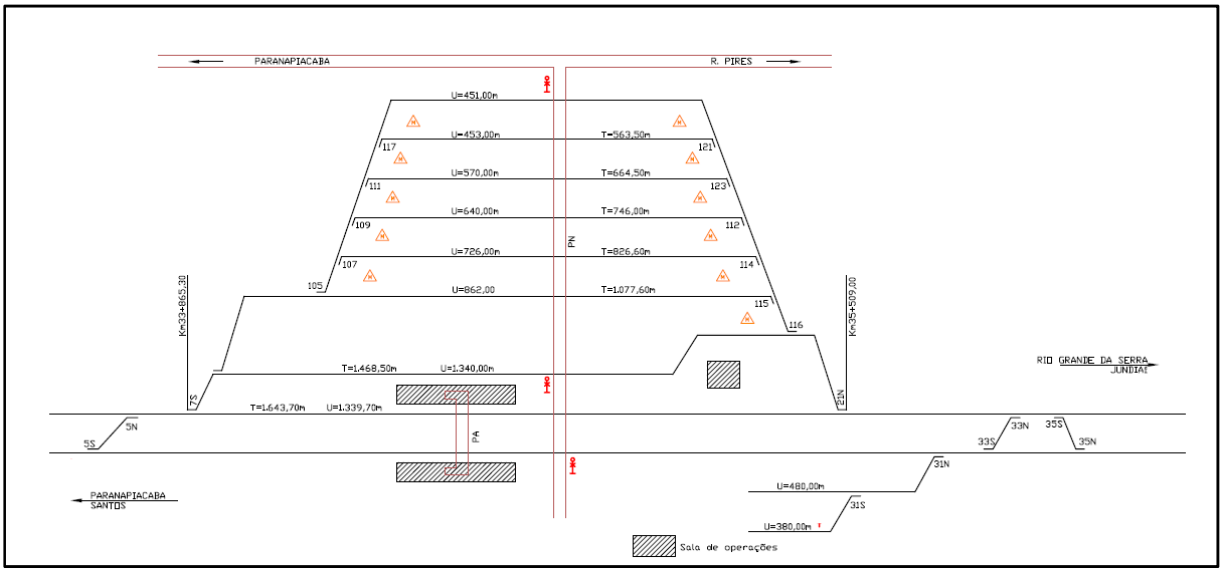

Figura 11: Pátio de Campo Grande
Fonte: MRS Logística S.A. (2013)

Além das funções citadas, que podem ser consideradas como genuínas do pátio, Campo Grande também desempenha atualmente o papel de regulador de parte das cargas que circulam na RMSP e que, para tanto, precisam utilizar o trecho compartilhado com a Companhia Paulista de Trens Metropolitano (CPTM). A CPTM é a operadora do sistema de trens para o transporte suburbano de passageiros na RMSP com a qual a MRS tem, por contrato, direito de passagem de determinada quantidade de trens por dia. Este contrato, porém, limita os horários em que os trens de carga poderão circular ao longo da malha da CPTM, sendo estes restritos a duas janelas de tempo: uma durante o dia (9h-15h) e outra à noite/madrugada (20h-04h). Devido a esta restrição, os trens devem ficar aguardando por um período até a abertura destas janelas, sendo que ICG recebe parcela destes trens. Para o futuro, está previsto a construção de um novo pátio próximo a ICG para onde esta função será transferida, permitindo que este tenha o papel exclusivo de atender à Cremalheira, entretanto, até lá, o pátio deverá estar preparado para realizar ambas as funções.

O pátio apresenta hoje uma situação próxima a sua utilização máxima, sendo que já há projetos para expansão de sua capacidade (que compreende a reativação de linhas inutilizadas e construção de novas) em andamento com conclusão prevista para o ano de 2015. Os principais problemas do pátio são a existência de uma passagem em nível (PN) que o corta transversalmente, exigindo que as composições que aguardam no pátio sejam cortadas para não fechá-la e o aguardo dos trens que circularão pela CPTM, cuja tendência para os próximos anos é que tenha seu número aumentado.

3.2.4 Pátios de Piaçaguera (IPG)

Piaçaguera é o correspondente de ICG na região da Baixada. Algumas de suas funções consistem em ser o pátio onde os trens aguardam em fila para subir a cremalheira e realizar sua fragmentação, quando necessário, e também onde os que desceram por ela são reconstituídos.

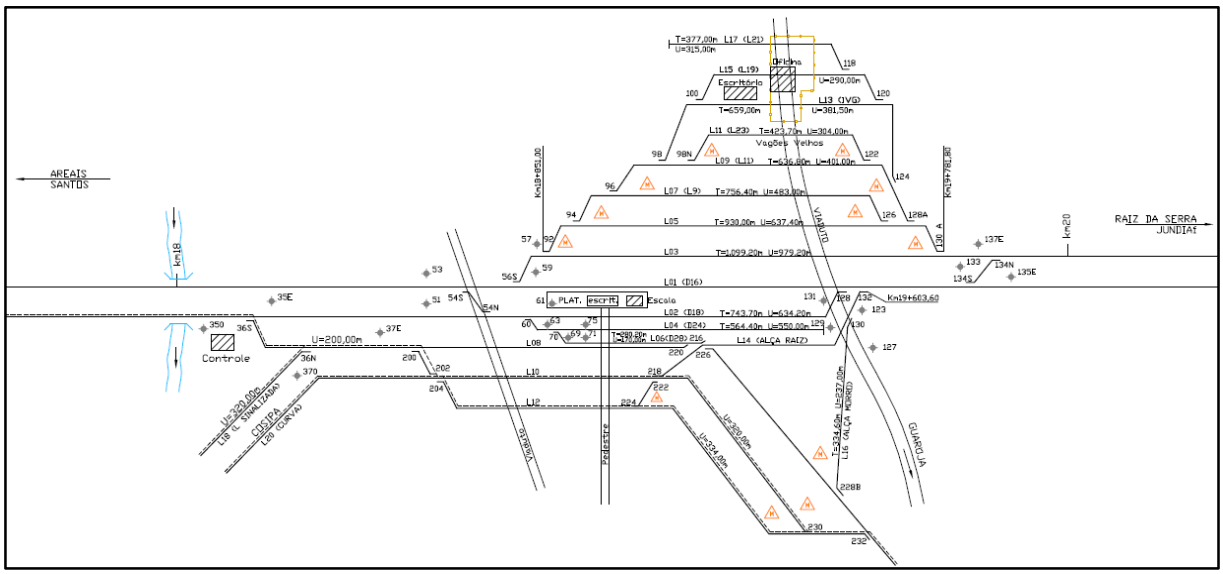

Figura 12: Pátio de Piaçaguera
Fonte: MRS Logística S.A. (2013)

Outro papel desempenhado pelo pátio é servir de suporte ao atendimento à Usiminas Cubatão. É no local que os vagões de minério e siderúrgicos ficam parados até seguirem para a usina e também para onde estes são levados quando devolvidos por ela. Após a devolução, ainda no pátio, é feito a inspetoria dos vagões (conserva) para avaliar se não sofreram nenhuma avaria e as manobras de separação, caso seja constado a necessidade de reparação. Só depois dessas atividades o trem pode ser liberado para circular de volta e subir a Cremalheira.

Piaçaguera está localizada numa retro área do Porto de Santos que fica entre suas margens (direita e esquerda) e por esse motivo acaba absorvendo uma série de ineficiências da operação local, tais como terminais congestionados ou com problemas para receber a carga, trens sem destinos e que ficam aguardando programação, vagões desviados e trens que aguardam horário de grade para partir, o que consome parte da capacidade do mesmo (linhas

ocupadas com trens parados). Ainda por sua localização estratégica no entre-margens, é em Piaçaguera que é realizada o abastecimento das locomotivas na Baixada Santista.

Outro problema enfrentado pelo pátio é a interferência da circulação de trens nas manobras que ocorre pelo fato da linha de circulação cortar o pátio ao meio. Há um projeto de transferência dessa linha para uma das extremidades do pátio. Apesar de melhorar a situação, a solução não eliminará o problema.

3.3 O MODELO DE SIMULAÇÃO

3.3.1 Coleta de Dados e Premissas

Para realizar a análise do sistema foi necessária a coleta de alguns dados e o estabelecimento de algumas premissas para serem utilizados como *inputs* para o modelo. Entre estas informações, por sua relevância para o resultado a ser gerado, destacam-se:

Quantidade de trens/dia: esse número foi calculado a partir da previsão de crescimento informado pela área de Planejamento Estratégico da companhia na forma de toneladas anuais e a partir do modelo operacional informado pela área de Planejamento e Controle da Operação que estabelece, entre outras coisas, qual o trem tipo para cada um dos fluxos que circulam pela Cremalheira, possibilitando, assim, calcular o “peso” de cada um dos trens. Pela divisão da tonelagem total de cada fluxo pelo peso padrão de seu trem e por 365 dias do ano, definiu-se a quantidade de trens/dia de cada trem que circula pelo sistema. Após esta definição, o valor encontrado foi multiplicado por um fator de sazonalidade, definido a partir de séries históricas da companhia, a fim de dimensionar a demanda para seu mês mais crítico do ano. Esse número final encontrado é que foi utilizado no modelo.

Tempo de circulação entre pátios: informação retirada do sistema de bancos de dados da MRS onde é possível encontrar informações relativas ao planejamento e controle da operação da empresa. Foram utilizados dados referentes a seis meses de operação, exceto para o trecho entre Paranapiacaba e Raiz da Serra, no qual só foram utilizados os dados após a integralização do uso das locomotivas Stadler.

Recursos utilizados por cada atividade: a partir de informações provenientes dos especialistas e inspetores, foi realizado um melhor entendimento das operações executadas nos pátios (conserva, inspeção, abastecimento atendimentos, manobras de recomposição, formação e recebimento de trens, etc) e quais os recursos (linhas dos pátios, equipes de manobra, etc) eram utilizados para realizar cada uma delas.

Duração das atividades dos pátios: parcela dos tempos gastos em cada atividade também foi coletada via Sislog, entretanto, o sistema apresenta algumas deficiências para a coleta de alguns tempos ocorridos no sistema cremalheira. Para estes tempos cujos valores não puderam ser coletados, buscou-se utilizar a *expertise* dos especialistas e inspetores dos pátios que com base que informaram os tempos estimados para estas atividades.

3.3.2 Modelagem

O sistema foi representado como um sistema aberto com dois pontos de entrada e saída de trens: Piaçaguera e Campo Grande. Em cada uma das pontas, determinados tipos de trens (diferenciados pelos tipos de cargas que transportam e/ou atividades que realizam no sistema) chegavam com taxas específicas e independentes entre si. Foi estabelecido como premissa que o tempo entre chegadas de cada trem seguiria uma distribuição exponencial cuja média (em horas) foi definida em função da demanda diária do trem (24/quantidade de trens/dia).

O modelo é composto por um conjunto de lógicas que a partir de interações entre elas, representam o sistema real. As lógicas criadas foram:

Lógica de Circulação: onde está representado todo o processo de circulação pelo trecho da Cremalheira, incluindo a decisão e as operações do local de fracionamento e reconstituição dos trens e controle de viagens pela Cremalheira. Destaca-se como a principal lógica desenvolvida, motivo pelo qual será melhor explicada posteriormente.

Lógica de Piaçaguera: representa todas as atividades que são realizadas no pátio, incluindo o processamento dos trens de minério e siderúrgicos que vão para a Usiminas, as

atividades de abastecimento, conserva, aguardo de horário de grade e circulação entre-margens.

Lógica de Campo Grade: compreende, além da circulação e processamento de trens pelos pátios, o controle das janelas horárias de circulação pela CPTM e a interação com Ouro Fino e com o Ferronael.

Lógica de Controle de Variáveis: lógica auxiliar que inicializa as variáveis que define qual cenário está sendo simulado e atualiza aquelas que atuam no âmbito global do sistema.

No modelo, as operações de fracionamento dos trens são realizadas preferencialmente nos pátios de Paranapiacaba e Raiz da Serra, sendo que os trens paravam em Piaçaguera e Campo Grande apenas quando estes pátios já estavam plenamente ocupados e/ou sem capacidade de receber o próximo trem integralmente. A reconstituição também é feita nestes pátios, de forma que os trens apenas param em Piaçaguera e Campo Grande se precisar realizar alguma atividade ou aguardar outra condição. Cada trem tem atribuído a si um número que representa a quantidade de blocos em que será fracionado para atravessar a Cremalheira. Esse número foi calculado objetivando realizar o menor número de viagens por trem, respeitando as restrições de peso e comprimento do trecho.

Pela lógica desenvolvida, os trens que circulam pela Cremalheira são organizados sob um regime de fila FIFO e são sempre ‘empurrados’ pelo sistema para o seu destino tão logo quanto possível, mesmo que ao chegarem lá tenham que aguardar alguma outra restrição. Essas ressalvas são importantes porque, na prática da operação ferroviária, as decisões tomadas pelos responsáveis pela movimentação dos trens no dia-a-dia podem fazer com essa regra nem sempre seja seguida. Como exemplos, pode-se citar trens que têm prioridade devido ao tipo de carga que transportam (como produtos perigosos) e trens que seguem uma grade horária e, portanto, têm horários específicos para deixar e chegar a determinados pátios. Da mesma maneira, ocorrem situações em que um trem encontra condições no seu pátio de saída que o retém dentro do sistema por um tempo maior como, por exemplo, quando um trem chega à Campo Grande mas aguarda o horário de compartilhamento com a CPTM. No dia-a-dia, pode se definir que este trem, como não sairá de imediato do sistema, pode ficar

aguardando em Piaçaguera até um momento oportuno para subida, o modelo, porém, não contempla essa situação e sempre acumula os trens o mais próximo de sua saída.

Ainda na lógica de circulação, é importante frisar a grande interação dos pátios de recepção e saídas dos trens e a interdependência de uma operação na outra que, se não bem entendidas, poderiam levar ao travamento do modelo. Acontece que, como existem trens que partem de Campo Grande com sentido a Piaçaguera e vice-versa, existe a possibilidade de um dos pátios estar, num determinado momento, com toda sua capacidade ocupada com trens que vão atravessar a cremalheira e ficar sem capacidade para absorver os trens que dela chegam. Se essa situação se repetir no outro pátio no mesmo instante, um travamento do modelo ocorreria, pois não seria mais possível enviar trens de um ponto ao outro. Para resolver este impasse, foi estabelecido que ambos os pátios teriam duas linhas exclusivas: uma para envio de trens para a Cremalheira e outra para seu recebimento. Dessa forma, ficava garantido que sempre haveria a possibilidade da circulação ocorrer, independente do sentido. As demais linhas dos pátios, por sua vez, ficavam disponíveis para receber qualquer tipo de trem, seja aqueles com origem/destino cremalheira ou aqueles que realizavam outras atividades.

Por fim, a lógica de circulação é complementada pelo sistema de controle de viagens da Cremalheira. É ele que controlava os fluxos das viagens (se subida ou descida) e a necessidade das locomotivas subirem ou descerem sem tracionar quando não existe carga em um dos sentidos.

A figura 13 mostra o modelo em Arena® desenvolvido para representar as lógicas citadas acima:

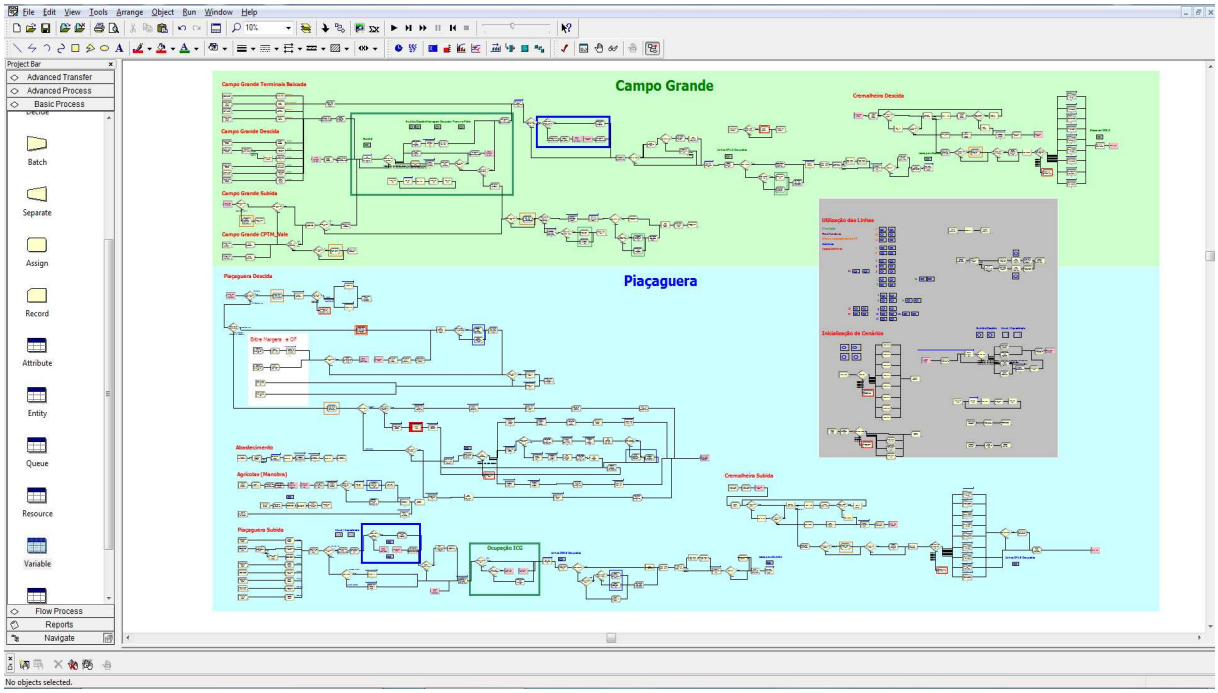

Figura 13: Modelo de simulação em Arena
Fonte: O Autor

Após a construção do modelo, foram definidos os cenários de intervenções a serem realizadas no sistema de acordo com diretrizes definidas pela companhia. Por estas diretrizes, as soluções se limitariam ao aumento do número de duplas de locomotivas Stadler e em intervenções físicas nos pátios. Foram criados dois conjuntos de cenários para serem avaliados. O primeiro conjunto avaliou até o ano de 2018, onde o crescimento de demanda seguiu uma curva moderada e, portanto, é formada por cenários menos agressivos. Entre 2019 e 2021, as taxas de crescimento passam a ser maiores e, por conta disso, os cenários passam a apresentar soluções mais agressivas. As tabelas abaixo apresentam os cenários avaliados em cada caso.

2014 - 2018	Duplas de Stadler Cremalheira		Piaçaguera			Campo Grande	
	3 Duplas	4 Duplas	Atual	Alça de Manobra	1 linha Extra	Atual	Pacote de Investimento 2014/2015
Cenário 1	x		x			x	
Cenário 2	x			x			x
Cenário 3	x				x		x
Cenário 4	x			x	x		x

Tabela 1: Cenários avaliados (horizonte 2014-2018)

2019 - 2021	Duplas de Stadler Cremalheira			Piaçaguera				Campo Grande
	3 Duplas	4 Duplas	5 Duplas	Alça de Manobras + 2 linhas Extras	Alça de Manobras + 3 linhas Extras	Alça de Manobras + 4 linhas Extras	Alça de Manobras + 5 linhas Extras	Pacote de Investimento 2014/2015
Cenário 5	x			x				x
Cenário 6	x				x			x
Cenário 7	x					x		x
Cenário 8	x						x	x
Cenário 9		x		x				x
Cenário 10		x			x			x
Cenário 11		x				x		x
Cenário 12		x					x	x
Cenário 13			x	x				x
Cenário 14			x		x			x
Cenário 15			x			x		x
Cenário 16			x				x	x

Tabela 2: Cenários avaliados (horizonte 2019-2021)

Cada cenário foi simulado a partir de 10 replicações de um período de 360 dias com *warm-up* de 90 dias.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ADERÊNCIA DO MODELO

Para avaliação de aderência do modelo foi utilizado o indicador “Utilização da Cremalheira” que informa, em porcentagem, a quantidade do tempo em que havia trens circulando por ela. Idealmente, esperava-se utilizar como indicador as filas formadas nos pátios de entradas, tal como estão sendo avaliados os cenários desenvolvidos, ou os tempos de aguardo nos pátios para subida/descida da serra, visto que essa seria uma forma de quantificar o “nível das filas internas” do sistema, entretanto, dois fatores inviabilizaram tal escolha, quais sejam:

Dificuldades de contabilização dos valores atuais dos indicadores: a fila está dispersa ao longo da malha da companhia e não concentrada em apenas um ponto. Além disso, em determinado pátio, pode haver fila formada em decorrência do Sistema Cremalheira e por motivos alheios a este. Dessa forma, não foi possível contabilizar quais trens estão aguardando em determinado pátio devido às restrições do sistema. Quanto ao tempo de aguardo interno, o problema de contabilização ocorre devido às características do processo que dificulta o registro fiel das operações no sistema de banco de dados da empresa. Como os trens são fracionados e reconstituídos para circular pela Cremalheira, seus prefixos (seqüência alfa-numérica que caracteriza cada trem) são, na maioria das vezes, perdidos, impossibilitando a rastreabilidade dos trens neste trecho.

O modelo pode apresentar regime de fila diferente do real: como citado anteriormente, foi estabelecido um regime de fila que se diferencia do real por não considerar desvios da regra padrão que ocorrem devido ao processo decisório do dia-a-dia. Assim, ao considerar que o regime de fila é FIFO, que os trens circulam pela Cremalheira tão logo quanto podem e que o fracionamento e reconstituição ocorrem preferencialmente em Raiz da Serra e Paranapiacaba, priorização e retenção de cargas no pátio inicial do sistema, por motivos variados, não são considerados. Assim, o modelo criado pode ser interpretado como uma representação ideal do sistema e cujos indicadores, caso pudessem ser contabilizados, não necessariamente gerariam as respostas reais.

Devido ao exposto, buscou-se encontrar um indicador que não tivesse seu valor impactado pelas mudanças feitas no modelo e que pudessem ter seus valores atuais encontrados no sistema. A partir dessas premissas, a Utilização da Cremalheira se mostrou como um bom indicador para medir a aderência do modelo.

A Cremalheira, como é gargalo central, tem impacto sobre todas as demais funções desempenhadas pelo sistema, uma vez que é a principal causa pra filas no mesmo, justificando o porquê desse indicador ser um bom referencial para validar todo o modelo. Além disso, a utilização da cremalheira é função exclusiva da quantidade dos trens que passam por ela independente do momento que passam, ou seja, do regime de fila e regras de retenção de cargas.

Escolhido o indicador, para sua validação, foi realizada uma rodada de simulação usando como *inputs* os dados atuais do sistema e os resultados gerados a partir dessa simulação foram comparados aos resultados reais obtidos a partir do banco de dados da companhia, a partir da seguinte relação.

$$\frac{Utilização\ Cremalheira\ Simulada}{Utilização\ Cremalheira\ Real\ (Banco\ de\ Dados)} = 95{,}6\% \qquad (1)$$

4.2 FORMAÇÃO DE FILAS

Os resultados obtidos a partir das simulações foram sintetizados nas tabelas abaixo:

	Fila ICG					Fila IPG				
	2014	2015	2016	2017	2018	2014	2015	2016	2017	2018
Cenário 1	3.2	4.2	152.0	0.6	0.9	0.1	0.3	0.8	1.0	1.1
Cenário 2	0.1	0.1	0.3	0.0	0.1	0.1	0.3	0.6	1.0	1.3
Cenário 3	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.7	1.0	1.4
Cenário 4	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.4

Tabela 3: Resultados da simulação (Cenários 1-4)

	Fila ICG			Fila IPG		
	2019	2020	2021	2014	2015	2016
Cenário 5	0.0	0.0	0.2	1.5	4.3	19.4
Cenário 6	0.0	0.1	0.2	0.7	1.7	4.9
Cenário 7	0.0	0.1	0.3	0.3	1.0	4.8
Cenário 8	0.0	0.0	0.2	0.2	0.6	4.6
Cenário 9	0.1	0.5	5.4	1.0	1.6	3.9
Cenário 10	0.1	0.4	10.0	0.5	0.8	2.4
Cenário 11	0.0	0.2	8.7	0.3	0.4	1.1
Cenário 12	0.1	0.3	7.6	0.1	0.2	0.6
Cenário 13	0.0	0.0	0.1	0.7	1.3	2.0
Cenário 14	0.0	0.0	0.0	0.3	0.6	1.3
Cenário 15	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.7
Cenário 16	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3

Tabela 4: Resultados da simulação (cenários 5 - 12)

5. CONCLUSÃO

A partir do exposto, pode-se afirmar que o presente trabalho atingiu os objetivos traçados inicialmente dado que o modelo de simulação de eventos discretos desenvolvido conseguiu representar o Sistema Cremalheira e gerar os resultados que possibilitam a comparação entre os cenários de investimentos.

O modelo apresentou aderência de 95,6% quando avaliado o indicador Utilização da Cremalheira, pelo qual se conclui que, apesar das modificações no regime de filas, o mesmo representa, de fato, a realidade a qual simulava.

A execução do modelo no *software* Arena® possibilitou quantificar o nível de serviço gerado para cada combinação de investimentos através do tamanho médio da fila para cada um dos anos do horizonte avaliado. Dessa forma, foi possível estabelecer uma relação entre investimentos e nível de serviço, informação que pode ser utilizada pela companhia como critério para definir sua expansão nos próximos anos.

Em linhas gerais, pode-se concluir que no longo prazo será necessário o aumento de capacidade da Cremalheira com uma 4ª dupla de Stadler, pois esta passaria a ter uma utilização muito elevada que traria como conseqüências o crescimento infinito das filas. O projeto inicial de substituição das antigas locomotivas da Cremalheira pelas Stadlers, porém já contemplava o uso de 4 duplas, sendo que a compra da 4ª foi postergada para quando se tornasse realmente necessária, momento que pôde ser diagnosticado pelo estudo. O trabalho apontou também que os o pacote de investimentos que está previsto para Campo Grande para os anos de 2014/2015 são suficientes para atendimento do volume durante todo o horizonte analisado, o que foi conseguido graças, também, a outros fatores como a construção de um novo pátio (Ouro Fino) nas adjacências de Campo Grande, em 2017, e do Ferroanel, em 2019, que irão reduzir parcela das atividades realizadas no local. Para Piaçaguera não foi possível chegar a uma conclusão visto que diversas soluções analisadas podem atender à demanda considerada, formando, porém, diferentes níveis de filas, que podem ser decididos de acordo com as diretrizes que a empresa escolher adotar.

Vale lembrar que o papel da simulação não é obter a solução ótima para um problema, mas sim gerar informações que subsidiam a tomada de decisão, sendo que esta deve ser realizada diretamente pelas pessoas competentes e que têm poder para tal. Por este motivo, apesar das conclusões gerais, não foi apresentado qual a melhor combinação de investimentos a ser realizada no sistema e o ano desses investimentos, visto que isso está diretamente ligado à estratégia da empresa e dependente de diversos fatores alheios a este trabalho.

6. REFERÊNCIAS

CODESP. **Caos Logístico Regional – O pólo, o porto e as cidades não podem parar**. Fórum para o desenvolvimento do pólo industrial de Cubatão, 2013.

CORRÊA, Carlos Alberto; CORRÊA, Henrique Luiz. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica.** São Paulo, 2004.

AGUILAR, Stênio Marcos Santos; GUIMARÃES, Irce Fernandes Gomes; SCHUCHTER, Dauber de Castro. **Avaliação dos benefícios da aplicação da simulação, através do software Arena 10.0, em uma empresa de transporte ferroviário**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador, 2009.

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

BRITO, Victor. **Aplicação da simulação como ferramenta de apoio à elaboração de um planejamento estratégico de capacidade**. Centro de Estudos em Logística – COPPEAD / UFRJ. Rio de Janeiro, 2007

CHAVES, Ana Laura de Figueiredo; FIGUEIREDO, Ciro Jose Jardim; VASCONCELOS, Luciana Pacheco; SERRA, Claudio Mauro Vieira. **Estudo da Teoria das Filas em um sistema médico-hospitalar na cidade de Belém-PA**. XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2011.

FREITAS E SILVA, Liane Márcia; PINTO, Marcel de Gois; SUBRAMANIAN, Anand. **Utilizando o software Arena como ferramenta de apoio ao ensino em Engenharia de Produção**. XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu, 2007.

FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena**. 2 ed. Florianópolis: Visual Books, 2008.

GARCIA, Leonardo Claro. **Dimensionamento de recursos de atendimento móvel de urgência da região metropolitana II do estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

JULIÁ, Alexandre Font. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Logísticos). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

LAMARCA, Braz Rafael da Costa. **Utilização da simulação para avaliação de equipes cirúrgicas de revascularização miocárdica em relação ao Australian National Diagnosis Related Group (AN-DRG) em um hospital privado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2008.

LEAL, Leonardo Rosas. **Simulação de eventos discretos aplicada ao gerenciamento de prazo em projetos: um estudo de caso de projeto logístico na indústria de Óleo & Gás**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2011.

LIBRELATO, Tatiane Pereira; MENEZES, Liziane; VACCARO, Guilherme Luis Roehe. **Gestão da Capacidade e Demanda: um estudo de caso utilizando um modelo estatístico multivariado**. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, 2011.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

PIDD, Michael. **Just Modeling Through: A Rough Guide to Modeling**. Interfaces 29: 2. p.118-132, mar-abr, 1999.

SHONS, Claudio Henrique; RADOS, Gregório Varvakis. **A importância da gestão de filas na prestação de serviço: um estudo na BU/UFSC**. Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação,Campinas, v.6, n. 2, p. 116-135, jan./jun. 2009.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; JOHNSTON, Robert. **Administração da Produção**. 3 ed. São Paulo: Atlas, 2009.

TOZI, Luiz Antonio; CORREIA, Anderson. **Aplicação do Ferramental de Simulação por Evento Discreto na Prospecção de um Terminal de Carga Aérea Internacion**al. Anais do Congresso Anpet – Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2007.

VIEIRA, Guilherme Ernani. **Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais**. XIII SIMPEP. Bauru, 2006.

MRS Logística S/A. Disponível em: <http://www.mrs.com.br>. Acesso em: 03 jan. 2014

7. ANEXO 1 – 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.

8. ANEXO 2 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que estagiário/funcionário da empresa possui autorização para divulgar o nome da empresa bem como dados não confidenciais na elaboração de seu 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.

Juiz de Fora, de de .

_____

Responsável da Empresa
(carimbo da empresa)