DENNIS TRAVAGINI CREMONESE

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA PARA
ESTUDOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA NA CADEIA DO MINÉRIO
DE FERRO

São Paulo
2014

DENNIS TRAVAGINI CREMONESE

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA PARA
ESTUDOS DE SIMULAÇÃO DINÂMICA NA CADEIA DO MINÉRIO
DE FERRO

Dissertação apresentada ao Departamento de
Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio de Tomi

São Paulo
2014

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 20 de março de 2014.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cremonese, Dennis Travagini

Desenvolvimento e aplicação de metodologia para estudos de simulação dinâmica na cadeia do minério de ferro / D.T.

Cremonese. -- versão corr. -- São Paulo, 2014.

157 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1. Mineração 2. Transporte de carga (Dimensionamento; Simulação) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II. t.

Dedico este trabalho aos meus familiares e amigos, os quais sempre me apoiaram e incentivaram a persistir. É impossível listar todos, pois desde a minha infância até os dias de hoje, foram muitas as pessoas que contribuíram para as minhas conquistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha irmã Samanta, pela grande ajuda que possibilitou que este trabalho fosse adiante e aos meus colegas de serviço Gilberto Martins, José Gagliardi, Marco de Amicis, Mary Klinevicius e Romulo Viola, que tanto colaboraram para execução deste projeto.

*“A produtividade está relacionada a mineração,
como um ovo sobre a mesa. Se não estiver
sempre de olho, já sabe o resultado.”*
Gustav Hawlitschek

RESUMO

Este estudo propõe uma metodologia para a simulação dinâmica da cadeia de produção mineral. A metodologia proposta permite que modelos complexos sejam construídos rapidamente e com precisão, reduzindo os custos de estudos nas fases de projeto e possibilitando reduções mais expressivas nos custos de implantação e operação do empreendimento. A metodologia proposta abrange todas as etapas de estudo desde a formulação do problema a ser analisado até a implementação dos resultados e foi aplicada em um projeto, durante as fases de FEL 2 e 3 (Projeto Conceitual e Básico). O projeto estudado consiste da produção de produtos de minério de ferro de uma empresa de mineração em Corumbá/MS, incluindo lavra, beneficiamento e transporte do minério beneficiado por ferrovia até o porto de Santos/SP. São apresentadas as premissas, dados de entrada e conceitos para criação de um modelo que integre Pátio de Estocagem da Usina de Beneficiamento, Ferrovia e Porto, além dos dados de saídas do modelo necessários para avaliação e suas análises. Com base nos resultados obtidos foram identificados as ações que podem ser tomadas para o aumento da eficiência do trabalho de modelagem. A aplicação da metodologia proposta permitiu comprovar que um modelo integrado de simulação, envolvendo as diferentes atividades da cadeia de produção mineral, oferece uma visão global dos processos envolvidos e facilita a tomada de decisão.

Palavras-chave: Simulação Dinâmica. Modelo Integrado. Cadeia do Minério de Ferro.

ABSTRACT

This study proposes a methodology for dynamic simulation of the mineral supply chain. The proposed methodology allows complex models to be built quickly and accurately, reducing the costs of studies in the design phases and enabling more substantial reductions in the costs of implementation and operation of the enterprise. The proposed methodology covers all stages of study since the problem formulation to be analyzed until the results implementation and was applied in a project, during the phases of FEL 2 and 3 (Pre-Feasibility and Feasibility Study). The project studied consists of the production of iron ore products from a mining company in Corumbá/MS, including mining, beneficiation and transportation of the processed ore by rail to the port of Santos/SP. Assumptions, input data and concepts to create a model that integrates the Stockyard of the Beneficiation Plant, Rail and Port are presented, beyond the outputs data of the model necessary for the assessment and analysis. Based on the results obtained were identified actions that can be taken to increase the efficiency of modeling work. The application of the proposed methodology allowed to demonstrate that an integrated simulation model, involving different activities of the mineral supply chain, provides an overview of the involved process and facilitates decision making.

Keywords: Dynamic Simulation. Integrated Model. Iron Ore Supply Chain.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 INTRODUÇÃO A SIMULAÇÃO	22
2.1.1 Definição de simulação.....	22
2.1.2 Razão para simulação	23
2.1.2.1 Modelo.....	23
2.1.2.2 Solução e Simulação.....	25
2.1.2.3 Simulação e Análise do Sistema	26
2.1.2.4 Simulação como ferramenta da Análise do Sistema.....	27
2.1.3 Vantagens e Desvantagens de utilização da simulação	28
2.1.4 Quando utilizar simulação.....	29
2.1.5 A Natureza da Simulação.....	30
2.1.6 Domínios de Aplicação	31
2.2 TIPOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	33
2.2.1 Simulação de Eventos Discretos	33
2.2.1.1 Simulação Paralela de Eventos Discretos	34
2.2.2 Simulação Contínua.....	35
2.2.3 Simulação de Monte Carlo.....	35
2.2.4 Formas Relacionadas de Simulação.....	35
2.2.4.1 Simulação Combinada Discreta - Contínua.....	36
2.2.4.2 Simulação Híbrida.....	36
2.2.4.3 Gaming	36
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	37
2.3.1 Estocástico / Determinístico.....	37
2.3.2 Tempo Contínuo / Tempo Discreto.....	37
2.3.3 Estado Discreto / Estado Contínuo.....	37
2.3.4 Tempo Invariante / Tempo Variante	37
2.4 TERMINOLOGIA DA SIMULAÇÃO	38
2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO	39
2.5.1 Princípios da Modelagem da Simulação.....	39
2.5.2 Estruturas Conceituais de Modelagem de Eventos Discretos.....	40
2.5.3 Descrição do Modelo Informal.....	41
2.5.4 Aspectos Conceituais de Modelagem e Simulação	41
2.5.4.1 O Sistema Real: Comportamento.....	41
2.5.4.2 A Estrutura Experimental: Validez.....	42
2.5.4.3 O Modelo Base: Explicação Completa Hipotética	42
2.5.4.4 O Modelo Discreto: Simplificado.....	43
2.5.4.5 O Computador: Complexidade	43
2.5.4.6 Os Cinco Elementos e suas inter-relações	43
2.5.5 Procedimentos de Simplificação	44
2.5.6 Gerador de Números Aleatórios.....	44
2.6 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	46
2.6.1 Componentes de um Modelo de Simulação de Eventos Discretos.....	47
2.6.2 Fluxo de Controle entre Componentes em um Modelo de Simulação de Eventos Discretos	48
2.6.3 Estados de uma entidade.....	49

3. METODOLOGIA.....	51
3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....	53
3.1.1 Abordagens para Formulação do Problema	54
3.1.2 Solução Prescritiva e Descritiva.....	54
3.1.3 Procedimentos para Formulação do Problema	55
3.1.4 Medição do Problema Formulado.....	56
3.1.5 Metodologias de resolução de problemas	57
3.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO	57
3.2.1 Propósito do Modelo	57
3.2.2 Escopo do Modelo.....	58
3.2.3 Detalhes do Modelo	59
3.2.4 Premissas do Modelo	59
3.2.5 Incerteza	60
3.2.6 Equipe do Projeto.....	60
3.2.7 Limitações do Projeto	61
3.2.8 Saídas do Modelo.....	61
3.2.9 Estrutura Analítica do Projeto.....	62
3.2.10 Causas de Atrasos e Projetos Pobres.....	62
3.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA / SÍNTESE DO SISTEMA	63
3.4 DEFINIÇÃO DO MODELO (DESCRIÇÃO DO MODELO BASE)	64
3.4.1 Estrutura estática do sistema	64
3.4.2 Estrutura dinâmica do sistema	65
3.5 FORMULAÇÃO DO MODELO (DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DO MODELO).....	66
3.6 ANÁLISE DOS DADOS DE ENTRADA E MODELAGEM	67
3.6.1 Coleta de dados e preparação	68
3.6.2 Modelos auto-orientado e traço-orientado.....	68
3.6.3 Técnicas na ausência de dados.....	68
3.6.4 Escolhendo uma Densidade de Probabilidade Apropriada.....	69
3.6.5 Dados típicos necessários para as operações de produção	69
3.7 ESPECIFICAÇÃO FUNCIONAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO.....	70
3.8 TRADUÇÃO DO MODELO	71
3.8.1 Características de programação desejada	71
3.8.2 Engenharia de Software aplicada em simulações de eventos discretos.....	71
3.8.3 Orientações para detectar erros.....	73
3.8.4 Animação.....	73
3.9 VERIFICAÇÃO, VALIDAÇÃO, E TESTES.....	74
3.9.1 Validação	74
3.9.2 Verificação	75
3.9.3 Testes.....	75
3.9.4 Princípios	76
3.10 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	78
3.10.1 Procedimentos básicos.....	78
3.10.2 Controle experimental.....	79
3.11 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE	80
3.11.1 Procedimento Geral	80
3.11.2 Análise.....	80
3.11.3 Otimização	80
3.12 COMUNICAÇÃO DE RESULTADOS	81
3.13 DOCUMENTAÇÃO.....	81
3.13.1 Documentação do Projeto.....	81
3.13.2 Para o Programador – Para modificar um Programa.....	81
3.13.3 Para o Usuário Final – Para usar o Programa	82

3.13.4	Para o Usuário Final – Para acreditar no Programa	83
3.13.5	Convertendo um Programa em um Produto	83
3.14	IMPLEMENTAÇÃO	84
4.	CASO ESTUDADO.....	85
4.1	O MODELO ESTUDADO E SUA CONSTRUÇÃO	85
4.1.1	Escopo do Modelo Estudado	85
4.1.2	Finalidade e Aplicação do Modelo	86
4.1.2.1	Configuração do Caso Base	86
4.1.2.1.1	Configuração da Mina	86
4.1.2.1.2	Configuração da Ferrovia	87
4.1.2.1.3	Configuração do Porto	87
4.1.2.2	Questões principais a serem obtidas pelo modelo	88
4.1.2.3	“E-se?” (What-If) e Análise de Sensibilidade	89
4.1.2.4	Limites do Modelo	89
4.1.2.5	Principais Premissas e Simplificações do Modelo	90
4.1.2.6	Exclusões do Modelo	91
4.1.3	Softwares empregados	92
4.1.4	Planejamento e Programação de Produção	95
4.1.4.1	Planejamento da Mina	95
4.1.4.2	Programação de Navios	95
4.1.4.3	Programação de Trens	96
4.1.4.4	Disponibilidade Operacional por Ano	98
4.1.4.5	Filosofia Geral de Operação	100
4.1.4.6	Sincronização da Manutenção Planejada	100
4.1.5	Lógica da Mina e Parâmetros de Entrada	101
4.1.5.1	Produção da Mina	101
4.1.5.2	Pilhas de Estocagem	102
4.1.5.3	Sistema de Carregamento de Vagões	102
4.1.6	Lógica da Ferrovia e Parâmetros de Entrada	102
4.1.6.1	Configurações Operacionais	102
4.1.6.2	Lógica de Controle de Tráfego da Ferrovia	104
4.1.6.3	Tempo de Percurso	106
4.1.6.4	Material Rodante	107
4.1.6.5	Regras de Operação	108
4.1.6.6	Tráfego	110
4.1.6.7	Trechos Complexos	110
4.1.6.7.1	Trecho da Baixada Santista	110
4.1.6.7.2	Pátio de Descarga	111
4.1.6.7.3	Pátio de Carregamento na Mina	112
4.1.6.8	Interrupções na Via	112
4.1.6.8.1	Manutenção da Via	112
4.1.6.8.2	Acidentes	113
4.1.7	Lógica do Porto e Parâmetros de Entrada	113
4.1.7.1	Configurações Operacionais	113
4.1.7.2	Recebimento	115
4.1.7.3	Pátio	116
4.1.7.4	Expedição	117
4.1.7.5	Frota de Navios	118
4.1.7.6	Navegação do Canal	119
4.1.7.7	Atracação e Desatracação	119
4.1.7.8	Carregamento de Navios	120
4.1.7.9	Demurrage	121
4.2	ANÁLISE DO MODELO ESTUDADO.....	121
4.2.1	Tamanho e Número das Replicações	121
4.2.2	Operações na Mina / Usina de Beneficiamento	121
4.2.2.1	Pilhas de Estocagem de Produtos	122
4.2.2.2	Trens Carregados por Período	123
4.2.3	Operações na Ferrovia	124

4.2.3.1	Ciclo dos Trens	124
4.2.3.2	Utilização da capacidade da Ferrovia.....	125
4.2.3.3	Diagrama espaço tempo.....	131
4.2.3.4	Material Rodante para o Ramp-Up	132
4.2.3.5	Material Rodante para capacidade desejada	132
4.2.4	Operação no Porto	133
4.2.4.1	Frota de navios.....	134
4.2.4.2	Equipamentos.....	135
4.2.4.3	Embarque Direto	137
4.2.4.4	Evolução das Pilhas de Minério do Porto.....	137
4.2.4.5	Demurrage	137
4.2.4.6	Variação do número de produtos	138
4.2.4.7	Equipamentos para o <i>Ramp-Up</i>	138
4.2.5	Paradas no Sistema.....	139
4.2.5.1	Tempo de recuperação da ferrovia	141
4.2.5.2	Tempo de recuperação do porto	142
4.2.5.3	Perda na capacidade da ferrovia.....	145
4.3	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	147
5.	CONCLUSÕES.....	149
5.1	TRABALHOS FUTUROS	150
6.	REFERÊNCIAS.....	152

1. INTRODUÇÃO

Para conseguir a eficiência máxima, é necessário ter uma visão global do empreendimento e sua análise através do tempo, desta forma a simulação dinâmica de um modelo integrado, que envolva todos os sistemas de um empreendimento se torna uma ferramenta ideal.

A simulação é uma importante ferramenta de apoio, permitindo um ensaio das alternativas a custo e prazo reduzido, permitindo sua posterior comparação (PIRES; NABETA; CARDOSO, 2008).

Vários estudos de simulação dinâmica foram realizados em sistemas isolados, como a ferrovia ou operações de embarque de produtos no navio, entretanto há falta de estudos que englobem um modelo integrado da estocagem de produtos da mina até a saída dos navios carregados do porto, passando pelo transporte ferroviário.

Estudos independentes são inapropriados nos terminais atuais, visto que o sistema ferroviário e portuário não são mais interligados por grandes estocagens da ordem de 5 a 10% da capacidade anual, o que gera um erro na estimativa da capacidade real, tendo em vista que atrasos em uma área propagam-se em toda a cadeia, o que normalmente não é levado em conta neste tipo de estudo. Devido a isso, este trabalho desenvolve uma metodologia de modelagem deste sistema integrado e da sua análise.

Na primeira etapa do trabalho é introduzido a Simulação, apresentando o material técnico básico necessário para um bom estudo. Em sequência é apresentado uma metodologia abrangente para desenvolvimento de trabalhos de simulação, que podem ser utilizados em qualquer tipo de sistema.

A metodologia foi utilizada em um projeto durante as fases de FEL (Front-end Loading) 2 e 3 (Projeto Conceitual e Básico). O projeto consiste da produção de produtos de minério de ferro de uma mineração em Corumbá/MS, posterior estocagem e transporte até o porto de Santos/SP onde será exportado, passando por uma ferrovia de aproximadamente 1700 km, Figura 1. O Capex estimado do projeto é da ordem de R\$ 11,5 bilhões.

Figura 1 – Abrangência do Projeto e trajeto da ferrovia (Fonte: GOOGLE EARTH, 2012, adaptado)

A terceira etapa é a construção do modelo, mostrando as premissas e dados de entrada necessários para criação de um modelo para o Sistema Integrado Usina de Beneficiamento (Pátio de Estocagem) – Ferrovia – Porto. Em sequência é apresentado os dados de saídas do modelo necessários para avaliação deste Sistema Integrado e sua análise.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia de criação do modelo e análise para um sistema integrado envolvendo a Estocagem de Produtos de Minério de Ferro na Mineração, o Transporte Ferroviário e Operações Portuárias.

As principais respostas a serem obtidas do modelo são:

- Estocagem de Produtos
 - Capacidade mínima das pilhas.
 - Número e capacidade das recuperadoras.
 - Número e capacidade dos carregadores de trens.
- Transporte Ferroviário
 - Número de composições ferroviárias em operação na via.
 - Número de locomotivas em espera para manutenção.

- Número de vagões em espera para manutenção.
- Período de recuperação da ferrovia após grandes paradas.
- Operações Portuárias
 - Número e capacidade dos viradores de vagões.
 - Número e capacidade das empilhadeiras.
 - Capacidade mínima das pilhas.
 - Número e capacidade das recuperadoras.
 - Número e capacidade dos carregadores de navios.
 - Número de berços.
- Sistema Integrado
 - Capacidade total de exportação do sistema.
 - Gargalos.

Este trabalho mostrará quais as informações e premissas a serem adotadas para criação do modelo, os dados a serem obtidos da simulação e a metodologia de análise dos mesmos. Ressalta-se que os valores usados e os obtidos da simulação dinâmica serão omitidos, pois além de não serem o foco deste trabalho, são oriundos de um projeto no qual se tem um acordo de confidencialidade.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

O Plano de Aceleração do Crescimento (PAC), criado em 2007 pelo governo federal, envolve investimentos de centenas de bilhões de reais, incluindo a expansão de 56 empreendimentos da malha ferroviária, sendo 2.672 km em andamento, para permitir a ligação de áreas de produção agrícola e mineral a portos, indústrias e mercado consumidor (Figura 2), bem como, investimento em 71 empreendimentos em 23 portos brasileiros para ampliar, recuperar e modernizar as estruturas visando uma redução nos custos logísticos, melhora da eficiência operacional, aumento da competitividade das exportações e incentivo ao investimento privado. (5º BALANÇO DO PAC 2, 2012; MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, 2013).

Figura 2 - Investimento na malha ferroviária pelo PAC (fonte: 5º BALANÇO DO PAC 2)

Há obras de dragagem de aprofundamento de infraestrutura portuária, de inteligência logística e de terminais de passageiros, como mostra a Figura 3 (5º BALANÇO DO PAC 2, 2012; MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, 2013).

Figura 3 - Investimento em portos pelo PAC (fonte: 5º BALANÇO DO PAC 2)

Estes investimentos governamentais somados aos investimentos privados abrem grandes oportunidades de crescimento. Entretanto com a queda do preço do ferro, devido ao aumento de produção e a perspectiva de desaquecimento da demanda por aço da China, nota-se que empresas, como a VALE, reduzam investimentos e adiem projetos (IBRAM, 2013; EXAME, 2012), mostrando que os recursos futuros a serem aplicados necessitam ser investidos de maneira mais eficiente possível. Para atingir estas metas é necessário uma visão global do empreendimento e sua análise através do tempo, com isso a simulação dinâmica é a ferramenta ideal para este estudo.

Em 1989 o Departamento de Defesa e o Departamento de Energia dos Estados Unidos especificaram que a técnica de simulação e modelagem é uma das 22 técnicas essenciais dos Estados Unidos (COUNCIL ON COMPETITIVENESS, 1989). Já em 1999, o diretor do National Science Foundation declarou a simulação como o terceiro braço da ciência (BANKS, 2009). No Brasil, este assunto não foi relevado na importância devida, sendo este um dos fatores que podem ter influenciado na produtividade do capital brasileiro, que no fim da década de 90, era 8% inferior a dos países desenvolvidos que compõem a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (FEU, 2003).

O modal ferroviário corresponde a 20% na matriz do transporte de cargas no Brasil, sendo que em 2008 o sistema transportou 426,5 milhões de toneladas úteis de carga, 1,55 milhões de passageiros/ano no interior e 7,5 milhões de passageiros/dia no subúrbio (BORGES, 2011). Mattos (2001) infere que o valor adicionado à economia pelo setor de transportes equivalha de 3 a 5% do Produto Interno Bruto (PIB) de um país, o que resultaria para o Brasil que o transporte ferroviário é da ordem de 1% do PIB.

Pelo minério de ferro ser um *commodity* de baixo valor agregado, o preço do transporte influencia diretamente na competitividade de toda a cadeia mineral, principalmente com a cotação do minério de ferro tendo caído pela metade em 2013 (BBC, 2013; SILVA et al., 2011).

Historicamente, terminais de minério de ferro e carvão foram projetados com um estoque considerável entre recepção e carregamento do navio. Isto é, produto era entregue no porto significativamente antes da chegada do navio. A função da estocagem era de desconectar a operação de entrega do sistema

(muitas vezes por trem) da operação de carregamento de navio. Entretanto, esta operação requer uma significativa quantidade de espaço de estocagem, tipicamente de 5 a 10% do volume de exportação anual (SAGAN; KING, 2011).

Atualmente, muitos terminais estão limitados em área e não podem mais expandir seus espaços de estocagem para alcançar aumento da demanda. Mudando a operação de estocagem para um sistema de entrega "*just in time*", permite-se aumento de exportação para um determinado espaço de estocagem. Uma operação deste tipo também pode resultar em um aumento da eficiência dos custos do terminal. Entretanto, a integração próxima requerida entre o sistema ferroviário e o terminal marítimo cria desafios significantes para a operação, e complicações na análise de capacidade e gargalos (SAGAN; KING, 2011).

Diversos estudos de simulação dinâmica já foram realizados e publicados para sistemas isolados, entretanto, poucos para um modelo integrado que envolva a estocagem do produto na mineração até exportação por navios, passando por uma ferrovia.

Um exemplo de como um modelo integrado é necessário para se estimar o número e capacidade dos equipamentos, é o cálculo do número de viradores de vagões em um porto. Ao considerar apenas as operações portuárias, pode-se subestimar o número necessário de equipamentos, entretanto ao considerar as condições de toda a via férrea e seu tráfego, é possível observar efeitos que não estavam sendo previstos, como a necessidade de mais equipamentos devido a paradas pontuais na ferrovia.

Outro exemplo é a disputa de recursos, como máquinas de pátio compartilhadas por viradores de vagões e carregadores de navios, que fornecem valores não intuitivos. Fornecer respostas já conhecidas não é a ideia da simulação, mas sim, dar visibilidade a informações ou conflitos despercebidos.

Um modelo integrado do sistema, permite um sequenciamento de investimento que diminua os riscos do empreendimento, otimizando-o e aumentando a produtividade do capital.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É impossível ter uma cadeia de suprimentos minerais otimizada, eficiente e efetiva usando planilhas estáticas e sistemas isolados. Estudos mostram que mais de 30% das planilhas básicas contêm erros (PANKO; SPRAGUE, 1998). Uma solução sofisticada é necessária para avaliar cadeias de suprimentos complexas que incluem minas, pilhas de estocagem, transporte, portos e processos.

A simulação dinâmica foi desenvolvida para preencher os *gaps* de informações que a análise estática não consegue abranger. Um exemplo, é a simulação dinâmica realizada para a empresa Resource Generation, que possui minerações de carvão na África do Sul e Tasmânia. O desafio da simulação era obter os gargalos e capacidades da usina e determinar o volume da pilha de ROM e produtos. Com a possibilidade de vários cenários serem gerados, pode-se obter diversas informações não alcançadas pela análise estática, como a sensibilidade da ferrovia e fatores chave que afetam a capacidade de processamento da usina (SIMULATION ANALYSIS, 2010). A sensibilidade da ferrovia na atualidade é um fator chave, pois os gastos com pilhas de estocagem e almoxarifado podem ser diminuídos, evitando assim o capital de giro travado (STEINBERG; TOMI, 2010). Numa economia competitiva como a atual, a empresa necessita ter seu capital de giro com maior liquidez possível para se adaptar a variações do mercado e não ser consumida. A redução do ciclo de caixa, permitindo esta maior liquidez, requer a adoção de medidas de natureza operacional, envolvendo o encurtamento dos prazos de estocagem, produção, operação e vendas (FLEURIET et al., 2003).

A simulação dinâmica tem como suas bases a modelagem e a simulação. Modelagem é definida como uma representação simplificada de uma entidade ou processo complexo. Simulação é uma imitação de algum dispositivo real ou estado de negócios (FRANKLIN; GERTENBACH, 2005). Em essência, a modelagem é uma maneira de resolver problemas que ocorrem no mundo real e simulação é o processo de execução do modelo.

A simulação dinâmica aplicada na tomada de decisão, como na escolha do modo de transporte, balanço de recursos e capacidade do sistema, oferece grande oportunidade na otimização do capital investido e minimização dos riscos (FRANKLIN; GERTENBACH, 2005; LEBEDEV 2007). Sem a necessidade de

ensaios em escala, um modelo pode mostrar de maneira ilustrativa uma visão geral do processo, conforme mostra a Figura 4, permitindo assim a análise de várias alternativas de maneira rápida e a baixo custo, ocasionando a maximização do retorno do investimento e diminuindo os riscos inerentes do projeto.

Figura 4 – Exemplo de animação de uma simulação dinâmica (Fonte: Autoria própria)

Simulações de operações portuárias são relativamente comuns, sendo realizadas a várias décadas. Como exemplo pode-se citar uma simulação feita para o terminal portuário instalado na cidade de São Luis, MA, em 1996, que tinha como finalidade recepcionar bauxita, carvão mineral, petróleo, piche siderúrgico e soda cáustica e despachar alumina. Devido a complexidade da operação desse terminal, foi utilizado a técnica de simulação dinâmica, a qual mostrou-se muito aplicável, fornecendo informações ágeis para dar apoio às tomadas de decisão, sem perturbar o sistema real, salientando que os custos do estudo para avaliação de performance são mínimos se comparados aos benefícios trazidos (CARDOSO; TELES, 1997).

O estudo realizado pela Samarco Mineração modelou um sistema integrado pátio-porto e teve como objetivo o aumento da capacidade para 34 milhões de toneladas por ano (Mtpa). O estudo mostrou a importância da análise integrada do sistema pátio-porto, visto que, em determinados cenários, realizar

investimentos em um dos subsistemas, não aumenta o desempenho global (JULIÁ, 2010).

A simulação também pode ser usada para quantificar segurança intrínseca e extrínseca, para que políticas de mitigação possam ser desenvolvidas para minimizar danos materiais e pessoais, como os estudos realizados para o Estreito de Istambul, um dos canais mais congestionados e de difícil navegação, e os portos do canal do rio Delaware (ALTIOK, 2010).

A simulação de sistemas de transportes, em especial a ferrovia, é um campo em crescimento, visto que diferentemente de outras áreas, como militar e manufatura, a simulação de ferrovias está atrasada, tanto no Brasil quanto exterior. Um estudo realizado na Union Pacific Railroad, uma das maiores operadoras ferroviárias nos Estados Unidos, com mais de 60 mil quilômetros de ferrovia, mostrou um potencial inexplorado para o uso da simulação (DALAL; JENSEN, 2001; FIORONI; BOTTER, 2004).

O estudo da malha ferroviária de Los Angeles-EUA avaliou o tempo de atraso que os trens apresentariam em demandas futuras, testando vários projetos de melhoramento, de modo a avaliar quais eram os mais eficientes. Nesta malha, o caso estudado possuía 195 trens por dia de carga e 163 trens por dia de passageiro, com um atraso médio de 2430 minutos para os trens de carga. Com a simulação, pode-se escolher a melhor opção que poderia reduzir um atraso médio teórico para 26 minutos, 11% do inicial. A visão geral da estrutura do modelo é representado na Figura 5 (DESSOUKY; LEACHMAN, 2002).

Figura 5 – Visão geral da estrutura do modelo (Fonte: DESSOUKY; LEACHMAN, 2002, adaptado)

A Rio Tinto realizou um estudo para descobrir a capacidade nominal de 11 segmentos da sua malha ferroviária separadamente. A malha ferroviária está interligada com minerações de minério de ferro que produzem 150 Mtpa. O estudo concluiu um excedente de capacidade por trecho de 31 a 95%, entretanto a interrelação entre os segmentos entre si, e com as minerações e portos não foram estudados, podendo superestimar a capacidade da ferrovia (SMS, 2008).

Um estudo da malha ferroviária que atendem o porto de Lon Beach e Los Angeles, na Costa Oeste dos Estados Unidos, com 22 terminais ferroviários, foi realizado para obter a melhor configuração possível. A análise da simulação, de várias alternativas de configurações de vias férreas, mostrou uma diferença relativa no tempo total em espera dos trens entre as alternativas propostas do corredor ferroviário e o estado atual (DESSOUKY; LEACHMAN, 1995).

Modelos englobando as operações ferroviárias e portuárias são mais raras. Um destes estudos foi o planejamento da expansão em infraestrutura portuária e ferroviária em minas da ARCELORMITTAL no Canadá, que tinha o propósito de

determinar o investimento e mudanças operacionais para suportar aumentos de produção de minério de ferro. Com o modelo pode-se conduzir análises para retirada de gargalos, comparar alternativas e otimizar, em termos de capacidade logística e de estocagem, efetividade de investimentos de capital, cronograma de investimentos e eficiência operacional (MCGINTY et al., 2009).

A operação de uma mineradora de ferro na Austrália Ocidental (Figura 6), que engloba o material saindo da mina por caminhões, britagem, estocagem, transporte ferroviário por poucas centenas de quilômetros (18 trens por semana) e carregamento no navio, foi modelada para comparar e avaliar vários projetos para melhorar a eficiência do processo de produção e redução de custos, visto que o sistema era ineficiente devido seus altos custos de estocagem e manuseio. O modelo permitiu redução de custos operacionais significativos, resultante de mudanças operacionais, que seriam difíceis de justificar sem os resultados do modelo (EVERETT, 2010).

Figura 6 - O sistema de produção generalizado (Fonte: EVERETT, 2010, adaptado)

A Cadeia de Carvão de Goonyella (Figura 7), consiste em 18 minas, dois terminais marítimos, uma frota compartilhada de trens e mais de 800 km de ferrovia, localizado na Austrália. O sistema exporta mais de 80 milhões de

toneladas de mais de 70 tipos de produtos por anos. A simulação do sistema mostrou que sistemas diferentes de gerenciamento de estocagem no porto, impactam no carregamento dos navios e nas operações do trem, que afetam toda a cadeia. Algumas das consequências não poderiam ser capturadas com precisão em modelos separados (SAGAN E KING, 2011).

Figura 7 - Cadeia de Carvão de Gooneyella (Fonte: SAGAN E KING, 2011)

2.1 INTRODUÇÃO A SIMULAÇÃO

2.1.1 Definição de simulação

Simulação é a atividade de representar um processo ou sistema com um modelo matemático lógico, o qual imita suficientemente o comportamento dinâmico do sistema atual de interesse. Sistemas são simulados devido a necessidade de melhor entendimento de como eles trabalham, determinar os fatores que influenciam seus comportamentos e observar como eles reagem a essas mudanças. Resumidamente, o interesse genérico são as respostas do sistema. Modelos de simulação são usados para fornecer informações que permitam prever ou controlar o futuro daquele segmento de realidade que o modelo de simulação representa (KIVIAT, 1967; MCGINTY, 2001).

2.1.2 Razão para simulação

2.1.2.1 Modelo

Quando um sistema não pode ser estudado diretamente, utiliza-se de um modelo para fazê-lo. O modelo é usado para descrever, projetar e analisar um determinado sistema. Modelos podem ser pictórico, descritivos ou qualitativos. Podem ser, genericamente, de natureza aproximada ou de natureza matemática e quantitativa e razoavelmente preciso. Um modelo representa um método alternativo da realidade para descrever os fenômenos atuais que permitam compreender a natureza dos resultados a serem esperados do sistema modelado. Estes resultados podem ser do sistema na sua forma atual, numa forma modificada, ou em uma forma nova ou proposta quando submetido a várias entradas e ambientes (KIVIAT, 1967; MCGINTY, 2001).

Modelos podem ser categorizados nas seguintes classificações:

1. Semelhança com a realidade (TORRES; ORTIZ, 2005):

A. **Modelos isomórficos.** Incluem todas as características operacionais da situação real, o qual em teoria poderia substituí-la. Quando sistemas são complexos, um modelo isomórfico é impossível de construir. Felizmente, de um senso prático, é desnecessário construir um modelo assim.

B. **Modelo homomórfico.** Variáveis relacionadas são agrupadas para permitir algumas suposições mais ou menos amplas, desta forma tentam reproduzir os efeitos brutos das interações no sistema real em vez de efeitos detalhados, com a finalidade de facilitar a tarefa de estruturação do modelo e interpretação dos resultados. O grau de homomorfismo suficiente para atingir os resultados desejados é fundamentalmente importante, sendo descrito mais adiante.

2. Tipos de modelos (KIVIAT, 1967):

A. **Modelo icônico.** Ele “parece” como o objeto de investigação. Usado para descrever coisas estáticas ou modelos dinâmicos em um instante de tempo.

Exemplos: globo, modelo em escala de carro.

B. **Modelo Simbólico.** Componentes do sistema e a interação entre eles são representados por símbolos, ambos matematicamente e logicamente.

Exemplos: Álgebra Booleana, modelo probabilísticos, fluxogramas.

C. **Modelo Análogos.** Caracterizado pelo uso de transformações convenientes de um conjunto de propriedades para outro conjunto de propriedades de acordo com regras específicas.

Exemplos: Diagrama de blocos, circuitos equivalente, layouts de plantas

3. Métodos de solução (MCGINTY, 2001):

A. **Modelos resolvidos por métodos analíticos.** Soluções exatas são encontradas usando equações matemáticas.

B. **Modelos resolvidos por métodos numéricos ou determinísticos.** Soluções aproximadas são encontradas usando procedimentos iterativos.

C. **Modelos resolvidos por métodos de Monte-Carlo.** Soluções são encontradas empregando amostragem aleatória.

Diferentes modelos existem para diferentes propósitos. Modelos icônicos fazem bons auxílios visuais, mas são geralmente inadequados para prever ou explicar o comportamento dos sistemas. Modelos simbólicos são bons para prever e explicar, mas oferecem poucos auxílios visuais (KIVIAT, 1967).

Estudos de um sistema normalmente são realizados para prever e explicar comportamentos. Questões relativas sobre o estudo do sistema requerem modelos compostos de mecanismos, os quais sejam capazes de produzir aspectos relevantes do comportamento e desempenho do sistema (KIVIAT, 1967).

Quando uma tentativa de formular e resolver um problema complexo em termos analíticos, o conhecimento torna-se o fator limitante na construção matemática do modelo. Apesar da sofisticação dos modelos matemáticos atuais, problemas mais complexos não podem ser expostos para que possam ser resolvidos analiticamente (KIVIAT, 1967).

Além disso, modelos em geral e, em particular os de simulação, são usados para dois propósitos diferentes: pesquisa e gerenciamento.

Pesquisadores que aplicam métodos científico tendem a julgar o modelo pela qualidade. Um modelo de alta-qualidade é um que seja (SHANNON, 1975):

1. **Não trivial:** Levam a ideias sobre o sistema, não perceptíveis por observação direta;
2. **Poderoso:** Fornece um grande número de ideias não triviais;
3. **Elegante:** A estrutura do modelo é simples e executável eficientemente no computador.

Gerentes, em outra mão, usam o modelo para ganhar ideias sobre o valor de alternativas de decisões possíveis. Eles estão preocupados com as decisões de ações pragmáticas e tendem a julgar o modelo pela sua aplicabilidade. Deste ponto de vista, um modelo aplicável é (SHANNON, 1975):

1. **Relevante:** Lida com problema de importância para o gerente;
2. **Válido:** Um alto grau de confiança pode ser colocado nas inferências feitas por ele;
3. **Utilizável:** Fornece soluções aceitáveis ou respostas de problemas;
4. **Rentável:** Os ganhos no sistema ou os custos evitados tem que ser maior que o custo de desenvolvimento e uso do modelo.

2.1.2.2 Solução e Simulação

Procedimentos analíticos são geralmente preferidos em relação aos numéricos, visto que são mais acurados e menos onerosos para computar. Quando estes não estão disponíveis, o que acontece na maioria dos sistemas complexos, procedimentos numéricos são utilizados. O uso de técnicas numéricas coloca uma carga adicional na solução do problema. Ele não pode apenas pensar sobre o problema em mãos, mas também sobre os procedimentos para estimativas das soluções e os erros inerentes das estimativas produzidas pelo modelo (KIVIAT, 1967).

Simulação é o uso de modelos numéricos no estudo de comportamentos do sistema, uma vez que funciona ao longo do tempo. Simulação é um técnica experimental numérica. Ela é geralmente mais dispendioso para ser usada do que soluções analíticas (KIVIAT, 1967).

Quando um modelo de simulação recebe um conjunto de parâmetros de entrada e um estado inicial do sistema, ele é processado para deduzir estados de sistema subsequentes e estimar medidas de desempenho do sistema. Diferentes

definições de parâmetros produzem diferentes respostas do sistema. Estas respostas são estudadas para determinar o conjunto de valores de parâmetros, que em algum sentido podem otimizar as performances do sistema (KIVIAT, 1967). Esta é uma situação para uso de Programas de Otimização para Simulação.

2.1.2.3 Simulação e Análise do Sistema

Dois objetos interagem como um sistema quando eles são integrados, de modo que a performance de um afeta a performance do outro. Um estudo de um não pode ser realizado isoladamente do outro, sem perda de efeitos causado pela interação. A medida que o número de variáveis e interações torna-se grande, mais difícil se torna a análise analítica do sistema. Simulação é frequentemente o único recurso de análise (KIVIAT, 1967). A Figura 8 mostra as formas de estudos de um sistema.

Figura 8 – Formas de estudo de sistemas (Fonte: CHRISPIM, 2007, adaptado)

Sistemas não precisam ser complexos ou amplos para a simulação ser vantajosa. Há outras razões para emprego da simulação que são independentes do tamanho ou complexidade do sistema, como por exemplo, o requerimento de controle do experimento e a presença de variações estatísticas. Com relação ao controle experimental, simulação é frequentemente preferível sobre testes em mundo real, quando há dificuldade no controle dos parâmetros, como manter as condições ambientais constantes ao longo destes testes. Com relação as variações estatísticas, certas classes de modelos analíticos estruturais simples

devem muitas vezes serem simulados em vez de resolvidos, devido suas propriedades estatísticas que não admitem soluções analíticas (KIVIAT, 1967).

Muitos sistemas possuem variabilidade que pode ser devida a fatores como:

- Falhas aleatórias;
- Tempos variáveis de processamento;
- Eventos não previsíveis;
- Competição por recursos;
- Interações do sistema;
- Confiabilidade de fornecimento;
- Espera em filas;
- Prioridades múltiplas.

O acúmulo e interação destas variabilidades através do tempo determina a performance global do sistema. Simulação, por representar os elementos de tempo e variabilidade, possibilita o estudo, a análise e a avaliação do sistema que de outra maneira não seriam possíveis.

2.1.2.4 Simulação como ferramenta da Análise do Sistema

Há duas maneiras para analisar a performance do sistema: medindo o comportamento médio ou medindo as respostas dinâmicas. As análises sofisticadas medem os dois (KIVIAT, 1967).

Medidas das performances médias permitem os sistemas serem comparados estaticamente. A avaliação do “melhor” é feita pela análise das medidas, levando em conta a variação através do tempo e outras propriedades estatísticas (KIVIAT, 1967).

Frequentemente, os estudos estão interessados em outras comparações, além da estática. O objetivo não é saber apenas qual o nível a medida atingiu, mas também como ela foi atingida e a dinâmica do sistema: caminho o qual o sistema responde a diferentes choques e distúrbios. Estas medidas retratam o comportamento do sistema dependente do tempo, permitindo a discriminação entre sistemas que possuem médias de performance idênticas, mas comportamentos característicos diferentes (KIVIAT, 1967).

A maioria das técnicas analíticas são apenas capazes de determinar medidas estáticas e medidas de performance dinâmicas, sendo derivadas

analiticamente para poucos sistemas extremamente simples. A maioria dos estados do sistema e atividades mudam continuamente ao longo do tempo. Simulação, por representar os elementos de tempo e variabilidade, é capaz de estimar o dinamismo do sistema e ajudar o entendimento desta dinâmica (KIVIAT, 1967).

A simulação é uma ferramenta de previsão do comportamento de sistemas mesmo que estes não existam na realidade, entretanto, a previsão de um simulador só é boa na medida em que se tenha uma compreensão básica das partes componentes (KING; SCHNEIDER, 2004).

2.1.3 Vantagens e Desvantagens de utilização da simulação

A lista abaixo enumera alguns dos benefícios do método de simulação (MCGINTY, 2001):

1. Permite a vista dos efeitos causados em todo o sistema a partir de mudanças locais;
2. Interferências podem ser extraídas do sistema sem a necessidade de construir ou perturbá-lo;
3. Análises “e-se?” (what-if) podem ser utilizadas para achar meios de melhorar a performance dos sistemas;
4. Fornecer segurança de que o sistema proposto atingirá as metas propostas;
5. Fraquezas do sistema são expostas;
6. Práticas operacionais podem ser testadas antes de implantadas;
7. Gargalos podem ser identificados;
8. Projetos do sistema podem ser comparados;
9. Tempo pode ser comprimido e expandido;
10. Hipóteses e teorias podem ser testadas quanto à sua viabilidade;
11. Fornece uma base para experimentos estatísticos controlados;
12. Informações colhidas para construção do modelo promovem um melhor entendimento do sistema;
13. Compreensão de operações complexas são adquiridas.

A lista abaixo enumera alguns das desvantagens do método de simulação (MCGINTY, 2001):

1. Pode ser caro e consumir tempo;
2. Pode ser difícil de verificar se os resultados são válidos;
3. Fatores humanos e tecnológicos podem ser ignorados;
4. Resultados podem ser mal interpretados;
5. Cada rodada de um modelo de simulação estocástica fornece apenas uma estimativa das características reais do modelo, para um dado conjunto de parâmetros de entrada;
6. Requer analistas altamente treinados e hábeis;
7. Obter dados de entrada altamente confiáveis podem consumir muito tempo.

2.1.4 Quando utilizar simulação

Em geral, para avaliação de sistemas complexos que variam no tempo, simulação é a ferramenta escolhida. Pode-se citar outras situações nas quais a simulação é usada (MCGINTY, 2001):

1. Impossibilidade ou custo extremamente alto da observação do processo no mundo real;
2. Problemas nos quais um modelo matemático pode ser formulado, mas soluções analíticas são impossíveis ou muito complicadas;
3. Impossibilidade ou custo extremamente alto da validação do modelo matemático descritivo do sistema;
4. Quando outros métodos de análises, como modelos de planilhas ou programas lineares, falham em capturar as complexidades das interações do sistema, tempo de inatividade, filas e outros fenômenos observados no sistema real.

Situações onde a simulação não deve ser usada (BANKS; GIBSON, 1997):

1. O problema pode ser resolvido usando “análises de senso comum”;
2. O problema pode ser resolvido analiticamente usando modelo de estado de filas estacionárias, modelo de inventário probabilístico, etc;
3. É mais fácil realizar um experimento no sistema real;
4. O custo da simulação excede os potenciais ganhos ou prevenção de custos;
5. Há uma lacuna de recursos apropriados:

- a. Pessoa experiente que entenda o problema;
 - b. Analista competente;
 - c. Tempo suficiente para os resultados do modelo ser úteis;
 - d. Software ;
 - e. Hardware;
 - f. Verba.
- 6. Expectativas do projeto não podem ser atingidas;
 - 7. Comportamento do sistema é excessivamente complexo;
 - 8. Fatores além dos operacionais, como humanos e/ou tecnológicos, podem ser extremamente difíceis ou impossíveis de modelar.

2.1.5 A Natureza da Simulação

Um modelo de simulação é usado de um modo experimental, ele não encontra ou procura os parâmetros ideais do sistema por si só. O usuário deve definir iterativamente e analisar até que uma solução é atingida, por isso a simulação não é um substituto da experiência em engenharia e conhecimento em projetos. Além disso, simulação não é efetiva se o sistema simulado não é bem compreendido e propriamente descrito e é apenas tão acurado quanto os dados de entrada (KIVIAT, 1967; MCGINTY, 2001).

Simulação é tanto uma arte e uma ciência. Análise do sistema, programação computacional, probabilidade, estatística e princípios de engenharia abrangem o componente ciência. Determinar os fatores relevantes para análise, o nível de detalhes necessários para extrair as informações necessária, e construir o modelo abrangem o componente arte. Como uma analogia para simular, considere a atividade de pintura. Para que um pintor produza uma pintura com qualidade, como a Mona Lisa, ele precisa entender como diferentes misturas de cores resultam, princípios de luz e perspectiva, de sombreamento e assim por diante. Esta é a ciência da pintura. Mas apenas compreender a ciência da pintura não permite que se pinte a Mona Lisa. Isto leva tempo e prática, como em qualquer arte, para se tornar um pintor habilidoso. E assim, os mesmos princípios são aplicados para se tornar um profissional habilidoso em simulação. A utilidade de um estudo de simulação depende da qualidade do modelo e da habilidade do modelador (SHANNON, 1975; SAVORY; MACKULAK, 1994).

Há uma grande quantidade de material técnico que se deve dominar antes de fazer um bom estudo. Ao contrário de outras técnicas, programas de simulação podem ser escritos com pouco treinamento e serem usados para produzir resultados realísticos. O problema com as abordagens casuais para simular reside em sua tendência a gerar respostas que parecem corretas, mas na verdade não são. Um dos maiores perigos com a simulação é a facilidade com a qual programas podem ser construídos, apenas aparentando reproduzir o comportamento de um sistema de objetos. Uma coisa é um modelo assemelhar-se com um sistema, outra é agir como ele. Assim sendo, grande cuidado deve ser tomado em cada etapa do processo de simulação (KIVIAT, 1967).

2.1.6 Domínios de Aplicação

A seguir são mostrados domínios de aplicação representativos da simulação (PRITSKER, 1998; SHANNON, 1992):

1. Operações Industriais:
 - a. Projeto de planta;
 - b. Aumento da produtividade;
 - c. Melhora no processo;
 - d. Planejamento da mão de obra;
 - e. Manufatura auxiliada por computador;
 - f. Programação;
 - g. Manuseio de materiais;
 - h. Sistema de controle de inventário;
 - i. Estratégia de operação.
2. Logística e Sistema de Transportes:
 - a. Performance de sistema de ferrovia;
 - b. Rota e programação de ônibus;
 - c. Controle de tráfego aéreo;
 - d. Operação de terminais;
 - e. Congestionamento de estradas e rodovias;
 - f. Armazenamento e distribuição;
 - g. Gestão da cadeia de suprimento;
 - h. Projeto de rede.
3. Sistemas de Computador e Comunicação:

- a. Avaliação de performance;
 - b. Projeto de microprocessadores;
 - c. Processamento de sinais.
4. Controle e Planejamento de Projetos:
- a. Planejamento de produtos;
 - b. Marketing;
 - c. Pesquisa e desenvolvimento;
 - d. Construção;
 - e. Programação.
5. Planejamento Financeiro:
- a. Investimento de capital;
 - b. Análise do fluxo de caixa;
 - c. Modelo corporativo;
 - d. Modelo econométrico.
6. Estudos Ambientais e Ecológicos:
- a. Controle de inundação;
 - b. Controle de poluição;
 - c. Fluxo de energia;
 - d. Agricultura;
 - e. Controle de insetos;
 - f. Manutenibilidade de reator.
7. Sistema de Assistência Médica:
- a. Gerenciamento de inventário;
 - b. Planejamento hospitalar;
 - c. Planejamento da mão de obra;
 - d. Manuseio de materiais.
8. Sistema Militar:
- a. Jogos de guerra;
 - b. Conquista;
 - c. Logística;
 - d. Comunicação;
 - e. Treinamento.
9. Biociência:
- a. Controle de doenças;

- b. Ciclos de vidas biológicos;
- c. Estudos biológicos.

A lista não tem intenção de cobrir todas as aplicações da simulação. Em fato, seria difícil encontrar alguma área da atividade humana que não tenha alguma ação da simulação. A lista apenas sugere grandes utilidades da simulação que ajudam a resolver ampla gama de problemas significantes (SHANNON, 1992).

2.2 TIPOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Simulação, como um técnica de resolução de problemas, precede o aparecimento dos computadores digitais em muitos anos. Desde o surgimento da tecnologia digital, simulação se tornou uma das ferramentas de análises de sistemas largamente empregados. Simulação computacional é um domínio de aplicação de linguagem de programação que permite divisão adicional em três partições (NANCE, 1993):

- Simulação de Eventos Discretos;
- Simulação Contínua;
- Simulação de Monte Carlo.

As disciplinas associadas com simulação de eventos discretos são engenharia industrial, ciências computacionais, gestão, pesquisa operacional e administração de negócios. As disciplinas associadas com a simulação contínua são elétrica, mecânica, engenharia química e física. Na realidade, um grande número de problemas são combinações de fenômenos discretos e contínuos e deve ser modelado usando uma abordagem combinada. Entretanto, devido a divisão dos grupos, ou a modelagem contínua ou a discreta é normalmente empregada (PRITSKER, 1998).

2.2.1 Simulação de Eventos Discretos

Simulação de eventos discretos é usada para modelar sistemas que mudam de estado num ponto discreto no tempo como resultado de um evento específico ocorrido. O estado do sistema é descrito por todos os valores individuais de estados dos objetos no sistema. Como exemplo, um sistema pode ser descrito pelo estado de dez máquinas, cada uma tendo o estado ocupado (1)

ou ocioso (0). O estado do sistema será descrito pelo estado de cada máquina individual, como (1,0,1,0,1,1,1,0,1,0) (NANCE, 1993; MCGINTY, 2001).

Um evento é uma ocorrência instantânea no tempo que pode causar mudança no estado do sistema. Eventos podem ser desencadeado por uma condição, um tempo decorrido ou outra cadeia de eventos. Simulações de eventos típicas incluem, por exemplo, a chegada de entidades, falha de recursos e conclusões de atividades (NANCE, 1993; MCGINTY, 2001).

Um exemplo de sistema que pode ser representado por simulação discreta é uma planta de processamento de aço. O material chega para ser processado na planta em um ponto discreto no tempo. Cada parte é processada por vários equipamentos, transportada entre estações, colocada em um armazém, empacotada e enviada. O tempo de começo e fim de cada uma das atividades representa o ponto no tempo em que o estado do sistema muda (uma máquina passa de ocupada para ociosa, uma fila passa de vazia para cheia, etc.) (NANCE, 1993; MCGINTY, 2001).

2.2.1.1 Simulação Paralela de Eventos Discretos

O algoritmo de simulação paralela de eventos discretos (PDES – Parallel Discrete-Event Simulation) tenta acelerar a execução da simulação por distribuição da carga de trabalho entre múltiplos processadores. Um PDES necessita empregar um algoritmo que assegura que os eventos sejam executados de maneira consistente, o que significa que cada objeto da simulação é acessado pelo evento na ordem crescente de tempo (FUJIMOTO, 1998).

Sistemas de processadores múltiplos podem ser divididos em duas categorias gerais: processadores em paralelo (multiprocessadores) e sistemas distribuídos (multicomputadores). Processadores em paralelo são caracterizados como processadores homogêneos acoplados fortemente, que dividem o mesmo espaço de memória principal. Um sistema distribuído é uma coleção fracamente acoplados de vários processadores heterogêneos, os quais se comunicam por transmissão de mensagens (BURNS; WELLINGS, 2001).

A dependência de dados pode impor uma execução sequencial independente da disponibilidade de hardware. Quando instruções são dependentes de resultados determinados por instruções anteriores, não há oportunidade de aumento de velocidade por adição de processadores.

Exemplo 1: Operação em série

$$x = 9$$

$$y = 8 + x$$

A segunda equação é dependente da primeira, logo esta equação não pode ser completada corretamente sem a conclusão da primeira. Por isso, um segundo processador seria inútil neste caso, visto que a operação é estritamente em série.

Exemplo 2: Operação em paralelo

$$\begin{bmatrix} 4 & 3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 5 & 9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9 & 12 \end{bmatrix}$$

Cada elemento da soma da matriz pode ser computado independentemente. Portanto, um processador adicional poderia, teoricamente, acelerar o cálculo.

2.2.2 Simulação Contínua

Simulação contínua é usada para modelar sistemas que mudam de estado continuamente em relação ao tempo, como por exemplo, um conjunto de tanques, nos quais o volume de cada tanque muda continuamente.

Equações diferenciais são usadas para calcular a mudança de variáveis de estado através do tempo. Estas equações são resolvidas em pequenos incrementos de tempo. Quando limites são excedidos, eventos são disparados e a lógica de eventos associados são executados.

2.2.3 Simulação de Monte Carlo

Simulação de Monte Carlo é um sistema de análise que emprega variáveis distribuídas aleatoriamente, para resolver problemas estocásticos e determinísticos, onde a passagem do tempo não influencia.

2.2.4 Formas Relacionadas de Simulação

Os seguintes tipos de simulação são combinações de eventos discretos, contínuos e Monte Carlo (MCGINTY, 2001):

- Simulação Combinada Discreta – Contínua;
- Simulação Híbrida;
- Gaming.

2.2.4.1 Simulação Combinada Discreta - Contínua

Em simulação combinada, a variável dependente de um modelo pode mudar discretamente, continuamente ou continuamente com pulos discretos. Há três interações fundamentais que podem ocorrer entre mudanças de variáveis contínuas e discretas.

1. Uma mudança discreta no valor pode ser feita em uma variável contínua.

Exemplo: Uma segunda estação de energia torna-se disponível, o que instantaneamente aumenta o total de energia disponível no sistema.

2. Um evento envolvendo uma variável de estado contínuo atinge um valor limiar, que causa um evento a ocorrer ou a ser programado.

Exemplo: Quando um nível de óleo disponível para entrada cai abaixo de um valor predefinido, desligando a refinaria.

3. A descrição da função da variável contínua pode ser alterada em instantes discretos de tempo.

Exemplo: No momento de descarga de poluente num ecossistema, relações de crescimento que regulam as populações de espécies são alterados imediatamente.

Dois tipos de eventos podem ocorrer em simulações combinadas:

1. Eventos de tempo: programados para ocorrer em pontos de tempos específicos;
2. Eventos de estados: ocorrem quando o sistema atinge um estado particular.

2.2.4.2 Simulação Híbrida

Refere-se ao uso de um submodelo analítico com um modelo de eventos discretos.

2.2.4.3 Gaming

Pode ter componentes de modelagem de eventos discretos, contínuo e/ou Monte Carlo.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Algumas das classificações mais usuais de modelos são (PAGE, 1994; MCGINTY, 2001):

2.3.1 Estocástico / Determinístico

Modelo estocástico é baseado em uma ou mais variáveis que são aleatórias em natureza. Como resultado, o modelo produz saídas que são aleatórias, portanto fornece apenas uma estimativa do comportamento real do sistema. Várias execuções da simulação são necessárias e a composição da média dos resultados fornece uma estimativa da performance do sistema esperado.

Modelo determinístico não possui componentes aleatórios. Ações são sempre as mesmas e os resultados são idênticos para os mesmos dados de entrada. Os resultados são determinísticos e, portanto, fornecem uma medida exata da performance do sistema. Apenas uma única execução do sistema é requerida para obter o resultado.

2.3.2 Tempo Contínuo / Tempo Discreto

No modelo com tempo contínuo, o tempo é especificado para fluir continuamente, sendo que o relógio do modelo avança suavemente entre os números reais para cada aumento de valor.

No modelo com tempo discreto, o tempo flui em pulos, sendo que o relógio do modelo avança periodicamente, pulando de um tempo para o outro.

2.3.3 Estado Discreto / Estado Contínuo

No modelo de estado discreto, variáveis assumem um conjunto de variáveis discretas.

No modelo de estado contínuo, variáveis são representadas por números reais.

2.3.4 Tempo Invariante / Tempo Variante

No modelo de tempo invariante, as regras de interações são demonstradas inteiramente em termos dos valores que a variável descritiva pode assumir.

No modelo de tempo variante, o tempo pode ser explicitamente descrito como um argumento de regra de interação, o que pode assim parecer ser diferente em diferentes momentos.

2.4 TERMINOLOGIA DA SIMULAÇÃO

A Tabela 1 mostra alguns termos essenciais de simulação de eventos discretos juntamente com as suas definições (KIVIAT, 1967):

Tabela 1 – Lista de termos de simulação de eventos discretos

Termos	Definição
Agregação	Representa várias variáveis ou fatores por um fator combinado
Atividade	Uma função do sistema que normalmente requer tempo para ser completada e resulta em uma mudança de estado do sistema
Atributo	Uma característica de uma entidade, uma variável local para uma entidade individual
Avanço de tempo por evento	Um método de avanço onde o tempo é acrescido de um evento para o outro, o que pode acarretar em um aumento de unidades do tempo da simulação
Entidade	Qualquer item distinguível
Estado do sistema	Estado das variáveis do sistema em qualquer instante de tempo
Estrutura dinâmica	A estrutura de dependência do tempo do modelo, a regra que muda um sistema de um estado para outro
Evento	Um instante no tempo da simulação no qual uma mudança para um novo estado do sistema pode ocorrer. Uma atividade é sempre limitada por dois eventos: um começo e um fim da atividade
Medida de performance	Uma quantidade cujo valor pode ser usado para julgar quão bom está a performance do sistema
Número aleatório	Números, geralmente uniformemente distribuídos entre 0 e 1, que ocorrem de tal forma que são completamente imprevisíveis
Números pseudo - aleatório	Números produzidos por um método determinístico que em muitos aspectos respeita o comportamento aleatório dos números
Parâmetro	Um valor o qual, quando alterado, muda o dado de entrada para o sistema. Parâmetros são variáveis de controle do sistema
Premissa	Um fato ou afirmação considerado como certo
Regra de decisão	Uma regra que define uma metodologia de escolha de uma alternativa, baseada em valores ou fatores no tempo que a escolha é feita
Sistema dinâmico	Um sistema cujo estado muda com o tempo durante sua operação normal

2.5 MODELAGEM E SIMULAÇÃO

A expressão “modelagem e simulação” designa o complexo de atividades associados com a construção do modelo de um sistema real e simulação dele num computador. Em particular, modelagem trata principalmente com a relação entre o modelo e o sistema real, já a simulação refere-se, principalmente, na relação entre o modelo e o computador (ZEIGLER, 1976).

2.5.1 Princípios da Modelagem da Simulação

Os seguintes princípios foram estabelecido por (PRITSKER, 1998):

Princípio 1: Conceituar um modelo requer conhecimento do sistema, julgamento de engenharia e ferramenta de construção do modelo. Um modelador deve entender a estrutura e as regras operacionais do sistema, bem como, ser capaz de extrair a essência do sistema, sem incluir detalhes desnecessários. Modelos úteis tendem a ser facilmente entendíveis, ainda tendo detalhes suficientes para refletir realisticamente as características importantes do sistema. As perguntas cruciais na construção do modelo focam em quais premissas simplificadoras são razoáveis a fazer, quais componentes devem ser incluídos no modelo e quais interações ocorrem entre os componentes. A quantidade de detalhes no modelo deve ser baseada nos objetivos estabelecidos. Apenas estes componentes que podem causar significativa diferença nas tomadas de decisões necessitam ser considerados.

Princípio 2: Construção do modelo deve ser interativo e gráfico porque um modelo não é definido e desenvolvido, mas é continuamente refinado, atualizado, modificado e estendido. Um modelo atualizado fornece as bases para modelos futuros. Pontos necessários para construir um modelo reutilizável:

- Desenvolver procedimentos dos dados de entrada e interface do modelo;
- Dividir o modelo em relativos pequenos elementos lógicos;
- Separar elementos físicos e lógicos do modelo;
- Desenvolver e manter documentação clara diretamente no modelo;
- Deixar ganchos no modelo para inserir extensões ou maiores detalhes.

Princípio 3: O processo de modelagem é evolucionário, porque a arte de modelagem revela importantes informações pouco a pouco. Relações entre o sistema estudado e o modelo são continuamente definidas e refinadas. Simulações do sistema fornecem percepções do comportamento do modelo e consequentemente do sistema, levando a uma evolução do modelo. A correspondência resultante do modelo e o sistema estabelecem a simulação dinâmica como uma ferramenta de solução de problemas.

Princípio 4: O problema ou declaração do problema é o elemento controlador primário no modelo baseado em resolução de problemas. A declaração do modelo governa o propósito, o escopo e o detalhamento do modelo;

Princípio 5: Em modelagem combinando sistemas discreto e contínuo, o aspecto contínuo do problema precisa ser considerado primeiro;

Princípio 6: Um modelo necessita ser avaliado de acordo com suas utilidades;

Princípio 7: O propósito da modelagem da simulação é conhecimento e entendimento, não o modelo.

2.5.2 Estruturas Conceituais de Modelagem de Eventos Discretos

Muito cedo na formação da linguagem de programação da simulação foi notado a importância de uma perspectiva de modelagem, que pudesse ser implicitamente estabelecida para permitir a construção de uma linguagem de simulação. As diferenciações entre as visões do mundo, caracterizadas pela linguagem, são melhor capturadas usando o conceito de localidade. Há três básicas visões do mundo (NANCE, 1993):

1. **Programação de Eventos** fornece localidade de tempo: cada rotina de evento na especificação do modelo descreve ações relacionadas que podem todas ocorrer em um único instante;
2. **Leitura das Atividades** fornece localidade de estado: cada rotina de atividade na especificação do modelo, descreve todas as ações que necessitam ocorrer;

3. **Interações de Processos** fornece localidade de objetos: cada rotina de processo na especificação do modelo descreve todas as sequências de atividades de um objeto particular do modelo.

2.5.3 Descrição do Modelo Informal

Zeigler (1976) propôs o seguinte formato para descrever um modelo:

1. **Componentes.** Partes do qual o modelo é construído;
2. **Variáveis e Parâmetros Descritivos.** Ferramenta para descrever as condições dos componentes em pontos no tempo;
3. **Interação de Componentes.** Regras pelas quais os componentes exercem influência entre eles, alterando suas condições e, assim, determinando a evolução do comportamento do modelo ao longo do tempo;
4. **Premissas.**

2.5.4 Aspectos Conceituais de Modelagem e Simulação

Zeigler (1976) propôs que a estrutura básica de modelagem e simulação é composta dos seguintes elementos:

1. O sistema real;
2. A estrutura experimental;
3. O modelo base;
4. O modelo discreto;
5. O computador.

2.5.4.1 O Sistema Real: Comportamento

- O sistema real refere-se a uma fonte de informações de dados observáveis;
- A característica importante é a identificação do segmento de realidade e a distinção do resto, permitindo observação e outras medidas a serem feitas nele;
- Variáveis descritivas descrevem o sistema:
 - Variáveis observáveis: Variáveis do sistema que podem ser medidas diretamente;
 - Variáveis de entrada (Causas): Afeta o sistema de fora;

- Variáveis de saída (Efeitos): Assumem valores como um resultado dos valores assumidos nas variáveis de entrada;
 - Variáveis não observáveis: No presente, não podem ser medidas diretamente.
- O agrupamento de todas as variáveis de entrada é chamado segmento de entrada;
- O agrupamento de todas as variáveis de saída é chamado segmento de saída;
- O segmento de entrada e o segmento de saída, juntos, formam o par de segmentos de entrada-saída (I/O – input-output);
- A composição de todos os pares de segmentos de entrada-saída possíveis experimentais obtíveis é chamado de comportamento entrada-saída do sistema real. Isto constitui tudo que pode ser diretamente conhecido sobre o sistema real.

2.5.4.2 A Estrutura Experimental: Validez

- A estrutura experimental caracteriza um conjunto de limites de circunstâncias, em que o sistema real deve ser observado ou experimentado;
- Associado com uma estrutura experimental está um subconjunto de comportamento entrada-saída do sistema real;
- Um modelo é válido para uma estrutura experimental particular quando ele produz pares de entrada-saída que concordem, dentro de um padrão de comparação, com todos os pares de entrada-saída da estrutura;
- A validade do modelo é relativa a uma estrutura experimental e o critério pelo qual o acordo dos pares entrada-saída é aferido.

2.5.4.3 O Modelo Base: Explicação Completa Hipotética

- O modelo base é capaz de contabilização de todos os comportamentos de entrada-saída do sistema real;
- O modelo base é válido em todas as possíveis estruturas experimentais;

- Realisticamente, a descrição do modelo base nunca pode ser totalmente conhecido;
- É provável que a complexidade do modelo base seja extremamente grande;
- A estrutura do modelo base é, no máximo, parcialmente conhecida.

2.5.4.4 O Modelo Discreto: Simplificado

- Tendo especificado a estrutura experimental de interesse, um modelador é provável de achar possível construir um modelo relativamente simplificado, que será validado naquela estrutura. Tal modelo relativamente simples é chamado um modelo discreto;
- A estrutura do modelo discreto é completamente conhecido.

2.5.4.5 O Computador: Complexidade

- O computador gera os pares de entrada-saída do modelo discreto;
- A complexidade do modelo pode ser medida em termos de extensão dos recursos necessários para desenvolvimento e simulação, sendo que esta complexidade é normalmente relacionada as propriedades estruturais do modelo;
- Um modelo cuja complexidade excede os limites impostos pelo orçamento do projeto é inútil.

2.5.4.6 Os Cinco Elementos e suas inter-relações

Na Figura 9, os quadrados indicam estruturas do modelo, círculos indicam conjunto de comportamentos de entrada-saída e uma seta de A para B significa que o comportamento de A inclui o de B.

Figura 9 - Os cinco elementos (Fonte: MCGINTY, 2001, adaptado)

2.5.5 Procedimentos de Simplificação

Deduzir um modelo discreto por modificação de uma ou mais partes da descrição do modelo: componentes, variáveis descritivas, regras de interação de componentes. Algumas operações fundamentais para simplificação incluem os seguintes (MCGINTY, 2001):

1. Soltando um ou mais componentes, variáveis descritivas e/ou regras de interação:
 - a. Assumir que nem todos os fatores são igualmente importantes para determinar os resultados;
 - b. Quando é suficiente trabalhar com uma “aproximação de primeira ordem”.
2. Substituindo variáveis determinísticas por variáveis aleatórias;
3. Limite a variação das variáveis descritivas;
4. Agrupar componentes e variáveis agregadas.

2.5.6 Gerador de Números Aleatórios

Para simular eventos aleatórios é necessário a geração de números aleatórios. Estes números gerados pelo computador são criados em sequencias,

por fórmulas predeterminadas, que podem ser reproduzidas, o que viola o princípio básico da aleatoriedade (SANTOS, 1999).

Os números criados necessitam passar por uma série de testes estatísticos de aleatoriedade para serem considerados, de uma maneira prática, como realmente aleatórios. Devido a isto, os números criados são denominados de **pseudo-aleatórios**, entretanto em muitos casos, como neste estudo, eles são denominados como **aleatórios** (SANTOS, 1999).

Um gerador de números aleatórios deve possuir as três características a seguir (SANTOS, 1999):

1. **Aleatoriedade.** A sequência gerada deve possuir as propriedades aleatórias dos números verdadeiramente aleatórios, o que deve ser confirmado por testes estatísticos;
2. **Grande Período.** Como a série é gerada a partir de fórmulas predeterminadas e um valor inicial, chamado semente, em um determinado ponto o valor obtido pela fórmula é igual a semente, o que resultará em uma repetição da série;
3. **Eficiência Computacional.** Em alguns modelos é necessário gerar grande quantidade de números aleatórios e isto não deve ser oneroso para o processamento e memória do computador.

Alguns exemplos de métodos para geração de números aleatórios (SANTOS, 1999; ROSA; PEDRO, 2002):

1. Método dos Quadrados Médios;
2. Métodos Congruentes:

O Software Arena, usado para desenvolvimento do modelo estudado, possui internamente um gerador de números aleatórios que utiliza o método de Congruência Linear (MERRICK, 1998).

O Método de Congruência gera números por relação recursiva " $x_{n+1} = (ax_n + c) \bmod m$ ", onde " $z \bmod t$ " é o resto da divisão inteira de " z " por " t ". A constante " a " é chamada de multiplicador, a constante " c " é o incremento, " m " é o módulo e " x_0 " é a semente (SANTOS, 1999; ROSA; PEDRO, 2002; MERRICK, 1998).

O Software Arena utiliza as constantes $m = 2^{31} - 1$, $a = 7^5$, $c = 0$ e $x_0 = 10$ (MERRICK, 1998). Ao realizar a simulação no software Arena usando modelos idênticos, mesmo que o modelo possua variáveis aleatórias, resultará sempre em

saídas idênticas, pois a semente será igual. Ao termino de uma replicação, o ultimo valor aleatório gerado é usado como semente na próxima replicação, resultando assim em saídas diferentes entre as replicações.

Para garantir a aleatoriedade dos números gerados são necessários alguns testes estatísticos, entre eles (SANTOS, 1999; ROSA; PEDRO, 2002):

1. Uniformidade:
 - a. Teste do Qui-Quadrado;
 - b. Teste de Kolmogorov-Smirnov.
2. Aleatoriedade (Independência):
 - a. Teste do Intervalo;
 - b. Teste da Corrida.

2.6 SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Simulação prevê o comportamento do sistema por meio do cálculo do movimento e interação dos seus componentes. Através da avaliação do fluxo das entidades pelo sistema e pela análise das demandas conflitantes por recursos limitados, pode-se avaliar a performance do sistema (LAW; KELTON, 1991).

Normalmente, modelos são formulados conceitualmente baseados em fluxos de processos. Do fluxo de processo pode-se definir todas os estados possíveis do sistema. Uma vez que todos os estados são definidos, atividades podem ser construídas, as quais alterem o estado do sistema. Atividades são elementos consumidores de tempo no sistema, as quais tem um começo e fim, tais como um freguês sendo atendido num banco. Atividades são construídas escrevendo a lógica associada para o processo das mudanças de estado (LAW; KELTON, 1991).

Inicialmente, entidades são geradas no modelo para representar os objetos de interesse que fluem pelo sistema, como clientes ou peça. Nestas entidades são designados atributos, os quais descrevem suas características. Por exemplo, para uma peça pode ser designada uma sequência de atributos, que determinam seu fluxo particular pelo sistema (LAW; KELTON, 1991).

Entidades são programadas para submeter-se a atividades em tempos específicos. O tempo de começo e fim destas atividades (eventos) são colocados no calendário em ordem cronológica. Para retratar o estado do sistema dinamicamente, o tempo simulado é avançado de um evento para outro. À

medida que cada evento acontece, a lógica do evento associada é executada. Na ocorrência dos eventos, mostrados a seguir, o estado do sistema pode ser alterado (LAW; KELTON, 1991):

- Mudando o valor de uma ou mais variáveis;
- Mudando o número de entidades no sistema;
- Mudando os atributos de uma entidade;
- Mudando a correlação entre entidades.

A simulação contínua a rodar até que uma dos seguintes eventos ocorra:

- O período de tempo desejado é decorrido;
- O calendário de evento é esvaziado;
- Uma condição específica é realizada.

As entidades fluem pelo sistema, elas competem por recursos, são processadas, esperam em áreas de estoque, são transportadas e são submetida a várias outras atividades. A execução do modelo de simulação fornece um retrato dinâmico dos estados de um sistema sobre o tempo. Por isso, pode-se prever, por exemplo, a utilização de recursos, os tempos de ciclos, o nível de inventário, o nível de mão de obra, os custos ou qualquer outro número de medida de performance desejada (LAW; KELTON, 1991).

A capacidade de animação permite uma observação visual do sistema. Isto serve como uma ferramenta excelente de comunicação para discutir a dinâmica do sistema, fornecendo um crédito adicional ao modelo (MCGINTY, 2001).

2.6.1 Componentes de um Modelo de Simulação de Eventos Discretos

Os seguintes componentes são encontrados na maioria dos modelos de simulação de eventos discretos, usando a aproximação de avanço de tempo para o próximo evento (LAW; KELTON, 1991):

1. **Estado do sistema:** A compilação de estados variáveis necessários para descrever o sistema em um momento particular no tempo;
2. **Relógio da simulação:** Uma variável dando o valor atual do tempo da simulação;
3. **Lista de eventos:** Uma lista contendo o próximo tempo, quando cada tipo de evento irá ocorrer;
4. **Contadores Estatísticos:** Variáveis usadas para o armazenamento de informações estatísticas sobre a performance do sistema;

5. **Rotina de Inicialização:** Um subprograma para iniciar o modelo de simulação no tempo zero;
6. **Rotina de Tempo:** Um subprograma que determina o próximo evento da lista de eventos e, então, avança o relógio da simulação para o tempo quando o evento ocorrerá;
7. **Rotina de Eventos:** Um subprograma que atualiza o estado do sistema quando um tipo particular de evento ocorre (há uma rotina de evento para cada tipo de evento: 1. Atualização do estado do sistema, 2. Atualização dos Contadores Estatísticos e 3. Atualização da Lista de Eventos);
8. **Rotina de Biblioteca:** Um conjunto de subprogramas usado para gerar observações aleatórias de distribuição probabilística (variáveis aleatórias), as quais determinadas como parte do modelo de simulação;
9. **Gerador de Relatório:** Um subprograma que calcula estimativas de medidas de performance desejadas e produz um relatório quando a simulação termina;
10. **Programa principal:** Um subprograma que invoca a rotina de tempo para determinar o próximo evento e, então, transferir o controle para o rotina de evento correspondente para atualizar o estado do sistema de forma adequada.

2.6.2 Fluxo de Controle entre Componentes em um Modelo de Simulação de Eventos Discretos

A Figura 10, mostra o fluxo de controle entre componentes em um modelo de simulação de eventos discretos.

Figura 10 – Fluxo de controle entre componentes (Fonte: LAW; KELTON, 1991, adaptado)

2.6.3 Estados de uma entidade

As entidades migram de um estado para outro enquanto fluem pelo modelo. Uma entidade está sempre em uma destes cinco estados (SCHRIBER; BRUNNER, 2005):

- **Estado Ativo.** É o estado de movimentação da entidade. Apenas uma entidade move em qualquer instante. Esta entidade progride através das operações sem paradas, até encontrar um atraso. Ela então migra para um estado alternativo e alguma outra entidade torna-se a próxima entidade ativa, e assim por diante.
- **Estado Pronto.** Durante as fases do movimento da entidade pode ocorrer mais de uma entidade pronta para mover, e ainda assim, apenas uma entidade pode mover por vez. O Estado Pronto é o estado da entidade esperando para entrar no Estado Ativo durante ao fase de movimento da entidade.

- **Estado de Tempo de Atraso.** É o estado da entidade esperando por um tempo futuro de simulação conhecido ser atingido, para que possa mudar para o Estado Pronto.
- **Estado de Condição de Atraso.** É o estado da entidade que está esperando uma específica condição aparecer.
- **Estado Dormente.** Algumas vezes é desejável colocar a entidade em um estado do qual não terá mudança automática ativada por uma mudança nas condições do modelo.

3. METODOLOGIA

Uma das chaves para o sucesso de um estudo de simulação é seguir uma metodologia completa de uma forma organizada e bem administrada. Uma metodologia abrangente e disciplinada permite que modelos complexos sejam construídos rapidamente e com precisão para o máximo benefício. Devido à natureza iterativa da metodologia, esta não segue necessariamente a sequência listada abaixo, fazendo com que algumas atividades possam ser realizadas simultaneamente e/ou repetidas. A ideia inicial do fluxo do estudo de simulação é representada na Figura 11 (BALCI, 1990; MCGINTY, 2001; SHANNON, 1998; SADOWSKI, 1998).

Figura 11 - Fluxo da Metodologia da Simulação (Fonte: Autoria própria)

1. **Formulação do Problema.** Traduzir o problema comunicado em um problema formulado suficientemente bem definido, permitindo um estudo específico. Determinar o método adequado para empregar na solução do problema.
2. **Planejamento do Projeto.** Assumindo que a simulação é a ferramenta adequada para o trabalho, especificar as questões particulares para serem respondidas pela simulação do modelo. Estabelecer os limites do sistema e restrições. Identificar limitações com relação a tempo, dinheiro, e outros recursos necessários para realizar o estudo. Estabelecer expectativas do cliente.
3. **Definição do Sistema / Síntese do Sistema.** Entender o sistema a ser simulado. Compreender os princípios subjacentes ao seu comportamento. Avaliar como o sistema será comparado as expectativas teóricas. Delinear o sistema a ser estudado e especificar os critérios fundamentais para a comparação de projetos alternativos.
4. **Definição do Modelo (Descrição do Modelo Base).** Identificar os componentes, nos quais o modelo será construído, as variáveis descritivas usadas para descrever as condições destes componentes ao longo do tempo, bem como as regras que governam suas ações.
5. **Formulação do Modelo (Descrição Simplificada do Modelo).** Determinar quais simplificações podem ser adotadas e o nível requerido de detalhe, de forma a desenvolver um modelo conceitual que não simplifica o sistema a ponto de torná-lo trivial e nem carregá-lo demasiadamente com detalhes, de modo que torne-o dispendioso para construir e operar.
6. **Análise dos Dados de Entrada e Modelagem.** Identificar, coletar e preparar todos os elementos de dados a serem utilizados no modelo.
7. **Especificação Funcional do Modelo da Simulação.** Este documento define explicitamente o propósito e escopo do modelo da simulação, bem como a lógica operacional e parâmetros que formam sua base. Todas as partes devem concordar com esta especificação antes da programação.

8. **Tradução do Modelo.** Traduzir o modelo conceitual em um programa de computador.
9. **Verificação, Validação, e Testes.** Verificação é a garantia de que o modelo está funcionando como desejado e é feito em toda a atividade de programação. Validação assegura que o modelo realiza o que se propôs a fazer. Isso é importante para garantir que o modelo será válido. Testes asseguram que cada submodelo funciona corretamente, por si só e quando integrado com outros submodelos.
10. **Delineamento Experimental.** Experimentos de concepção de modo a produzir a informação desejada. Determinação de como cada teste será executado.
11. **Experimentação e Análise.** Geração de resultados de modo a deduzir as respostas para as quais o modelo foi construído. Aplicar técnicas estatísticas adequadas conforme requerido. Análise de sensibilidade deve ser realizada para os parâmetros críticos.
12. **Comunicação de Resultados.** Fornecer aos tomadores de decisão as informações necessárias, para que medidas sejam devidamente escolhidas no momento certo.
13. **Documentação.** Documentar cada fase do estudo: o programa computacional, o modelo, os dados de entrada e saída do modelo e os resultados.
14. **Implementação.** Colocar os resultados para produzir os benefícios esperados.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Quando um problema é reconhecido, um tomador de decisão inicia um estudo pela comunicação do problema para o analista. A comunicação do problema é raramente clara, específica ou organizada. Por isso, um estudo para formular o real problema geralmente se segue. Esta formulação é o processo no qual o problema inicialmente comunicado é traduzido para um problema formulado suficientemente bem definido, permitindo um estudo específico. Este processo pode continuar ao longo do ciclo de vida do modelo, quando mudanças

no contexto do problema são reconhecidas, em relação aos objetivos, restrições, alternativas e assim por diante.

Albert Einstein uma vez indicou que a formulação correta do problema é mais crucial do que sua solução. Em um estudo de simulação, a formulação do problema é absolutamente crucial uma vez que governa a formulação do modelo, afetando muito a credibilidade e aceitabilidade dos resultados do modelo. O que distingue a análise produtiva e útil é sua habilidade em formular o problema.

3.1.1 Abordagens para Formulação do Problema

Uma breve descrição de algumas abordagens são mostradas a seguir. Usualmente, uma mistura de todas as abordagens são requeridas para formular o problema real.

1. **Abordagem de lista de verificação (Fazer isso, depois isso, depois...).** A análise é guiada por meio de questões, com o intuito de ganhar todas as informações requeridas para identificar a causa do problema;
2. **Abordagem de definição (Quais são os parâmetros de decisão?).** Procedimento de obter uma lista de variáveis a partir da qual se construirá o modelo;
3. **Abordagem científica (O que realmente está acontecendo aqui?).** Observações são feitas para obter um entendimento claro do sistema;
4. **Abordagem pessoal (O que todos estão dizendo e por que?).** Processo de negociação de uma definição do problema, o qual seja mutuamente aceito pelos tomadores de decisão;
5. **Abordagem exploratória (Perguntas, Respostas, Reflexão, Perguntas,...).** Estruturar o problema pedaço por pedaço.

3.1.2 Solução Prescritiva e Descritiva

Toda decisão envolve elementos de dois gêneros: factual e valor. Elementos factuais são declarações sobre o mundo observável e o meio que ele opera. Pode-se testar estes elementos para determinar se são verdadeiros ou falsos. Elementos de valor são declarações éticas ou morais, cuja validade não pode ser testada.

Soluções prescritivas transmitem aos tomadores de decisão qual o curso de ações a serem tomadas em uma situação problemática, com um juízo de valor (a bondade ou maldade de tal curso da ação). Um exemplo de problema que requer uma solução prescritiva é: “Onde uma usina nuclear deve ser construída?”.

Soluções descritivas fornecem conhecimento para os tomadores de decisão sem um juízo de valor de tal conhecimento. Um exemplo de um problema que requer solução descritiva é: “Qual a utilização da ponte rolante sobre condições de operações estabelecidas?”.

3.1.3 Procedimentos para Formulação do Problema

Balci (2012) definiu os procedimentos conforme a seguir:

- Procedimento para Soluções Prescritivas:

1. Comunicar problema;
2. Justificar que tal problema vale a pena resolver;
3. Identificar as causas fundamentais do problema;
4. Postular um conjunto de alternativas de possíveis resultados;
5. Identificar os tomadores de decisão, que podem ser influenciados significativamente sobre a aceitabilidade do conjunto de possíveis resultados;
6. Determinar os objetivos relativos dos tomadores de decisão e os limitantes associados;
7. Identificar os tomadores de decisão que podem objetar ou contrariar a aceitação do conjunto de possíveis resultados;
8. Determinar quais objeções, reservas ou ações contra são susceptíveis a surgir dos tomadores de decisão e por que;
9. Determinar se mais alternativas devem ser postuladas;
10. Definir medidas de performance e funções objetivas as quais são aceitáveis pelos tomadores de decisão;
11. Identificar o tomador de decisão que irá certificar a credibilidade dos resultados e determinar seus requisitos.

- Procedimento para Soluções Descritivas:

1. Comunicar problema;
2. Justificar que tal problema vale a pena resolver;
3. Identificar causas fundamentais do problema;

4. Examinar o processo de tomada de decisão, no qual os resultados descritivos vão ajudar os tomadores de decisão;
5. Identificar os tomadores de decisão que serão auxiliados;
6. Identificar os elementos objetivos e subjetivos, que envolvem a decisão a ser tomada;
7. Identificar as variáveis controláveis e incontroláveis, as quais podem afetar a decisão a ser tomada;
8. Nomear os objetivos dos tomadores de decisão relativos à decisão ser tomada;
9. Definir medidas de performance dos valores, as quais auxiliam os tomadores de decisão.

3.1.4 Medição do Problema Formulado

Os seguintes indicadores são sugeridos pelo Balci (2012) para medir a probabilidade de formulação do problema errado:

1. Pessoas personalizam problemas;
2. Informações mostrando que o problema existe não são revelados;
3. O contexto do problema é muito complexo para o analista compreender;
4. A raiz do problema surge em certos contextos nos quais as pessoas não tem experiência;
5. Causa e efeito não são intimamente relacionados com o contexto do problema;
6. O analista não consegue distinguir entre fatos e opiniões;
7. O analista pode ser extraviado deliberadamente ou acidentalmente;
8. O nível de abstração do contexto do problema é insuficientemente detalhado;
9. Os limites do problema são insuficientes para incluir o problema inteiro;
10. Padrões ou definições inadequados das condições exigentes desejadas;
11. A raiz da causa é dependente do tempo;
12. Informações inválidas são usadas;
13. Uma causa raiz é feita pela ênfase de outras causas;
14. Dados inválidos são usados;
15. Premissas podem esconder causas raízes;

16. Pessoas receosas de mudança podem apresentar resistência;
17. O problema é formulado sobre a influência de uma solução técnica;
18. Os objetivos reais são escondidos acidentalmente, inconscientemente ou deliberadamente;
19. Causa raiz surge em outro sistema ou estrutura indefinida;
20. O problema formulado está desatualizado.

3.1.5 Metodologias de resolução de problemas

Simulação pode não ser a melhor ferramenta para resolução de problemas formulados, é necessário que seja feita uma investigação das alternativas possíveis e seleção da ferramenta para que o trabalho seja feito dentro dos meios do projeto.

3.2 PLANEJAMENTO DO PROJETO

Um estudo adequado é regido pelo seu propósito. Diversos aspectos, como estabelecer as bases para o estudo, são descritos a seguir, de modo que o gerente do projeto possa falar ao seu cliente exatamente o que pode e não pode ser esperado da conclusão dos trabalhos.

3.2.1 Propósito do Modelo

Definir o propósito do modelo de simulação e as questões chaves a serem respondidas por ele. Isto é crítico porque o modelo é construído em torno destas questões. Um modelo pode ser construído para:

- **Avaliar** um projeto proposto;
- **Comparar** projetos propostos e práticas operacionais;
- **Predizer** medidas de performance;
- **Determinar fatores significativos** que afetam a performance geral;
- **Achar a combinação de fatores** que produzem a melhor performance;
- **Descobrir gargalos** e opções para aumentar a capacidade;
- **Estabelecer relações** entre fatores significantes;
- **Desenvolver** estratégias de operação;
- **Transmitir** o comportamento dinâmico do sistema pela animação;

Em geral, modelos de operações de produção são construídos como auxiliares de três fins diferentes: (1) planejamento, (2) implementação e (3) controle. Pela necessidade, modelos usados com o propósito de desenvolver e avaliar estratégias de controle são os mais detalhados dos três tipos de modelos. Neste nível de modelagem, é normalmente necessário incluir aspectos do problema em tempo real.

Quando deseja-se obter muitas respostas, o modelo pode se tornar muito pesado. Geralmente, estes modelos são difíceis de construir, validar e usar. Como em outras aplicações computacionais, o esforço para construir e validar um modelo cresce exponencialmente com os requisitos.

Questões a serem respondidas pelo modelo necessitam ser indicadas especificamente e relacionadas com o propósito do projeto. Exemplo de questões a serem respondidas incluem:

- O projeto é capaz de atingir a produção requerida?
- Quanto irá custar para operar como planejado?
- Qual a mínima mão de obra requerida?
- Qual o ciclo mínimo de tempo médio?
- Quais equipamentos trabalham fora da capacidade? Quando?
- Será necessário executar horas extras? Com que frequência?
- Quanto de espaço de estocagem é necessário?
- O que acontece com a capacidade se alterar a gama de produtos?
- Onde estão os gargalos?

3.2.2 Escopo do Modelo

Quanto mais complexo e estruturado o modelo se torna, menos capaz ele é de responder novas e inesperadas perguntas. Modelos altamente estruturados são usados para responder perguntas cuidadosamente formuladas. Modelos com conteúdo empírico baixo são capazes de responder classes mais amplas de questões, mas com menos certeza. O escopo deve finalmente ser determinado pelo propósito do modelo, sendo que ele se relaciona com o comportamento de interesse de um certo segmento do sistema real, então o que está e não está no modelo deve ser claramente identificado.

Simulação, por si só, não soluciona o problema. O usuário deve iterativamente definir, simular e analisar até chegar numa solução. Portanto, as

condições que constituem testes suficientes, experimentação e análise deve ser claramente indicadas. Caso contrário poder-se-ia literalmente ficar avaliando questões “e-se?” (what-if) para sempre. Também, identificar quais questões não são respondidas pelo modelo e identificar os parâmetros chaves que serão usados nas análises “e-se?” (what-if).

Na maioria dos projetos de simulação bem sucedidos, quando o projeto termina, ele realmente não acaba. Questões de análise adicionais são normalmente criadas no final do projeto, quando o modelo foi bem utilizado. Alguma menção de apoio contínuo deve sempre ser feita.

3.2.3 Detalhes do Modelo

Uma vez que o valor do modelo reside na forma como pode ser utilizado, os detalhes são necessários apenas na medida que contribuem para a precisão das previsões do modelo ou estimativas sem limitar a variedade de perguntas que podem ser feitas. Um modelo geral e agregativo pode ter mais valor do que um detalhado e altamente parametrizado, se o modelo é planejado para explorar possibilidade e não determinar características operacionais do sistema. Valor deve ser colocado sobre a utilidade das respostas e não nas características inerentes do modelo (KIVIAT, 1967).

Mais frequentemente, modelos de simulação são usados como dispositivos para explicar e prever. Fornecendo um conjunto de condições de entrada, um modelo é usado para prever resultados e descrever o caminho pelo qual eles foram determinados, isto é, o pesquisador está preocupado com a resposta e dinamismo do sistema. Normalmente, devido a falta de conhecimento exato do problema, no início de um projeto, tende-se a detalhar desnecessariamente o modelo. De maneira geral, isto é incorreto. Um modelo só deve ser detalhado quanto necessário para responder as questões em mãos. Ele deve ser projetado, entretanto, para permitir que possa ser expandido e incluir mais detalhes sem custo excessivo naquelas áreas do modelo, as quais tem grande probabilidade de se tornarem assuntos de preocupação subsequente (KIVIAT, 1967).

3.2.4 Premissas do Modelo

Premissas são feitas para simplificar o sistema, limitar o escopo e detalhe do modelo. É importante que sejam claramente indicadas para que os tomadores

de decisão entendam em qual contexto os resultados serão apresentados para eles.

3.2.5 Incerteza

Incertezas estruturais surgem do conhecimento impreciso das funções do sistema e dos erros comuns de correlação e causalidade. Qualquer modelo que é previsto, numa determinada estrutura que se chegou através de observação, em vez de teoria, corre o risco de fazer previsões que devem ser qualificadas por “se o sistema realmente funciona desta forma, então...”. **Aceitar uma estrutura incerta é equivalente a fazer uma suposição e, como em todas as suposições, limitar o escopo e utilidade do modelo.**

Incertezas, nos resultados da simulação, causadas pelos elementos de dados são devidas a dificuldade na estimativa de parâmetros, na seleção da distribuição estatística correta e geração de amostras verdadeiramente aleatórias. Dois tipos de incertezas existem: incerteza causado pelos erros dos dados de entrada (estimativa) e incerteza devido a natureza estatística do modelo de simulação (aleatoriedade).

Um tomador de decisão está preocupado com a confiança que pode ser colocada nos resultados de um modelo. Para isso, pode-se reduzir a incerteza do modelo, melhorando sua estrutura, isto é, aperfeiçoando os mecanismos que o compõe, e/ou reduzir a incerteza dos dados de entrada, através da estimativa de parâmetros de um grande conjunto de observações. É dispendioso descobrir os valores dos dados e, geralmente, custa mais ainda aumentar o grau de confiança destes. A questão é: Como chegar a um modelo que tenha máxima utilidade e mínima incerteza ao menor custo?

3.2.6 Equipe do Projeto

Participação ativa, ao longo de toda a vida do estudo, da gestão do cliente e especialistas na definição dos processos, definições dos dados de entrada, validação, experimentação e análise é crucial para o sucesso do projeto. Clientes devem ser continuamente envolvidos pelas seguintes razões:

1. O cliente precisa ser o dono do problema de modo que seja resolvido de forma adequada e efetivamente aplicado;
2. Isto aumenta a credibilidade do modelo;

3. É mais rentável ter o cliente realizando determinadas tarefas. Identificar claramente quais as tarefas o cliente espera executar, por exemplo:
 - a. Coleta de dados;
 - b. Layout do sistema;
 - c. Experimentação e análise;
 - d. Validação
 - e. Escrever o relatório final;
 - f. Apresentar os resultados finais.

Quanto mais o cliente é envolvido no projeto, melhor o projeto é realizado e o cliente satisfeito. O ponto chave é ter o tomador de decisão principal e seus representativos envolvidos ao longo do estudo, para que o resultado final seja feito propriamente para o uso.

3.2.7 Limitações do Projeto

Identificar as restrições que limitam os esforços de construção do modelo:

1. Tempo:
 - a. Para desenvolver o modelo;
 - b. Para programar o modelo;
 - c. Para experimentar com o modelo e analisar os resultados;
 - d. Para viagens; reuniões; apresentações, planejamento; etc.
2. Verba;
3. Pessoal;
4. Hardware;
5. Software.

Em certos casos, o tempo para conclusão do projeto pode deliberar os estudos para utilização de determinado software, e em outros, a verba pode deliberar para outro software. Não há o software certo a ser utilizado, apenas o mais adequado naquele momento para aquele projeto. (CREMONESE; LIVORATTI, 2012).

3.2.8 Saídas do Modelo

Geralmente as saídas da simulação são:

1. Níveis de inventário médio e máximo;
2. Utilização dos equipamentos;

3. Filas.

3.2.9 Estrutura Analítica do Projeto

É importante que os modeladores inexperientes entendam que quanto mais se espera para começar a tradução do modelo conceitual, em um programa computacional, mais rápido o modelo e o projeto serão completados, assumindo que gaste-se o tempo entendendo o problema, projetando o modelo e desenvolvendo os experimentos para executar. Cientistas da computação desenvolveram métodos de projetar e gerenciar o desenvolvimento de software rapidamente e minimizando os erros. Uma das ideias principais que surgiram é a regra 40-20-40, que basicamente diz que apenas 20% do projeto deve ser devotado na tradução do modelo, estando as outras etapas representadas na Figura 12 (SHANNON, 1992):

Figura 12 - Estrutura Analítica do Projeto (Fonte: Autoria própria)

3.2.10 Causas de Atrasos e Projetos Pobres

Muitos projetos de software deram mais errado por falta tempo do que por todas as outras causas combinadas. Entre os motivos estão (BROOKS, 1975):

- Assumir que tudo ocorrerá bem, isto é, que cada tarefa irá levar o tempo que “deveria” ter;
- Esforço é confundido com progresso;
- Estimativas de cronograma original não são defendidas contra a pressão da gerência e clientes;
- Progresso agendado é pouco monitorado;

- Adicionar pessoa para o projeto, depois de começado, aumenta os esforços necessários totais de três modos: O trabalho e interrupção da repartição, o treinamento da nova pessoa e o acréscimo de intercomunicação;
- Mudanças requeridas pelo cliente não são refletidas em mudanças do cronograma.

Algumas das razões de um projeto tornar-se pobre são (MCGINTY, 2001; ANNINO; RUSSELL, 1979):

- Objetivos incertos;
- Nível inapropriado de detalhes do modelo;
- Falha na comunicação com gerente/cliente numa base regular durante o curso do estudo de simulação;
- Falha em ter pessoas com habilidades no time de modelagem;
- Usar a linguagem computacional errada;
- Falta de documentação do modelo;
- Usar um modelo não verificado para obter resultados;
- Usar distribuições aleatória de entrada;
- Realizar apenas uma execução de simulação por alternativa;
- Esperar até que informações completamente precisas estejam disponíveis antes de começar o modelo;
- Basear o modelo em premissas e palpites errôneos;
- Basear decisões em médias estatísticas, quando a saída é cíclica;
- Incapacidade de provar razões sobre os resultados;
- Resultados tardios, reduzindo ou eliminando potenciais ganhos.

3.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA / SÍNTESE DO SISTEMA

Para modelar um sistema adequadamente, este deve ser devidamente compreendido. Um modelador precisa saber os componentes chaves do sistema e como eles interagem entre si. Uma vez que muitos sistemas são muito complexos, o modelador deve recorrer a ajuda de especialistas para entender os pequenos detalhes e seus significados. Quando um sistema não é bem definido ou entendido, é difícil construir modelos precisos que sejam úteis. Informações básicas a serem definidas incluem:

- Gama de produtos;
- Rotas de produtos;
- Procedimentos de operação padrão;
- Práticas de manutenção;
- Custo e consumo de operação;
- Componentes do sistema;
- Interação dos componentes;
- Lógica de controle;
- Regra de seleção de recursos;
- Prioridades;
- Regras de expedição de trabalho;
- Lógica de anomalias;
- Mecanismo de tempos;
- Algoritmo de sequência e sincronização.

Cálculos básicos devem ser feitos para estimar itens como utilização de recurso, produção e tempos de ciclos. Estas estimativas serão comparadas com as saídas da simulação para testar a razoabilidade do modelo.

Projetos de sistemas a serem estudados devem ser formulados e delineados, sendo que os critérios chaves de comparação devem ser especificados.

3.4 DEFINIÇÃO DO MODELO (DESCRIÇÃO DO MODELO BASE)

O modelo base é um modelo capaz de explicar todos os comportamentos do sistema real. Na prática, a descrição do modelo base nunca pode ser completamente conhecida. A seguir mostra-se a forma como se deve descrevê-lo.

3.4.1 Estrutura estática do sistema

A estrutura estática do sistema dissectiona os objetos deste em suas partes componentes:

1. Componentes do sistema:
 - a. Entidades, juntamente com os principais atributos;
 - b. Recursos.
2. Variáveis descritivas descrevendo o sistema:
 - a. Variáveis observáveis;

- b. Variáveis de entrada (causas);
- c. Variáveis de saída (efeitos);
- d. Variáveis não observáveis.

3. Premissas.

Em geral, os componentes do sistema convergem entrada em saída. Eles são de três tipos diferentes, os quais constituem os blocos de construção básico do sistema:

1. **Elementos de transformação**, onde uma ou mais entradas são operadas de alguma forma prescrita e transformada em uma ou mais saídas;
2. **Elementos de classificação**, onde uma ou mais entradas são separadas ou ordenadas em dois ou mais saídas diferentes;
3. **Elementos de feedback**, onde a entrada é modificada de alguma maneira em função da saída.

3.4.2 Estrutura dinâmica do sistema

A estrutura dinâmica do sistema descreve o caminho que as componentes do sistema agem e interagem no desempenho de suas funções designadas. Dependendo do propósito do modelo, pode-se estar interessado na natureza específica de operação do componente ou apenas na quantidade de tempo que um componente leva para realizar uma operação. O processo de conversão pode ser determinístico (única saída determinada para uma dada entrada) ou estocástica (incerteza de saída para uma dada entrada). Se a natureza do processo é completamente desconhecida ou muito pouco entendida, ela será descrita como uma caixa preta.

A maneira, na qual procede-se para identificar a estrutura ou natureza da conversão do processo para cada componente, depende sobre o grau de conhecimento a priori. Algumas abordagens são normalmente usadas, como se descreve a seguir:

1. A estrutura do sistema é suficientemente bem entendida ou é muito simples e transparente que pode ser entendida por inspeção e/ou discussão com os projetistas ou operadores do sistema;
2. A estrutura é análoga a alguma descrição existente;

3. A estrutura pode ser extraída por análise estática. Um conhecimento sobre quais variáveis têm papel importante é geralmente necessário.
4. Experimentação para observar os efeitos do sistema.

Escolhas do modelo são feitas com base em:

1. **Equações:** O uso de relações analíticas são desejadas, como o cálculo do tempo de viagem baseado na distância e velocidade. Regras analíticas sempre aceleram o tempo de execução do computado;
2. **Regras de lógica:** Frequentemente, equações analíticas podem ser reduzidas para árvores de decisão ou séries de expressões sim ou não;
3. **Probabilidade:** Fatos são normalmente conhecidos por uma variação de valores, não um valor único.

Exemplo de alguns tipos de requisitos de lógicas, regras e equações incluem:

1. Roteamentos de processo;
2. Regras de seleção de recursos;
3. Regras de seleção de filas;
4. Regras de despacho de serviço;
5. Regras de seleção de transportes;
6. Disparadores de eventos;
7. Lógica de decisão de tempo real;
8. Lógica de controle;
9. Regras de programação de recursos;
10. Procedimentos de operação padrão;
11. Repostas para eventos anormais;
12. Sincronização de sequência de tempos.

3.5 FORMULAÇÃO DO MODELO (DESCRIÇÃO SIMPLIFICADA DO MODELO)

Formulação do modelo é o processo pelo qual um modelo conceitual é previsto para representar o sistema sobre estudo. Um modelo conceitual é o modelo que é formulado na cabeça do modelador. Formulação do modelo e representação do modelo constituem o processo de projetá-lo.

A essência da arte de modelar é abstração e simplificação. Pretende-se projetar um modelo do sistema que não seja muito simplificado a ponto do modelo

tornar-se trivial, nem que tenha tanto detalhe a ponto de se tornar dispendioso de construir e rodar. A tendência de modeladores inexperientes é tentar incluir muitos detalhes, e em muitos sistemas o comportamento deste pode ser descrito por poucos componentes chaves.

Documentos formais devem ser usados para comunicar o modelo conceitual. Somente quando se escreve que as lacunas aparecem e as inconsistências sobressaem. O ato de escrever acaba por requerer centenas de mini decisões, e é a existência destas que distinguem claramente as lógicas exatas das distorcidas.

Uma vez que o modelo conceitual está completo, uma revisão geral deve ser feita com toda a equipe. A próxima fase do projeto não deve continuar até que o modelo conceitual esteja de acordo de todos os envolvidos, para prevenir premissas erradas de entrar no modelo e evitando potenciais retrabalhos.

O modelo deve ser:

1. Objetivamente orientado para responder questões específicas, como apresentadas na definição dos problemas;
2. Facilmente compreendido por todos os membros da equipe;
3. Completo em questões importantes;
4. Livre de detalhes desnecessários:
 - a. Identificar elementos que não precisam ser modelados;
 - b. Fazer simplificações, quando possível;
 - c. Agregar ou combinar componentes e variáveis nos estágios preliminares com a ideia de separá-los posteriormente, se necessário.
5. Flexível e fácil de modificar para responder as novas perguntas que possam surgir;
6. Eficiente;
7. Tão simples quanto possível.

3.6 ANÁLISE DOS DADOS DE ENTRADA E MODELAGEM

Os dados não só determinam a precisão do modelo, mas também sua presença e ausência determinam a estrutura do modelo. Antes de um modelo de simulação ser completado, todos os elementos de dados usados nele devem ser examinados para determinar sua disponibilidade e qualidade.

Como mostrado por Cremonese e Tomi (2012), diversas, mas pequenas, ações concomitantes em um sistema, podem alcançar mudanças na produção acima de 50%, por isso os dados de entrada precisam ser extremamente examinados.

3.6.1 Coleta de dados e preparação

Os seguintes recursos são necessários para obter os dados necessários:

1. Especialistas do sistema;
2. Especificações de projeto;
3. Banco de dados;
4. Relatórios de produção;
5. Estudos de tempos.

Após a coleta, os dados devem ser revisados para garantir qualidade dos dados de entrada do modelo, mantendo em mente o contexto nos quais eles foram coletados, removendo discrepâncias e estabelecendo a forma adequada para análise.

3.6.2 Modelos auto-orientado e traço-orientado

Modelos de simulação são classificados por auto-orientado e traço-orientado. Um modelo de simulação **auto-orientado** é um que seja orientado pelos valores de dados de entradas obtidos através de amostragem de distribuições probabilísticas usando números aleatórios. Um modelo de simulação **traço-orientado** é orientado pelas sequências de dados de entrada derivados de dados de rastreamento obtidos através de medição do sistema real.

3.6.3 Técnicas na ausência de dados

Algumas vezes, devido a carência de informação, não se pode caracterizar uma variável ou parâmetro de entrada. Neste caso pode se utilizar um procedimento heurístico, como os usados em distribuições triangulares ou beta, ou o processo de calibração.

Calibração é um processo iterativo no qual uma caracterização probabilística para uma variável de entrada ou um valor fixo de um parâmetro é experimentado até o modelo ser considerado suficientemente válido.

Para resultados probabilísticos, um valor de amostra é feita por sorteio de uma distribuição contínua e uniforme entre 0 e 1. O valor da amostra retirada determina o resultado da decisão.

3.6.4 Escolhendo uma Densidade de Probabilidade Apropriada

1. Software estatísticos podem ser usados para ajustar automaticamente uma distribuição teórica para os dados;
2. A densidade Normal deve ser evitada, se o seu desvio padrão, relativo ao valor médio, é grande o suficiente a ponto de implicar ocasionais durações menores que zero;
3. A densidade Exponencial deve ser evitada, se a média da amostra e o desvio padrão são marcadamente desiguais, e a moda da amostra é bem removida da amostra mínima;
4. A densidade uniforme ou beta deve ser evitada, se nenhum limite superior para durações é aparente, porque estas densidades são diferente de zero ao longo de intervalos finitos.

3.6.5 Dados típicos necessários para as operações de produção

1. Gama de produtos;
2. Características dos produtos:
 - a. Rotas;
 - b. Rendimentos;
 - c. Pesos;
 - d. Tamanhos.
3. Tempos de disponibilidade operacional:
 - a. Turnos por semana;
 - b. Períodos programados de manutenção;
 - c. Períodos de troca de turnos, pausas, etc.
4. Taxa de produção e tempo de processamento;
5. Programação de produção:
 - a. Como e quando cada parte chega a cada localização;
 - b. Taxa que cada parte entra no sistema;
 - c. Tamanho dos lotes.
6. Paradas:

- a. Falhas de equipamentos não programadas:
 - i. Tempo médio de reparo (TMDR ou do inglês “Mean time to repair - MTTR”);
 - ii. Tempo médio entre falhas (TMEF ou do inglês “Mean time between failures – MTBF”).
- b. Paradas planejadas para manutenção:
 - i. Troca de partes consumíveis, como lâminas, rolos, etc.
- c. Paradas totais por ano;

3.7 ESPECIFICAÇÃO FUNCIONAL DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Antes da modelagem propriamente dita é necessário que todas as informações compreendidas pelo sistema, incluindo dados de entradas, premissas, lógicas operacionais, etc., entendidas pela equipe do projeto estejam de acordo com as expectativas e informações dos tomadores de decisão.

Este documento define explicitamente o propósito e escopo do modelo da simulação, bem como a lógica operacional e parâmetros que formam sua base. Todas as partes devem concordar com esta especificação antes da programação (Tradução do Modelo).

Alguns dos itens presentes na especificação são:

- Finalidade e Aplicação do Modelo (Configuração do Caso Base, Questões principais a serem obtidas pelo modelo, análises de sensibilidade a serem feitas, limites do modelo, principais premissas e simplificações e exclusões do modelo);
- Planejamento e Programação de Produção (Mix de Produtos, Planejamentos de produção, programação, disponibilidades operacionais, filosofia geral de operação e sincronização de manutenção planejada);
- Lógica dos Submodelos;
- Saídas do Modelo e Análise (Parâmetros de Controle da Simulação, duração da simulação, número de replicações, condições iniciais e saídas do modelo).

3.8 TRADUÇÃO DO MODELO

Tradução do modelo conceitual em um modelo programado constitui o processo de programação. Um modelo programado é uma representação de modelo de simulação executável em uma linguagem de programação de simulação ou linguagem de programação de alto nível.

A maioria das simulações na indústria não é escrita por desenvolvedores de software habilitados. Há boas razões para isso: o escritor da simulação deve entender o problema, suas características e as preocupações de gestão que levaram à exigência da simulação. Entretanto, escritores de simulação sem treinamento de software são mal equipados para desenvolver o código da simulação, que seja fácil de projetar, depurar, verificar, manter e explicar. Algumas técnicas de engenharia de software são descritas a seguir e podem ser aplicadas aos programas de simulação de uma maneira prática, para melhorar a qualidade e a produtividade do desenvolvimento da simulação.

Um bom modelo é completamente flexível, podendo ser ajustado com novos parâmetros de tempos em tempos, baseado na realidade do momento, produzindo resultados atualizados para um novo ciclo de planejamento (SARMAD et al., 2010).

3.8.1 Características de programação desejada

Os seguintes passos devem ser realizados no ocorrer da tradução do modelo conceitual para o código computacional:

1. Capturar o fluxo e lógica dos sistema;
2. Separar os elementos físicos e lógicos do modelo;
3. Dividir o modelo em relativos pequenos elementos lógicos;
4. Dividir em fases os detalhes do modelo, conforme necessário;
5. Permitir flexibilidade do modelo;
6. Não colocar valores no código fonte;
7. Ter a possibilidade de desligar e ligar seções do código;
8. Desenvolver tabela de dados de entrada e procedimento.

3.8.2 Engenharia de Software aplicada em simulações de eventos discretos

McKay (1986) oferece as seguintes sugestões:

- Orientação para programação de simulação e sistema:
 - Projetar das perspectivas de entidades ou objetos fluindo ao longo do sistema a ser modelado ou desenvolvido;
 - Identificar o que acontece quando a entidade flui pelo sistema e as informações de controle necessárias usadas para decidir o fluxo;
 - Identificar claramente os limites entre onde as coisas acontecem e não acontecem no modelo;
 - Garantir que uma clara interface e protocolo exista, para não atravessar nenhuma barreira e, que esta interface, não faça premissas sobre nenhuma área;
 - Tentar padronizar e normatizar os tipos de áreas no modelo, para que o número de lógicas únicas seja minimizado.
- Padrões de codificação:
 - Código deve ser modular ou caixa preta, e refletir a arquitetura;
 - Código deve ser orientado pelos dados de tabelas e não fisicamente ligados;
 - Módulos não podem fazer suposições sobre módulos anteriores e posteriores;
 - Módulos devem ter uma saída e uma entrada;
 - Prefixos usados com rótulos e variáveis para identificar prontamente os módulos, dados, etc;
 - Comentários em todas as operações não triviais;
 - Exceções e códigos chaves devem ser destacados;
 - Recuo e alinhamento para fornecer dicas visuais;
 - Variáveis devem servir para um propósito e ter um significado.
- Erros comuns de programação:
 - A síndrome off-by-one, que é o erro envolvendo o equivalente discreto de uma condição limitante. Ela pode ocorrer de duas formas:
 - O método de índice pode ser originado em zero ou um, e nem todos os lugares no código contam com isso;

- Uma condição “menor” deveria ter sido uma condição “menor igual”.
- Algoritmos de índice podem não ser precisos:
 - Vetores podem não ter sido atribuídos corretamente;
 - Atributos de índice errados.
- Lógica iterativa não está em loop;
- Relações podem estar desconectadas;
- Lógica de erros e falhas não funcionam;
- Detritos de valores antigos podem contaminar o sistema;
- Condições iniciais entre rodadas;
- Entidades destruídas em lugares errados;
- Travamentos.

3.8.3 Orientações para detectar erros

- Executar o código um passo por vez;
- Verificar o comportamento do modelo fora dos limites externos;
- Colocar valor único nos dados de entrada e verificar os valores durante sua leitura quando inseridos no modelo;
- Executar loops para um número específico de tempo;
- Forçar todos os códigos de erros a serem ativados;
- Testar resultados para entradas determinísticas;
- Testar fluxo de uma entidade por vez;
- Olhar variáveis na inicialização.

3.8.4 Animação

Animação fornece um meio efetivo de comunicar a dinâmica de um sistema. Os elementos chaves de uma animação são:

- Interatividade:
 - Boa interação com o usuário;
 - Habilidade de mudar vistas rapidamente e ajustar velocidades;
 - Habilidade de visualização de atributos e estatísticas de entidades.
- Realismo:

- Animação deve ser realista para garantir credibilidade do modelo;
 - Entidades devem mover suavemente na tela e ser claramente visíveis.
- Performance:
 - A animação deve ser rápida, não lenta.
- Flexibilidade:
 - Usuário deve ter controle sobre o que é mostrado.
- Fácil de usar:
 - Fácil de adicionar gráficos.

3.9 VERIFICAÇÃO, VALIDAÇÃO, E TESTES

3.9.1 Validação

Validação é o processo de certificar que o modelo, dentro dos seus domínios de aplicabilidade e coerência com os objetivos do estudo, representa suficientemente o sistema verdadeiro. Há graus de força para esta validação. Um modelo é **validado replicativamente** se ele corresponde a dados já adquiridos do sistema real. Mais forte do que esta é a condição na qual o modelo é **validado preditivamente**, isto é, quando ele pode combinar dados antes que os dados sejam adquiridos do sistema verdadeiro. O terceiro nível mais forte de validação, refere-se à relação entre a estrutura do modelo e o trabalho interno do sistema real. Um modelo é **estruturalmente validado** se ele não reproduz o comportamento do sistema real, mas realmente reflete o modo no qual o sistema real opera para produzir este comportamento.

Passos a tomar para assegurar uma representação adequada:

1. Estabelecer que os dados de saída da simulação sejam parecidos com os dados de saída do que seria esperado do sistema real ou proposto;
2. Interações regulares com o cliente ao longo do estudo;
3. Percorrer a estrutura do modelo conceitual com o cliente antes da modelagem;
4. Interagir com especialistas do processo;
5. Observar o sistema e/ou similares;
6. Simular o sistema existente antes de fazer mudanças nele;

7. Uma vez que um modelo de simulação é, normalmente, exercido com modificações que não existem no sistema real, é importante que uma referência da consistência seja estabelecida quando possível para fornecer confiança para extrapolações.

A validação deve ser conduzida ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

3.9.2 Verificação

Verificação é o processo de certificar que o modelo, dentro dos seus domínios de aplicabilidade e coerência com os objetivos do estudo, roda como planejado.

Passos a tomar para assegurar a execução adequada:

1. Construir o modelo em seções (módulos) e testar cada módulo independentemente do modelo total;
2. Conferir a razoabilidade dos resultados;
3. Rodar o modelo para saídas conhecidas e conferir os resultados;
4. Rodar o modelo usando uma variedade de dados de entrada e conferir pelos resultados esperados;
5. Utilizar a capacidade de animação para verificar o fluxo do produto;
6. Ter mais de uma pessoa revisando o código, se possível;
7. Revisar linha por linha a execução da simulação.

A verificação deve ser conduzida ao longo de todo o ciclo de vida do projeto.

3.9.3 Testes

O processo de revelar a existência de erros do modelo é chamado de **Testes** do modelo. Há cinco níveis de testes durante o ciclo de vida do modelo:

- Nível 1 – **Testes Privados**, feito pelo modelador, sendo testes informais de vários aspectos do modelo;
- Nível 2 – **Testes de Submodelo**, feito pelo modelador, para garantir a credibilidade de cada submodelo;
- Nível 3 – **Testes de integração**, feito pela equipe do projeto, para comprovar que não há inconsistências na interface e comunicação entre as saídas dos submodelos quando estes são combinados para formar o

modelo. É assumido que cada submodelo passou no teste de submodelo;

- **Nível 4 – Testes do Modelo**, feito pela equipe do projeto, sendo para avaliar a validade do comportamento do modelo global;
- **Nível 5 – Testes de aceitação**, feito pelo cliente, para estabelecer credibilidade suficiente.

3.9.4 Princípios

Balci (1998) estabeleceu os seguintes princípios de validação, verificação e testes (VVT):

Princípio 1: VVT deve ser realizado durante todo o ciclo de vida do estudo de simulação. Isto é para evitar vários problemas que sejam indetectáveis antes que seja tarde demais para fazer algo a respeito.

Princípio 2: Um modelo não pode ser julgado como absolutamente correto ou errado. Como um modelo é uma abstração de um sistema, representações perfeitas não podem ser esperadas.

Princípio 3: Um modelo é construído com respeito aos objetivos do estudo e sua credibilidade é julgada com respeito a estes objetivos. Daí o termo “validado suficientemente” é usado para descrever um modelo validado.

Princípio 4: VVT requer independência para evitar tendências do desenvolvedor.

Princípio 5: VVT é difícil e requer criatividade e perspicácia. A limitação humana fundamental, chamado Limite Hrair, indica que um ser humano não processa mais de 7 ± 2 entidades simultaneamente. Consequentemente, testar um modelo complexo é difícil.

Princípio 6: A credibilidade de um modelo de simulação pode ser afirmada apenas para as condições propostas (domínio de aplicação) pelas quais o modelo é testado. A transformação entrada-saída que funciona para uma combinação de dados de entrada pode produzir dados de saídas absurdos, quando considerada para outra combinação de dados.

Princípio 7: Completar os testes de um modelo de simulação não é possível. Combinações de possíveis valores de variáveis de dados de entrada podem gerar milhões de caminhos lógicos na execução do modelo. Tempo e orçamento restringem o número limite de caminhos que podem ser testados.

Princípio 8: VVT deve ser planejado e documentado. Um plano de testes descreve o que é selecionado para testes: banco de dados, especificação, padronização e convenções, controle, configuração, ferramentas e resultados esperados.

Princípio 9: Erros devem ser prevenidos. Tipos de erros e suas consequências são definidos abaixo:

- Tipo 1 – Resultados da simulação são rejeitados, quando em fato, eles são suficientemente válidos. Causa aumento de custos desnecessários de desenvolvimento do modelo;
- Tipo 2 – Resultados inválidos da simulação são aceitos como se fossem suficientemente válidos. Eles apresentam potencial catastrófico no estudo;
- Tipo 3 – Solução do problema errado. Gera resultados irrelevantes.

Princípio 10: Erros devem ser detectados o mais cedo possível no ciclo de vida do estudo de simulação.

Princípio 11: Um problema de respostas múltiplas deve ser reconhecido e resolvido adequadamente. A validação do modelo de simulação com duas ou mais variáveis de saída não pode ser testada comparando o modelo correspondente e variáveis de saída do sistema uma por vez. Um procedimento estatístico multivariado deve ser usado para incorporar as correlações entre as variáveis de saída em comparação.

Princípio 12: Teste com sucesso de cada submodelo não implica na credibilidade do modelo geral. Erros permitidos para os submodelos podem acumular e ser inaceitáveis no modelo total. Efeitos de interação, se não manejados corretamente, podem invalidar o modelo total.

Princípio 13: Um problema de validação dupla deve ser reconhecida e resolvida adequadamente. Deve-se fundamentar que os dados de entrada do modelo tem precisão suficiente em representar o dados de entrada dos processos do sistema. Em simulações traço orientadas, isto é, usando informações reais de operação, deve-se validar a precisão destes dados. Em simulações auto orientadas, isto é, gerando dados de entrada a partir de distribuições probabilísticas, deve-se ser cuidadoso para incorporar o efeito de correlações entre as variáveis de entrada.

Princípio 14: Validação do modelo de simulação não garante a credibilidade e aceitação dos resultados do modelo. Se os objetivos do estudo são incorretamente identificados e/ou o sistema impropriamente definido, os resultados da simulação serão inválidos.

Princípio 15: Precisão do problema formulado afeta grandemente a aceitação e credibilidade dos resultados da simulação. Albert Einstein já indicou que a formulação correta do problema é mais crucial do que sua solução. O objetivo final de um estudo de simulação não deve ser apenas produzir uma solução para um problema, mas sim fornecer uma solução que seja suficientemente confiável e aceite pelo tomadores de decisão. A insuficiente definição do problema e a participação inadequada do usuário nesta definição são identificados como dois pontos críticos no gerenciamento de modelos computacionais.

3.10 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Este é o processo de formular um plano para conseguir as informações desejadas pelo mínimo custo e para permitir o analista fazer inferências válidas. Uma variedade de técnicas está disponível para a elaboração dos experimentos:

- **Metodologias de superfície de resposta:** Usadas para achar a combinação ótima dos valores de parâmetros, os quais maximizam ou minimizam o valor da variável de resposta;
- **Fatoriais:** Usado para determinar o efeito de muitas variáveis de entrada em uma variável de resposta;
- **Técnica de redução de variância:** Implementada para obter maior precisão estatística para o mesmo número de simulações;
- **Técnica de ordenação e seleção:** Usado para comparar sistemas alternativos;
- **Métodos de análises estatísticos:** Usados para analisar a significância estatística dos dados.

3.10.1 Procedimentos básicos

1. Definir cenário base (configurações do sistema e variáveis de entrada de referência);

2. Definir as mudanças do sistema que precisam ser investigadas (variáveis de decisão), tais como número de equipamentos, tempos de processos, etc.;
3. Definir as respostas do sistema que precisam ser avaliadas (variáveis de resposta), tais como produção, utilização, tempo de ciclo, etc.;
4. Determinar testes estatísticos apropriados a serem usados, definindo hipóteses e níveis de confiança desejados;
5. Determinar o período do tempo para coletar estatísticas no modelo, definindo o período de aquecimento e da replicação;
6. Definir condições iniciais;
7. Determinar o tamanho da amostra (replicações da simulação) necessário para obter os níveis de confiança estatístico.
8. Determinar técnicas de redução da variância usadas para aumentar a precisão dos resultados.

3.10.2 Controle experimental

Controle é necessário quando usa-se a simulação para testar e comparar alternativas de regras, procedimentos ou filosofias de operação. Quando são feitas simulações que diferem em um único aspecto, é importante que todos os outros aspectos mantenham-se constantes. Deve ser possível introduzir mudanças apenas onde elas são desejadas. Está é a razão para exigir uma reprodução de fluxo de números aleatórios. Ter mais de um fluxo permite que partes do modelo operem independentemente e não influenciem outras partes. Duas técnicas são comumente usadas para reduzir a variância da média das respostas do sistema ao longo das replicações pelo controle dos fluxos de números aleatórios.

- **Números aleatórios comuns:** Método que usa diferentes fluxos de números aleatórios em diferentes áreas do modelo;
- **Antitéticas de variáveis:** Método de indução de correlação negativa entre respostas de diferentes replicações. A dedução fornece a menor variância das respostas médias entre replicações. O benefício é o intervalo de confiança mais apertado e menor tamanho de amostra requerido para realizar testes estatísticos no nível de confiança predefinido.

3.11 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE

3.11.1 Procedimento Geral

1. Gerar dados pela execução do modelo;
2. Analisar estatisticamente os dados produzidos da execução do modelo;
3. Construir intervalos de confiança;
4. Decidir qual sistema simulado é o melhor em relação as medidas de desempenho;
5. Obter conhecimento para saber como melhorar o desempenho do sistema, como problemas de tempos e transferência de gargalos;
6. Executar novos casos baseado no conhecimento adquirido.

3.11.2 Análise

O desempenho de um sistema simulado pode ser estudado de muitos modos. O dinamismo do comportamento do sistema pode ser traçado olhando gráficos da mudança pelo tempo de variáveis relevantes. O desempenho agregado pode ser estudado olhando para análises estatísticas de dados de simulação gerada: médias, variância, mínimo, máximo e histograma.

Ter em mente que entradas aleatórias geram saídas aleatórias. É portanto necessário conduzir testes estatísticos para determinar quais diferenças na saída são devido a mudança em variáveis de decisão ou devido a variabilidade inerente das entradas.

Entradas determinísticas geram saídas determinísticas. É portanto necessário obter uma única amostra do modelo, visto que o resultado sempre será o mesmo para a mesma entrada.

Entrada “lixo” gera saída “lixo”. O modelo só pode ser tão bom, quanto os dados de entrada que nele vão.

3.11.3 Otimização

Um modelo de simulação é usado de uma maneira experimental, ele não encontra ou procura as configurações de parâmetros ótimas do sistema por si só. O usuário deve definir iterativamente, simular e analisar até que a solução seja atingida.

3.12 COMUNICAÇÃO DE RESULTADOS

Atividades:

1. Fazer conclusões e recomendações;
2. Apresentar soluções alternativas e suas implicações no desempenho do sistema;
3. Tornar os resultados de fácil avaliação;
4. Reduzir resultados para fatores econômicos, gerando uma argumentação convincente para a mudança do sistema;
5. Descobrir se as recomendações esperadas são resumidas ou completas;
6. Fornecer um relatório com:
 - a. Introdução (Propósito do estudo, prazo);
 - b. Metodologia;
 - c. Descrição do sistema (premissas chaves, características operacionais, dados de entrada, elementos inclusos e não inclusos no modelo);
 - d. Resultados;
 - e. Conclusões (ações a serem e não tomadas, conhecimento ganho, implicações das mudanças)

3.13 DOCUMENTAÇÃO

3.13.1 Documentação do Projeto

O plano do projeto, descrito anteriormente da seção “Planejamento do Projeto”, deve ser documentado na proposta do projeto. Notas devem ser colocadas em um documento separado em relação à execução do plano. O plano de projeto, por si só, deve ser atualizado a medida que seja necessário ao longo do seu curso.

3.13.2 Para o Programador – Para modificar um Programa

Adaptar um programa ou arrumá-lo requer um volume considerável de informação. A documentação deve ser realizada ao longo de todas as fases do desenvolvimento do modelo original (BROOKS, 1975).

1. Adicionar comentários em módulos/linhas de código quando necessário para fornecer todos os detalhes:
 - a. Razão para a utilização de um módulo particular;
 - b. Descrição das variáveis, atributos, estatísticas, etc.;
 - c. Descrição da lógica de controle, prioridades, critérios de desempate, etc.;
 - d. Descrição da inicialização de variáveis, filas, armazenamentos, etc.;
 - e. Descrição de rotinas, atribuições, pesquisas, etc.;
 - f. Comentar tudo que não seja óbvio;
 - g. Comentar suposições.
2. Proporcionar uma visão clara e nítida da estrutura interna:
 - a. Fluxograma ou gráfico da estrutura do subprograma;
 - b. Descrição completa de algoritmos usados ou referências para tais descrições na literatura;
 - c. Uma explicação do layout de todos os arquivos usados;
 - d. Uma visão geral da estrutura de cada passagem, a sequência que as informações ou programas externos são usados no modelo, e o que é realizado em cada passagem;
 - e. Uma discussão das modificações contempladas no projeto original, a natureza e localização dos ganchos e saídas, e melhorias desejáveis e como alguém podem proceder;
 - f. Observação de armadilhas escondidas.
3. Algumas técnicas:
 - a. Usar nome de trabalho separado para cada execução e manter um registro de execução mostrando o que foi tentado, quando e os resultados;
 - b. Usar um nome de programa que é mnemônico mas também contém um identificador de versão;
 - c. Declarar todas as variáveis;

3.13.3 Para o Usuário Final – Para usar o Programa

Todo usuário precisa de uma descrição em texto do programa. A maioria destes documentos precisa ser rascunhada antes do programa ser escrito, para

que ele incorpore decisões básicas de planejamento. O documento deve conter (BROOKS, 1975):

1. **Propósito:** A função principal e razão do programa;
2. **Ambiente:** As configurações de hardware e software para executar o modelo;
3. **Domínio e intervalo:** Domínio de dados de entrada e intervalo de saída válido;
4. **Funções realizadas e algoritmos usados:** Precisamente o que o modelo faz;
5. **Formatos de entrada e saída:** Preciso e completo;
6. **Instruções de operação:** Incluindo comportamento normal e anormal final, como pode ser visto no console e nas saídas;
7. **Opções:** As escolhas que o usuário têm sobre as funções;
8. **Tempo de execução:** Tempo necessário para um problema específico ser resolvido em determinadas configurações;
9. **Precisão e verificação:** A precisão das respostas esperadas e os meios de verificação que estão incorporados.

3.13.4 Para o Usuário Final – Para acreditar no Programa

A descrição de como usar o programa deve ser suplementada com alguma informação de como ele funciona. Pequenos casos testes dever ser fornecidos ao usuário para garantir que ele possua uma cópia fiel do programa. Após um programa ser modificado, mais casos testes são requeridos. Eles caem em três partes do domínio dos dados de entrada (BROOKS, 1975):

1. Casos da linha principal que testam as funções chefes do programa para informações comumente encontradas;
2. Casos que testem os limites superiores e inferiores do domínio dos dados de entrada e todos os tipos de trabalhos excepcionais válidos;
3. Casos que testem fora dos limites do domínio dos dados de entrada, mostrando que uma mensagem de dados inválidos é mostrada.

3.13.5 Convertendo um Programa em um Produto

Um produto de programação é um programa que pode ser executado, testado, reparado e expandido por qualquer um. É útil em muitos ambientes

operacionais, para muitas configurações de dados. Para ser um produto de programação genericamente usável, um programa precisa ser escrito de uma forma generalizada. Em particular, o intervalo e forma da entrada devem ser tão generalizado quanto o algoritmo básico irá permitir.

O programa deve então ser intensamente testado, de modo que se possa confiar. Isto significa a necessidade de um substancial banco de casos testes, que explorem o intervalo de entrada, sondando seus limites. Estes testes devem ser preparados, executados e gravados. Finalmente, o produto requer total documentação, para que qualquer um possa ser usado, arrumado e estendido. Como regra geral, um produto de programação custa ao menos três vezes mais do que um programa depurado com as mesmas funções (BROOKS, 1975).

3.14 IMPLEMENTAÇÃO

Colocar os resultados para produzir os benefícios esperados, sendo para implantar as mudanças ou projetos propostos, ou para refazer a simulação levando em conta novas possibilidades.

4. CASO ESTUDADO

4.1 O MODELO ESTUDADO E SUA CONSTRUÇÃO

4.1.1 Escopo do Modelo Estudado

O escopo do modelo é desenvolver um estudo de simulação logística para o empreendimento composto por três grandes sistemas que são: a mineração, o transporte ferroviário e a operação portuária, sumarizado na Figura 13 e considerando:

- **Mineração:** engloba o processo de extração do minério na mina, passando pelo processo de beneficiamento e finalizando no carregamento dos produtos no trem, sendo que nesta etapa dos estudos a usina de beneficiamento será considerado como uma caixa preta e apenas o sistema de estocagem de produtos e carregamentos dos trens na mina será detalhado;
- **Transporte Ferroviário:** tem como principal objetivo transportar os produtos do minério de ferro do terminal de carregamento ferroviário na área de mineração até a descarga no terminal portuário;
- **Operação Portuária:** a operação portuária inicia-se no descarregamento dos produtos do trem, passando pela estocagem em pilhas longitudinais e finalizando no carregamento de navios.

Figura 13 – O escopo do Modelo (Fonte: Autoria própria)

4.1.2 Finalidade e Aplicação do Modelo

4.1.2.1 Configuração do Caso Base

O modelo irá testar a configuração básica de modo a saber se a capacidade de exportação desejada de produtos de minério de ferro pode ser atingida em limites de desempenho operacionais aceitáveis.

4.1.2.1.1 Configuração da Mina

A configuração básica da mina, onde será modelado apenas a usina de beneficiamento, como uma caixa preta, a estocagem de produtos e a estação de carregamento dos trens é representada na Figura 14.

Figura 14 – Configuração Básica da Estocagem na Mina (Fonte: Autoria própria)

A Usina de Beneficiamento fornecerá três produtos simultaneamente.

No Pátio de Estocagem, apenas a recuperadora intermediária pode optar entre pilhas adjacentes, todos os outros equipamentos do pátio trabalham apenas com uma pilha específica. A terceira linha de recuperação e a quarta linha de empilhamento não são necessárias operacionalmente, mas foram adicionadas para testar na influência na disponibilidade do sistema.

A Estação de Carregamento de trens apresenta possibilidade de atender dois trens simultaneamente, com qualquer combinação de produtos.

4.1.2.1.2 Configuração da Ferrovia

A configuração básica da ferrovia é representada na Figura 15 e Figura 16. É composta por 138 estações na linha ferroviária principal de aproximadamente 1700 km de extensão, sendo destes 85 estações por linha singela de ~1500 km e 53 estações de trecho duplo de ~200 km.

Figura 15 – Configuração Básica da Ferrovia (Fonte: Autoria própria)

Figura 16 – Configuração Básica da Ferrovia representada pelo modelo (Fonte: Autoria própria)

Uma descrição mais detalhada da configuração básica da ferrovia é apresentada adiante.

4.1.2.1.3 Configuração do Porto

A configuração básica do porto é representada na Figura 17, que possui:

- Dois berços com um Carregador de Navios cada;
- Dois viradores de Vagões;
- Três máquinas de pátio (empilhadeira / recuperadora combinada);
- Transportadores de correia;
- Pilhas de estocagem para três produtos.

Figura 17 – Configuração Básica do Porto (Fonte: Autoria própria)

4.1.2.2 Questões principais a serem obtidas pelo modelo

As questões principais a serem obtidas pelo modelo incluem:

- Se a capacidade de exportação desejada da cadeia de suprimentos consegue ser atingida com limites de desempenho operacionais aceitáveis, sendo que para isso é necessário atingir os seguintes requisitos:
 - A exportação desejada de produtos é alcançada;
 - Os berços estão comprometidos com menos ou igual a 65-80% do tempo de calendário;
 - O viradores de vagões são utilizados com menos de 50-65% do tempo de calendário;
 - Menos de 0,50 US\$/t são pagos em multas por demurrage (definição no item 4.1.7.9 *Demurrage*).
- Qual a máxima capacidade que a cadeia de suprimentos consegue atingir, no caso base?
- Quais investimentos poder ser evitados ou postergados, no caso base?
- Qual o roteiro de investimentos para o “ramp up” do projeto?
- Quais são os prazos de recuperação do sistema para perturbações grande?
- Qual a capacidade mínima das pilhas de estocagem da mina para não permitir parada da usina, devido a pilhas cheias, e de carregamento do trem, devido a pilhas vazias?

4.1.2.3 “E-se?” (What-If) e Análise de Sensibilidade

Os parâmetros básicos que são testados estão na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros básicos testados no modelo

Parâmetro	Alcance
Número de linhas de estocagem na mineração	3 ou 4
Número de Carregadores de Trens	1 ou 2
Número de Descarregadores de Vagões	1 ou 2
Número de Vagões descarregados por vez	1 a 4
Número de máquinas de pátio (empilhadeira/recuperadora combinada) no porto	1 a 3
Número de Carregadores de Navios	1 ou 2

Simular situações de paradas no sistema, sendo elas:

- Parada na estação de carregamento dos trens em situações de 12, 24, 36 e 48 horas;
- Parada em pontos da via em situações de 12, 24, 36 e 48 horas;
- Parada na estação de descarregamento dos trens em situações de 12, 24, 36 e 48 horas;
- Parada na estação de carregamento dos navios em situações de 1 a 19 dias.

Além disso, avaliar os casos de:

- Variação do número de produtos manuseados pelo sistema;
- Utilização de embarque direto;
- Variação da frota de navios;
- Mudança do Carregador de Navios do tipo Travelling para Dual Quadrant.

4.1.2.4 Limites do Modelo

O modelo é limitado entre a mina e o porto, e considera a logística de:

1. Empilhamento e recuperação dos produtos de minério de ferro no pátio de estocagem da mina;

2. Transporte de produtos de minério de ferro por via férrea da estação de carregamento ferroviário na mina até a descarga nas pilhas de estocagem de exportação no porto;
3. Empilhamento e recuperação dos produtos de minério de ferro no pátio do porto;
4. Carregamento dos navios.

4.1.2.5 Principais Premissas e Simplificações do Modelo

As principais premissas estão listadas abaixo, enquanto outras premissas estão descritas nas seções de discussão da lógica do modelo.

1. É assumido no modelo que todas as áreas do empreendimento estarão disponíveis 24 horas por dia nos 365 dias por ano, estando sujeitas a manutenção planejada e não planejada. Parâmetros de manutenção planejada e não planejada são dados de entrada do modelo. Os parâmetros para esses eventos estão definidos em seções subsequentes;
2. A produção da usina foi modelado como uma “caixa preta”, isto é, este sistema não terá sua estrutura interna levada em consideração, limitando-se assim a medidas das relações de entrada e saída;
3. Qualquer navio poderá ser carregado, em qualquer berço;
4. Todas as filas são consideradas como “first-in-first-out”;
5. No tempo de operação dos navios, não foi previsto desembarço aduaneiro na chegada ao cais, que possa retardar o carregamento;
6. Produção da usina sempre será de acordo com a proporção do mix de produtos obtidos;
7. Não haverá blendagem de diferentes teores de produtos;
8. Trens transportam um único tipo de produto por vez. Não é possível alguns vagões carregados com um tipo de produto e outros vagões carregados com outro tipo;
9. Locomotiva e vagões ficam acoplados em todo o ciclo;
10. Capacidade limitada de estocagem de material nas pilhas do porto;
11. É permitido trafegar apenas um trem em cada segmento de via, por vez;
12. Na linha principal, trens carregados terão prioridade sobre trens descarregados;

13. Operadores das locomotivas serão substituídos nos pontos de troca de equipe, independente do tempo que leve para cada troca. As trocas de equipe acontecerão mesmo que a equipe não tenha completado um turno, para evitar que exceda a duração máxima do turno;

4.1.2.6 Exclusões do Modelo

Os itens não modelados estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Exclusões do Modelo

Item	Notas / Implicações potenciais
Operações da mina	Assumido que frotas de caminhões e pás carregadeiras sejam dimensionadas adequadamente, e equipes sejam programadas de maneira a se evitar potenciais atrasos na produção da usina. A usina será modelada como “Caixa Preta”, fornecendo material constantemente as pilhas de estocagem, com exceção das falhas e paradas programadas. Nível de estocagem, será modelado de maneira a não permitir parada da usina, devido a pilhas cheias e de carregamento do trem, devido a pilhas vazias
Entrada e saída do canal de navegação	Assumido sem atrasos para o ciclo do navio devido a interferências do canal. Pode-se subestimar o tempo total em que os navios estarão no porto, e portanto, superestimar a produtividade e subestimar o demurrage (definição no item 4.1.7.9 <i>Demurrage</i>)
Mão de obra	Assumido que a mão de obra é disponível conforme necessário para todas as atividades
Rebocadores e pilotos	Assumido que os rebocadores e pilotos estão disponíveis conforme necessário
Trens de passageiro	Assumido que produzem interferência insignificante
Atrasos de trens devido ao tempo	Assumido que produzem interferência insignificante

4.1.3 Softwares empregados

O **modelo** foi desenvolvido no software Arena 13.9 produzido pela Rockwell Automation, Figura 18. O software Arena é um ambiente gráfico integrado de simulação. Nele não é necessário escrever linhas de códigos para a modelagem do sistema, pois todo o processo de criação do modelo é gráfico e visual. É necessário escrever linhas de códigos apenas para importar e exportar dados do Arena para outras plataformas, como o Microsoft Office Excel ou “Documento de Texto” (.txt).

Figura 18 – Software Arena e parte da lógica do modelo (Fonte: Autoria própria)

Os dados de entrada do modelo são colocados em uma planilha do Microsoft Office Excel 2003, Figura 19, denominada como **Interface**. Foram usadas aproximadamente 300 variáveis, totalizando aproximadamente 5.000 valores.

Parameter Category	Parameter Description	Units	Notes	Parameter Name	SI	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
System	capacity (Mtpa)		Capacidade de Exportação (milhões de toneladas por ano)	c_mtpa_v	7	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5	27,5
	% of material		Porcentagem do material	p_material_v	35	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	Lump tipo 1		Porcentagem do material	p_material_v	35	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Lump tipo 2		Porcentagem do material	p_material_v	30	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Testing the port without rail		separados: Unidos: 0	p_portwithoutrail_v	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Train division		Número de vagões na primeira parte do trem a ser dividido- Tem que ser dividido pelo número de vagões virados por vez	p_train_div_v	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Part 1		Número de vagões na segunda parte do trem a ser dividido- Se ZERO, não terá divisão	p_train_div_v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Train to be "created"		Trens a serem criados do material 1	train_material_1_v	243	1631	1631	1631	593	1886	1631	1631	1779	1720	1690	1750	1631	3443	2876
	Lump tipo 1		Trens a serem criados do material 2	train_material_2_v	243	680	680	680	248	495	680	680	742	717	705	729	680	130	1189
	Lump tipo 2		Trens a serem criados do material 3	train_material_3_v	208	408	408	408	143	297	408	408	445	430	423	438	408	786	779
	Time between train arrivals (h)		Tempo entre chegadas do trem do material 1	p_train_material_1_v	36,5555	5,2973	5,2973	5,2973	14,5839	7,2949	5,2973	5,2973	4,9588	5,0232	5,1024	4,9371	5,2973	2,7489	3,0041
	Lump tipo 1		Tempo entre chegadas do trem do material 2	p_train_material_2_v	36,5555	12,7058	12,7058	12,7058	34,8387	17,4545	12,7058	12,7058	11,6442	12,0502	11,8598	12,7058	6,5954	7,2386	
	Lump tipo 2		Tempo entre chegadas do trem do material 3	p_train_material_3_v	415,384	21,1764	21,1764	21,1764	57,9885	29,6909	21,1764	21,1764	19,4957	20,093	20,4295	19,726	21,1764	10,3923	12,0988
	First train arrives (h)		Tempo de criação do primeiro item do material 1	p_train_material_1_v	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lump tipo 1		Tempo de criação do primeiro item do material 2	p_train_material_2_v	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Lump tipo 2		Tempo de criação do primeiro item do material 3	p_train_material_3_v	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

Figura 19 – Software Microsoft Office Excel 2003 – Interface do Modelo (Fonte: Autoria própria)

Os dados de entrada são inclusos no modelo no início da simulação, a partir de uma lógica criada em Visual Basic, escrita no arquivo do modelo no Arena, Figura 20.

Figura 20 – Visual Basic e parte da lógica que transfere os dados de entrada da Interface para o Modelo (Fonte: Autoria própria)

Os resultados sumarizados obtidos do modelo no final de cada replicação são colocados em uma aba da planilha Interface, Figura 21, por uma lógica em Visual Basic escrita no arquivo do modelo. Isto permite uma análise preliminar e obtenção das informações principais.

Category	Measure	Units	Ref	Avg.	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 4	Rep 5	Rep 6	Rep 7	Rep 8	Rep 9
Tempo de simulação				362970.0	403260	525600	525600	166560	525600	201660	37500	460860	525600
Car Dumper Occupation				24.3	24.73813421	23.5304414	24.81335616	27.28866475	24.02910959	23.63830209	23.256	23.61432973	24.17998
Berth Occupation				60.3	57.28760601	55.86168189	57.00989346	57.94908742	56.06659056	60.70564316	91.12	58.37108893	58.34075
% of Trains disposed				69.5	77.80979827	100	100	32.13256484	100	38.90489914	7.34870317	88.90489914	100
% of Ship disposed				72.6	81.91489362	100	100	38.29787234	100	44.68085106	12.76595745	93.61702128	100
Demurrage 1 dinheiro por t				0.5	0.494374247	0.627328593	0.700391743	0.325748742	0.644610352	0.388097823	0.223170967	0.631080376	0.71584
Demurrage 2 dinheiro por t				0.5	0.440507474	0.561482165	0.630775988	0.301600365	0.579911798	0.358891799	0.212782534	0.567774216	0.646885
Demurrage 3 dinheiro por t				0.4	0.409001971	0.521580859	0.589731244	0.286703585	0.539831944	0.341457111	0.206401581	0.530925207	0.603531
Ships that pay demurrage 1				54.1	63	71	77	26	71	32	11	71	76
Ships that pay demurrage 2				47.7	51	64	66	24	66	28	10	62	70
Ships that pay demurrage 3				44.4	48	61	64	22	60	27	10	55	64
Loadout Station Occupancy				4.9	5.086296682	4.992009132	4.952910959	4.979586936	4.969368341	4.842804721	4.668	4.935229788	4.939307
Loco in maintenance Average				0.2	0.160690373	0.246575342	0.246575342	0.084876767	0.164383562	0.214221958	0	0.140606692	0.164384
Loco in maintenance Maximum				2.0	1	2	2	1	2	1	0	1	1
Wagon in maintenance Average				18.0	17.46943633	17.3443143	19.05389734	17.62183985	19.49098507	18.20067993	14.3993152	18.55365681	18.22602
Wagon in maintenance Maximum				47.0	35	30	38	34	47	32	24	36	36
Mine Pile Material 1				1828529.9	1345311.082	1827355.678	1828529.854	498935.9714	1813597.682	645131.6135	148339.3792	1583958.05	1824884
Mine Pile Material 2				1821171.7	1362508.333	1821171.667	1812457.5	511225.8333	1820541.667	642741.6667	143275.8333	1583894.167	1811046
Mine Pile Material 3				1563655.0	1175675	1542210	1563655	436970	1552325	543185	117025	1352260	1562445
nada de util				0.1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Tempo looping ida		1		0.0	0.030005456	0.0456621	0.039193303	0.034822286	0.042047184	0.03570366	0.008	0.028642104	0.038432
Tempo looping volta		1		0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tempo no ida		1		14.6	14.976442	14.82153729	14.7308883	14.78746398	14.75684932	14.36033955	14.07733333	14.68320003	14.68644
Tempo no volta		1		0.6	0.586470267	0.590753425	0.595509893	0.582372719	0.585996956	0.555390261	0.56	0.58369136	0.585046
Tempo trecho ida		1		2.4	2.441958339	2.437356568	2.434651989	2.439165531	2.440061148	2.25413236	2.406209658	2.437053555	2.437357
Tempo trecho volta		1		1.3	1.294959635	1.291012177	1.288245814	1.285870963	1.296544901	1.22803729	1.23648	1.292587771	1.291779

Figura 21 – Resultados de cada replicação colocados na Interface (Fonte: Autoria própria)

Devido ao modelo gerar quantidades massivas de dados durante sua execução, estes são escritos em arquivos do tipo “Documento de Texto” (.txt). Os dados em txt são transferidos para uma planilha em Microsoft Office Excel 2003, denominada como **Logs**, por uma lógica em Visual Basic escrita no arquivo Logs. Cada arquivo Logs chega a possuir 0,3 GB.

A cronologia da simulação com os arquivos envolvidos é demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Cronologia da simulação e arquivos envolvidos (Fonte: Autoria própria)

4.1.4 Planejamento e Programação de Produção

4.1.4.1 Planejamento da Mina

Devido a usina de beneficiamento ser modelada como uma caixa preta, ela produzirá os produtos definidos constantemente, com exceção das falhas e paradas programadas.

4.1.4.2 Programação de Navios

A programação de navios pode ser feita de duas maneiras básicas (Asperen et al., 2003; Kuo et al., 2006; Hartmann et al., 2009):

1. Chegada do navio no sistema a partir de equações, sendo alguns casos:
 - a. **Pelo tempo médio entre cada tipo de navio.** Neste caso o intervalo de tempo entre as chegadas dos navios do mesmo tipo é dado pelo tempo de operação dividido pelo número de navios do mesmo tipo. Este método fornece uma maneira rápida de criação, sem necessidade de interferência do usuário, entretanto,

não permite uma otimização da programação da manutenção planejada do porto;

- b. **Pelo controle de estoque.** Neste caso as chegadas de navios são modeladas para manter um nível de estoque alvo. Este método pode subestimar o nível necessário de estocagem e a fila de navios;
 - c. **Por processo de Poisson.** Neste caso a chegada de navios é distribuída exponencialmente em intervalos de tempos. Este método pode superestimar o nível necessário de estocagem e a fila de navios;
 - d. **Por probabilidade discretas entre chegadas.** Neste caso a distribuição de chegadas é realizada a partir de uma tabela de entrada que irá gerar intervalos aleatórios discretos entre navios;
2. **A partir de uma tabela de programação.** Neste caso, uma tabela por dias do ano é criada, onde o usuário necessita colocar qual tipo de navio chegará em determinado dia. Este método é extremamente oneroso quando se deseja testar capacidades diferentes, pois necessita que para cada capacidade escolhida mude-se a tabela completamente da programação de todos os navios. Entretanto, este método permite uma otimização da programação de manutenção planejada do porto, pois pode-se estimar os períodos que não devem chegar navios, podendo colocar a manutenção planejada do carregador de navios nestes períodos.

Para a análise deste estudo, a programação foi feita pela chegada do navio no sistema “Pelo tempo médio entre cada tipo de navio”, entretanto o modelo já foi feito permitindo que a programação seja feita pela tabela de programação, visto que, em futuros e mais detalhados estudos, ela terá desempenho fundamental.

4.1.4.3 Programação de Trens

A programação de carregamento de trens deve ser feita a partir de uma tabela que se repetirá, como a mostrada na Tabela 4.

Tabela 4 – Programação de Carregamento de Trens

Sequência	Material
1	Material 1
2	Material 2
3	Material 3
4	Material 1
5	Material 2
6	Material 3
7	Material 1
8	Material 2
9	Material 3
10	Material 1
11	Material 2
12	Material 1
13	Material 3
14	Material 2
15	Material 1
16	Material 3
17	Material 2
18	Material 1
19	Material 2
20	Material 3

Os trens podem operar de duas maneiras distintas (GOVERDE; ODIJK, 2002):

1. **“Run when ready”**. Onde os trens, após estarem prontos para partir, seguem viagem;
2. **Programado**. Onde os trens, mesmo estando prontos para partir, esperam intervalos específicos para poder seguir viagem. Neste sistema, evita-se que trens atrasados ou adiantados interfiram no tráfego de outros trens, devido aos cruzamentos.

Os trens neste sistema operam baseando-se no “Run when ready”.

Ao contrário do que acontece com os navios, os trens não são criados ao longo da simulação. Nos primeiros momentos da simulação todos os trens que circularam no sistema, com exceção das interferências, são criados e continuam no sistema até o final da simulação. Isto pode causar dois problemas básicos:

1. **Muitos trens**. Com o número elevado de trens na ferrovia, muito material é transportado para o porto, até o momento que as pilhas fiquem cheias, o descarregamento de trens fique completamente ocupado, fazendo com que a ferrovia próxima do porto trave.

2. **Poucos trens.** Com o número reduzido de trens na ferrovia, pouco material é transportado para o porto, até o momento que as pilhas fiquem vazias, os carregadores de navios fiquem completamente ocupado, fazendo com que muitos navios permaneçam esperando perto do canal.

Num modelo de simulação complexo como este, onde o tempo de execução é elevado, é custoso simular para cada determinada situação várias execuções com números diferentes de composições ferroviárias até atingir o melhor número. Devido a isso, deve-se permitir que o modelo seja executado de duas maneiras:

1. **Operação com pátio infinito.** Criação de um pátio com capacidade virtualmente infinita, que permita no começo da simulação a designação de uma quantidade elevada de composições que lá ficarão e só entrarão em operação quando necessário. Não existe uma ferrovia que possua um pátio com capacidade virtualmente infinita, entretanto o número de composições em operação média será utilizado na “operação normal”;
2. **Operação normal.** O pátio, que antes era virtualmente infinito, recebe sua capacidade real e o número de composições em operação na “operação normal” é utilizado. O valor é uma referência, e em alguns casos o número de composições deverá ser acrescido, devido a interferência que o pátio infinito causava no sistema.

4.1.4.4 Disponibilidade Operacional por Ano

A Usina de Beneficiamento, embora seja uma caixa preta, necessita ter suas indisponibilidades descritas, como a

Tabela 5. Os valores nela são meramente ilustrativos.

Tabela 5– Paradas da Usina de Beneficiamento						
	Paradas planejadas			Paradas não planejadas		
	devido a chuvas	troca de turno	manutenção planejada	manutenção corretiva maiores	manutenção corretiva menores	
Número de paradas	1	0	1	101	464	
tempo da parada (h)	360	0	72	4	2	
Soma de horas indisponíveis						
Usina	1764	360	0	72	404	928

A Tabela 5 já possui os valores de tempo médio entre paradas e do tempo médio de retorno embutidos, entretanto caso estas informações fossem colocadas desta maneira no modelo, muitas paradas não planejadas aconteceriam durante o período de paradas planejadas ou ficariam acumuladas para o período subsequente. Para evitar isso, é necessário dividir as paradas não planejadas, e situá-las no tempo, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Cronograma de Paradas da Usina de Beneficiamento

				Número de paradas	Tempo da parada (h)	Momento da primeira parada em relação ao ano (h)	Tempo entre paradas (h)	
		Paradas planejadas	devido a chuvas	1	360	2160		360
			manutenção planejada	1	72	6480		72
101	4	Paradas não planejadas	manutenção corretiva maiores	26	4	77	77	104
				48	4	2599	79	192
				27	4	6628	76	108
			manutenção corretiva menores	120	2	18	18	240
221	2			2538	18	442		
123	2			6570	18	246		
464	2							Soma de horas indisponíveis

A falha dos equipamentos é representada pelos:

- Tempo médio de reparo (TMDR ou do inglês “Mean time to repair - MTTR”);
- Tempo médio entre falhas (TMEF ou do inglês “Mean time between failures – MTBF”).

Quando a falta de informações pelo cliente sobre o TMDR e TMEF, informações bibliográficas devem ser adotadas. Muitos estudos mostram apenas a disponibilidade mecânica, por exemplo de 97% para Transportadores de Correia (LEBEDEV; STAPLES, 2000). Considerando 1% para manutenção, esta informação apenas mostra que o período indisponível por falhas é de 2% do ano, ou o equivalente a $2\% \times 8760 \text{ h} = 175,2 \text{ h}$ (OLIVEIRA et al., 2006). É necessário então estimar um dos dois parâmetros:

- Tempo médio de reparo.** Este já é o próprio TMDR, e o TMEF é calculado a partir das horas do ano dividido pelo número de falhas durante o ano, que no exemplo seria:
 $8760 / (175,2 / \text{TMDR})$

- ii. **Número de falhas durante o ano.** O TMDR é obtido pela divisão entre as horas indisponíveis por falha e o número de falhas, que no exemplo seria $175,2 / \text{Número de falhas}$. O TMEF é o número de horas por ano dividido pelo número de falhas durante o ano.

Além disso, as falhas não ocorrem de maneira determinística, mas estocástica, com isso é necessário escolher uma função probabilística para determinar o intervalo entre quebras. A distribuição exponencial é comumente usada para definir esta função, entretanto por poder resultar valores extremos, não foi utilizada. Neste estudo foi utilizado a distribuição triangular, com máximo e mínimo de $\pm 20\%$.

4.1.4.5 Filosofia Geral de Operação

A filosofia geral de operação é de transportar os produtos de minério de ferro desde o sistema de carregamento de vagões na usina até o carregamento de navios, pelo Carregador de Navios no porto, no menor tempo possível, para possibilitar a exportação o mais rápido possível, pelo sistema operacional dos navios pelo canal de Santos, cuja simulação não faz parte deste escopo de trabalho. O serviço de transporte ferroviário da usina até o porto será executado quando disponível, o que significa que assim que um trem esteja carregado ou descarregado, ele será imediatamente movido para a faixa de partida e aguardar expedição.

4.1.4.6 Sincronização da Manutenção Planejada

A usina, conforme mostrada anteriormente, terá sua manutenção planejada 2 vezes ao ano, sendo o exemplo mostrado de 3 dias e a outra durante a parada de 15 dias.

O sistema de carregamento de vagões na usina, incluindo os transportadores de correia e equipamentos de pátio, terá sua manutenção planejada de oportunidade (sem a presença de trens), não repercutindo em atrasos no carregamento, resultando assim a não necessidade de ser modelado.

Os equipamentos secundários do porto, como transportadores de correia e alimentadores, também terão sua manutenção planejada de oportunidade.

Os equipamentos principais do porto precisam ter sua manutenção planejada sincronizada, visto que o tempo gasto nesta manutenção pode afetar significativamente a capacidade do porto. Os equipamentos mais críticos são as três máquinas combinadas (empilhadeira / recuperadora), que são requisitadas por quatro equipamentos (2 viradores de vagões e 2 carregadores de navios). Para realizar esta sincronização, a maneira ideal é criar um cronograma semanal, onde pode-se colocar as horas paradas para manutenção. Um exemplo é a Tabela 7, onde se mostra a manutenção das empilhadeiras/recuperadoras sempre ocorrendo em conjunto com um virador de vagões ou carregador de navios.

Tabela 7 – Manutenção Planejada dos Equipamentos do Porto

Semana	Dia	Virador de Vagões		Empilhadeira / Retomadora			Carregador de Navios	
		VV1	VV2	ER1	ER2	ER3	CN1	CN2
1	1 Segunda-feira	0	0	X	0	0	X	0
	2 Terça-feira	0	0	0	0	0	0	0
	3 Quarta-feira	0	0	0	0	0	0	0
	4 Quinta-feira	X	0	0	0	0	0	0
	5 Sexta-feira	0	0	0	0	0	0	0
	6 Sábado	0	0	0	0	0	0	0
	7 Domingo	0	0	0	0	0	0	0
2	8 Segunda-feira	0	0	0	X	0	0	X
	9 Terça-feira	0	0	0	0	0	0	0
	10 Quarta-feira	0	0	0	0	0	0	0
	11 Quinta-feira	0	0	0	0	0	0	0
	12 Sexta-feira	0	0	0	0	0	0	0
	13 Sábado	0	0	0	0	0	0	0
	14 Domingo	0	X	0	0	X	0	0

Cardoso (2011) propôs um método de avaliação do desempenho operacional de portos capaz de subsidiar a identificação das melhores práticas, incluindo as manutenções preventivas, fornecendo uma referência para futuros estudos.

4.1.5 Lógica da Mina e Parâmetros de Entrada

4.1.5.1 Produção da Mina

A usina é considerada como uma “caixa preta” e que produzirá constantemente na proporção especificada de cada produto, menos durante as manutenções planejadas e não planejadas.

4.1.5.2 Pilhas de Estocagem

Assumido que a capacidade total das pilhas de estocagem é suficiente para não ocorrer interrupção do carregamento dos trens, devido as pilhas vazias, e nem parada da usina devido as pilhas cheias.

4.1.5.3 Sistema de Carregamento de Vagões

Para o sistema de carregamento de vagões, considerou-se:

- 2 Estações de carregamento em paralelo;
- Cada trem possa ser carregado por vez em cada estação de carregamento;
- Tempo de carregamento dependente do número de vagões presentes na composição;
- Tempo de verificação antes da liberação dos trens após serem carregados para entrar na ferrovia dependem do número de vagões presentes na composição.
- Capacidade limitada de trens descarregados em espera, resultando que se o limite for atingido, os trens esperam nos pátios de cruzamento.

4.1.6 Lógica da Ferrovia e Parâmetros de Entrada

4.1.6.1 Configurações Operacionais

O sistema ferroviário tem como principal objetivo transportar os produtos do sistema mineração ao sistema de operação portuária, percorrendo uma distância de aproximadamente 1.700 km, com características topográficas diversas como planaltos e trechos em serra. Por se tratar de uma via de mão única, existem pátios ao longo da ferrovia que permitem a ultrapassagem e o cruzamento de composições. A localização e comprimento dos pátios e dos trechos entre pátios influenciam diretamente na capacidade de transporte da via e uma boa logística de movimentação dos trens evita a ociosidade de trechos e de material rodante. A ilustração de uma composição com vagões carregados de minério de ferro está presente na Figura 23.

Figura 23 - Composição transportando produto de minério de ferro (Fonte: FILHOSDASMINAS, 2012)

Este sistema será o meio de ligação e interação dos dois outros sistemas do modelo, interferindo diretamente neles. Na Figura 24, encontra-se o trajeto por onde o trem irá passar.

Figura 24 – Trajeto da ferrovia (Fonte: GOOGLE EARTH, 2012, adaptada)

A descrição deste sistema e as principais premissas adotadas para a elaboração do modelo estão divididas em sete etapas:

- **Primeira etapa:** Ilustrará as características gerais da lógica do modelo da ferrovia;

- **Segunda etapa:** Descreverá a geometria dos trechos convencionais da via, focando nos parâmetros que influenciam o tempo que uma composição leva de um pátio ao próximo, como por exemplo as distâncias entre pátios e as velocidades em cada trecho;
- **Terceira etapa:** Descreverá as características adotadas do material rodante;
- **Quarta etapa:** Dedicada às premissas das regras de operação, utilizadas no modelo;
- **Quinta etapa:** Os trechos convencionais são abordados quanto ao tráfego;
- **Sexta etapa:** Os trechos complexos, como o trecho de baixada Santista e terminais, são abordados tanto em relação ao tráfego, às regras de operação e a geometria;
- **Sétima etapa:** Tem como foco as interrupções na via, seja devido à manutenção preventiva ou seja devido a acidentes.

4.1.6.2 Lógica de Controle de Tráfego da Ferrovia

A lógica simplificada do sistema ferroviário pode ser ilustrada pelas Figura 25, Figura 26 e Figura 27. Na Figura 25, a movimentação dos trens carregados são considerados do ponto “i-1” para o ponto “i” e dos trens descarregados no sentido inverso. Caso um trem carregado esteja ocupando um trecho, o trem sem prioridade deverá entrar no pátio para que não haja colisões.

As lógicas simplificadas de cada trecho da ferrovia, estão ilustradas nas Figura 26 e Figura 27, considerando os trens carregados e descarregados, respectivamente. Elas mostram que os trens verificam se tem permissão para entrar no trecho seguinte ou se precisam dar preferência para a passagem de outros ou, ainda, esperar o desimpedimento da via (TSIFLAKOS; MATHEWSON, 1991).

Estas lógicas, não representam trechos complexos, como terminais, trecho de alça de Pantojo e o trecho de Agente Inocência.

Figura 25 – Desenho esquemático de um trecho (segmento “j-1”) da ferrovia e de dois pátios (pontos “i-1” e “i”) (Fonte: Autoria própria)

Figura 26 – Lógica simplificada de um trem carregado (Fonte: Autoria própria)

Figura 27 – Lógica simplificada de um trem descarregado (Fonte: Autoria própria)

- O trem pode entrar na linha principal apenas se ele possuir tempo suficiente para fazê-lo com segurança a partir da sua estação de saída até o desvio ou estação final. Se um trem não pode avançar com segurança, então ele deve esperar até que possua, antes de entrar na linha principal;
- Todos os trens “olham” dois trechos subsequentes para obter o “status” de bloqueio. Se houver um conflito, então o trem de prioridade inferior deve imediatamente decidir em qual pátio entrar;
- O trem só poderá falhar ao alcançar um nó;
- O trem não segue uma grade, ao estar pronto, já será permitido continuar o percurso;
- O trem descarregado apenas passará pelo pátio de desvio quando for necessário, isto é, a ferrovia está utilizando sistema de chave elétrica, Figura 28. Em um primeiro estudo foi utilizado o sistema de molas, o que acarreta que o trem descarregado passa obrigatoriamente pelo pátio de desvio.

Figura 28 – Funcionamento de um Aparelho de Mudança de Via com sistema de chave elétrica
(Fonte: PORTO, 2004)

4.1.6.3 Tempo de Percurso

Para o modelo, a geometria da via férrea é dada pelas características de seu traçado que influenciam no tempo que uma composição leva para percorrer um trecho.

Foram estudados os tempos de percursos obtidos por estimativas de velocidades e por simulação operacional realizada por um software específico. A utilização de software específico mostrou-se essencial para uma boa análise, visto que a diferença entre a estimativa e os resultados deste, principalmente em relação a tempo de retomada de velocidade, foram significativos.

Foi considerado que todas as composições da via percorrem os trechos no mesmo intervalo tempo. Embora saiba-se que os trens não percorreram a via na mesma velocidade, não é possível, economicamente e tecnicamente, obter ou estimar a velocidade de cada tipo de composição.

Existem trechos nos quais a ferrovia oferece mais que uma alternativa de prosseguimento para os trens que nela trafegam. Estes trechos foram chamados de trechos complexos e são detalhados adiante.

Foi considerado que os trens carregados sempre utilizarão a via principal, enquanto que os trens vazios, se necessário, passarão pelo pátio de ultrapassagem. Um exemplo de tabela dos tempos que as composições levam para cruzar de um pátio a outro é apresentado nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Tempos nos trechos simples – Trens Carregados

PATIOS	Tipo de via	Tempos (min)			
		Percurso	Pátio	Adicional quando parado	Adicional no trecho anterior após entrada no pátio devido ao tamanho do trem
1	Simples	8.67	2.42	2.32	2.03
2	Simples	6.38	2.91	2.38	1.83
3	Simples	12.52	2.71	2.37	1.81

Tabela 9 – Tempos nos trechos duplos – Trens Descarregados

TRECHO	Distância (km)	Tipo de via	Tempos (min)		
			Percurso	Adicional quando parado	Adicional no trecho anterior após entrada no pátio devido ao tamanho do trem
1	5,1	Duplo	5.43	3.34	2.70
2	5,1	Duplo	9.23	3.35	2.68
3	5,1	Duplo	9.23	3.36	2.66

O tempo adicional no trecho anterior, após entrada no pátio devido ao tamanho do trem, é devido ao trem não ser considerado um ponto material, o que ocasiona, em certos momentos, o bloqueio de dois trechos, não permitindo a entrada de outra composição, conforme mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Tempo adicional no trecho anterior (Fonte: Autoria própria)

4.1.6.4 Material Rodante

Em relação ao material rodante, composto por locomotivas e vagões, foram adotadas as premissas abaixo apresentadas:

- A avaria de locomotivas de trens carregados faz com que o trem pare no próximo cruzamento e aguarde a passagem de um outro trem vazio qualquer da mesma empresa que possua todas as locomotivas funcionando. Após 1 hora destinada a troca de locomotivas, os trens seguem seus percursos na velocidade determinada. Após algumas execuções, observou-se que poderia ocorrer a quebra da última composição, sem possibilidade de outra cruzar com ela, travando o sistema. Em momentos que outras composições cruzavam normalmente, observou-se que o tempo que uma composição aguardava era, em sua maioria, de 30 a 60 minutos. Devido a isso, foi adotado que após uma composição

avariada chegar num cruzamento, ela irá aguardar uma hora mais o valor obtido pela distribuição uniforme entre 30 e 60 minutos;

- Trens descarregados não sofrem avarias nas locomotivas. A grande maioria das avarias ocorre quando o equipamento está em esforço, devido a isso, trens descarregados não sofrem avarias;
- Manutenção planejada nas locomotivas não impacta no desempenho das composições na via, e sim apenas na quantidade de locomotivas presentes no sistema;
- Número ilimitado de locomotivas, “*helpers*” e vagões. Com isso pode-se obter o número mínimo de equipamentos para que a produção nunca seja afetada. No modelo já deve ser colocado uma função que limite o número de equipamentos, para futuras análises;
- Cada locomotiva “quebra” um número específico de vezes ao ano, com disponibilidade específica também. Isto é devido a contratos padrões que as empresas fornecedoras de locomotivas, que irão também fazer a manutenção, se comprometem a cumprir;
- Será considerado que a quebra de vagões não influenciará na operação, mas influenciará no dimensionamento da frota. Logo, composições vão até um ponto específico, onde os vagões “quebrados” são retirados, sem afetar a velocidade da composição neste percurso.

4.1.6.5 Regras de Operação

As regras de operação abrangem desde os critérios que um trem utiliza para decidir sua próxima ação até as paradas obrigatórias que os trens sofrem para a troca de equipes ou abastecimento das locomotivas.

As seguintes regras de operação são válidas:

- Se o trem está num trecho duplo e o próximo trecho é singelo, se não houver ninguém até o próximo trecho duplo, ele poderá entrar;
- Se o trem está em um trecho singelo e o próximo também é singelo, se não houver ninguém no próximo, ele poderá entrar;
- Se o trem está em um trecho singelo e o próximo é duplo, se não houver ninguém no próximo no mesmo sentido, ele poderá entrar;

- Se o trem está em um trecho duplo e o próximo é duplo, se não houver ninguém no próximo trecho seguindo no mesmo sentido, ele poderá entrar;
- Se um trilho de um trecho duplo está interrompido por qualquer razão, o trecho passará a ser singelo.

As operações realizadas nas composições, como troca de equipe, abastecimento das locomotivas, anexação de helper, também consomem tempo nos ciclos dos trens e são diferentes para cada tipo de composição na via. Para isto, foi criada uma matriz com o tempo para estas operações, que tem como ordenadas de coluna, cada tipo de composição, e nas ordenadas de linha, todos os pátios. Um exemplo de parte desta matriz é a Tabela 10.

Tabela 10 – Tabela dos tempos no sentido Mina-Porto

Pátio	Tipo de composição										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	23
1	0									...	
2	0	0		0						...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8	0	0		0						...	
9	10	10		10						...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
14	0	10		10						...	
15	0	0		0						...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
25	0	0		0						...	
26	20	20	20	20	20					...	
27	0	0	0	0	0					...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
40	15		0	15	0					...	
41	0		0	0	0					...	
42	0		0	0	0					...	
43	10		10	10	10					...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
128	0		30			30	30	30	30	...	
129	0		0			0	0	0	0	...	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
136	0		0			0	0	0	0	...	0
137	0		0			0	0	0	0	...	
138	0									...	

Com relação às regras de operação, as seguintes premissas foram consideradas:

- A troca de equipe e o abastecimento ocorrem na via principal do pátio, paralisando-a momentaneamente durante estas operações;

- Todas as composições seguirão a mesma lógica quanto à velocidade desenvolvida nos trechos.

4.1.6.6 Tráfego

O tráfego estudado foi para a demanda futura de 2016 da via, no qual estima-se 23 tipos diferentes de composições.

4.1.6.7 Trechos Complexos

4.1.6.7.1 Trecho da Baixada Santista

O trecho da Baixada Santista é complexo por apresentar tráfego elevado de diferentes empresas e com diferentes destinos.

As demandas consideradas no modelo, correspondem as máximas para 2016, conforme mostra a Figura 30. Cada cor representa um fluxo diferente de origem - destino.

Figura 30 – Estimativa do tráfego de trens em 2016 na Baixada Santista (Fonte: Autoria própria)

As regras de operação das proximidades do pátio de Piaçaguera são ilustradas pela Figura 31.

- Para considerar o cruzamento de trens, quando os trens nos sentidos 2, 4, 6, 7, 8 e 9 trafegam neste nó, eles ocupam os nós nos dois sentidos, enquanto os demais ocupam os nós apenas no sentido que trafegam.

Figura 31 – Desenho esquemático da ferrovia na confluência de tráfego próximo ao pátio de Piaçaguera (Fonte: Autoria própria)

4.1.6.7.2 Pátio de Descarga

O layout do pátio de descarga será considerado como mostra a Figura 32.

Figura 32 – Pátio de descarga (Fonte: Autoria própria)

As operações no pátio de descarga de minério de ferro podem ocorrer com e sem desmembramento de composição para o descarregamento. O modelo já deve ser criado permitindo que estas alternativas sejam testadas.

4.1.6.7.3 Pátio de Carregamento na Mina

O terminal ferroviário na mina possui um pátio de carregamento com dois silos, os quais podem carregar dois trens simultaneamente.

O esquema ilustrativo da Figura 33 mostra as características do terminal que será considerado neste estudo. Os trens serão carregados em um pátio projetado em formato de pera com dois silos de maneira a efetuar um carregamento dinâmico e simultâneo.

Figura 33 – Desenho do terminal de carregamento de trens na mina (Fonte: Autoria própria)

4.1.6.8 Interrupções na Via

4.1.6.8.1 Manutenção da Via

A manutenção na via pode ser considerada dividindo o percurso da ferrovia em segmentos, que variam de acordo com a filosofia operacional, considerando que a cada dia útil, autos de via circularão interferindo na circulação dos outros trens, entre às 7:00 e às 19:00. Ressalta-se que com o aumento da demanda, os intervalos de manutenção se tornarão mais escassos e a necessidade de manutenção maior, tornando-se fundamental que o desempenho das equipes de manutenção sejam elevados (HENRIQUE, 2006).

Estes autos de via serão inseridos na simulação, considerando que no período determinado num trecho aleatório oscilará entre livre e ocupado, em 10 e 50 minutos, respectivamente.

Nas linhas singelas, o trecho poderá ser num pátio ou na via principal.

Na linha dupla, a interrupção ocorrerá em apenas um sentido.

4.1.6.8.2 Acidentes

Os seguintes dados de acidentes, como a ocorrida em 2002 em Santos ilustrado na Figura 34, serão considerados para a elaboração do modelo:

Figura 34 – Acidente em Santos/SP – 22/Maio/2002 (Fonte: PORTO, 2013)

- Número de acidentes por mês;
- Cada acidente causará interrupção do tráfego por um determinado período de horas numa proporção pré-estabelecida;
- Todo o trem durante um período levará um determinado tempo a mais para percorrer o trecho onde houve o acidente. Isto é devido as operações realizadas no local após o acidente;

4.1.7 Lógica do Porto e Parâmetros de Entrada

4.1.7.1 Configurações Operacionais

Este sistema tem como principal objetivo estocar e exportar os produtos de minério de ferro proveniente da mina. Este sistema foi subdividido em 3 subsistemas (recebimento, pátio e expedição), conforme representado na Figura 35.

Figura 35 – Subsistemas do Porto (Fonte: Autoria própria)

Cada cor do fluxograma acima representa um subsistema e o mesmo está discriminado na Figura 36.

Figura 36 – Subsistemas do Porto discriminado (Fonte: Autoria própria)

Como pode ser observado, o modelo não simulará o canal de acesso, pois o mesmo necessita de informações do fluxo dos portos vizinhos existentes e

futuros, entretanto a influência de terceiros será considerado como indisponibilidade do canal.

4.1.7.2 Recebimento

Os produtos de minério de ferro chegarão ao terminal por via ferroviária, sendo descarregados através de 2 viradores de vagões, Figura 37. Os viradores de vagões terão inicialmente capacidade para descarregar dois vagões por ciclo, entretanto é importante inserir no modelo a possibilidade de virar de 1 a 4 vagões por vez, possibilitando estudos futuros e evitando retrabalhos mais onerosos.

Figura 37 – Viradores de Vagões (Fonte: GOOGLE SKETCHUP, 2012; THYSSENKRUPP, 2012)

A operação tem início com o “puxador” de vagões, o qual puxa e posiciona os vagões no interior do virador, após isso a composição será travada longitudinalmente para evitar deslocamentos durante a rotação dos vagões.

Descarregados os vagões, a composição será liberada das travas dando início a um novo ciclo de descarregamento.

O material será descarregado em moegas de regularização, dotadas de alimentadores de sapatas para regularização da alimentação do sistema de correias transportadoras. O material é então transportado até o pátio de estocagem, onde será empilhado através das máquinas combinadas empilhadeiras/recuperadoras em pilhas longitudinais.

O sistema de recebimento de produtos de minério possui, além de balança integradora, uma torre de amostragem para coleta e quarteamento das amostras.

O virador de vagões não poderá virar os dois vagões, caso os silos abaixo estejam cheios ou se os trilhos depois do virador estejam ocupados.

4.1.7.3 Pátio

O pátio de estocagem, Figura 38, recebe o material que provém dos viradores de vagões, transportadores de correia e máquinas de pátio (empilhadeiras/recuperadoras combinadas), tendo como limite máximo por produto, o volume inserido na interface. Se esse volume máximo for atingido, o pátio não suportará mais a entrada de minério, parando o processo.

O pátio será dividido em pilhas, que já serão pré-definidas em relação a qual material cada uma irá armazenar. Os materiais são empilhados e recuperados a partir de 3 máquinas de pátio (empilhadeiras/recuperadoras combinadas).

Figura 38 – Pátio do porto (Fonte TOWNSVILLE BULLETIN, 2012)

O layout das pilhas estudado é conforme o esquema apresentado na Figura 39.

Figura 39 – Pilhas do Pátio do porto (Fonte: Autoria própria)

As capacidades das pilhas por tipo de produto de minério disposto, deve ser representado conforme a Tabela 11, na mesma configuração de cores previstas no esquema acima, sendo os valores presentes nela meramente ilustrativos.

Tabela 11 – Capacidade das Pilhas

Capacidade (unidade “z” meramente ilustrativa)	Material 1	Material 2	Material 3
Linha 1	1,8z	1,8z	1,5z
Linha 2	1,8z	1,8z	1,6z
Linha 2	1,8z	1,8z	1,6z
Linha 3	1,1z	1,1z	0,9z
Linha 4	1,0z	1,0z	0,8z
Total	7,5z	7,5z	6,4z

É importante notar que para uma boa operação do porto, cada máquina combinada (empilhadeira/recuperadora) tem que poder carregar o maior navio completamente. Isto é equivalente a dizer que no pior caso, a capacidade do material 3 na terceira linha de máquinas de $0,9z + 0,8z = 1,7z$, deve ser maior do que a capacidade do maior navio.

4.1.7.4 Expedição

O material empilhado será retomado pelas máquinas de pátio combinadas empilhadeiras/recuperadoras.

Para o sistema de retomada, a exemplo do sistema de recebimento, será adotada torre de amostragem para coleta e quarteamento das amostras.

O material retomado será transportado por transportador de correia através da ponte de acesso até o píer, onde será embarcado em navios previamente definidos através do Carregador de Navios em um dos 2 berços.

4.1.7.5 Frota de Navios

A capacidade da frota de navios do estudo variou de 40 a 120 mil toneladas. A Tabela 12 é um exemplo de informações necessária dos navios para o modelo.

Tabela 12 – Frota de Navios

	% do material	Material a transportar por ano (t)	Tipo do navio	% do material a ser exportado por tipo de navios	Quantidade de material transportado por tipo de navio (t)	Tipo	Toneladas carregadas no berço (t)	Máxima capacidade de carregamento (t/h)	Número de porões	Número de navios (viagens)	Tempo médio entre chegada de navios (h)	Total realmente transportado (t)
Material 1	40	4,000,000	1	52.5	2,100,000	Capesize	120,000	8,000	7	18	480.0	2,160,000
			2	37.5	1,500,000	Panamax	75,000	6,000	7	20	432	1,500,000
			3	10	400,000	Handymax	60,000	4,000	5	7	1234.3	420,000
Material 2	40	4,000,000	11	52.5	2,100,000	Capesize	120,000	8,000	7	18	480.0	2,160,000
			12	37.5	1,500,000	Panamax	75,000	6,000	7	20	432	1,500,000
			13	10	400,000	Handymax	60,000	4,000	5	7	1234.3	420,000
Material 3	20	2,000,000	21	52.5	1,050,000	Capesize	120,000	8,000	7	9	960.0	1,080,000
			23	37.5	750,000	Panamax	75,000	6,000	7	10	864.0	750,000
			24	10	200,000	Handymax	60,000	4,000	5	3	2880.0	180,000
										121		10,215,000

Com as informações listadas a cima, pode-se fazer uma simulação suficientemente válida para os níveis de estudos propostos. Quatro variáveis importantes na tabela são:

- Máxima capacidade de carregamento (t/h): Devido a retirada do lastro do navio e características estruturais, um navio de menor porte não pode ser carregado com a capacidade máxima do empilhamento;
- Número de porões: Cada porão do navio deve ser carregado na sequência e na quantidade de vezes necessária que for estipulada pela sua equipe, para evitar quebras na estrutura. Com isso, o número de porões é importante, pois o período de troca de porões reduz o tempo disponível para carregamento;
- Quantidade de material transportado por tipo de navio (t): Quantidade de material pretendida a carregar nos navios daquele tipo. No caso do Material 1, o Capesize é de 2.100.000 t, que é equivalente a 17,5 navios;

- Total realmente transportado (t): Quantidade de material realmente carregado nos navios daquele tipo. No caso do Material 1, o Capesize é de 2.160.000 t, que é equivalente a 18 navios.

A numeração do tipo do navio apresenta “pulos” entre os matérias, isto é importante para, caso seja necessário no futuro, realizar estudos com uma frota maior de navios, o modelo já estará apto a isso.

4.1.7.6 Navegação do Canal

A navegação de entrada e saída do canal não é modelada, apenas considerada como uma interferência. Esta interferência foi de que navios esperam numa fila para entrar no canal, que é uma distribuição triangular com valor mais provável de 6 horas e mínimo valor de -50% e máximo valor de +50% (NETTO et al., 2012).

4.1.7.7 Atracação e Desatracação

Apenas um navio é permitido atracar por berço, independente de suas dimensões e ambos os berços não podem ter atracação ou desatracação ao mesmo tempo.

Tempo de atracação e desatracação varia para cada tipo de navio e das condições de tempo. Pode-se simplificar o modelo utilizando uma função discreta de probabilidade igual para todos os tipos de navios, como a apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 – Tempo de atracar e desatracar

Tempo de atracar ou desatracar (minutos)	Probabilidade (%)
25	10
35	30
50	40
85	15
100	5

Devidos as características do porto, a maré não influencia na entrada ou saída dos navios, entretanto durante mau tempo, os navios não são permitidos de atracar ou desatracar.

Navios não podem atracar se não houver material suficiente para carregá-los. Isto é feito para evitar o travamento do porto, que poderia ocorrer caso dois navios sem material suficiente para enchê-los atracassem e dois trens com material de pilhas já cheias estivessem nos viradores de vagões.

Ambos os berços operam independentemente do outro, podendo os navios serem carregados simultaneamente com qualquer combinação de material recuperado das pilhas de estocagem.

Assumido que não haverá restrição de comprimento ou dimensão dos navios e que rebocadores e pilotos estarão disponíveis conforme necessário.

4.1.7.8 Carregamento de Navios

- Assumido que burocracias de alfândega, relatório de inspeção e documentação, não influenciarão ou retardarão o tempo de carregamento de navios;
- Assumido que o *“ballasting”* e *“deballasting”* serão automáticos, não sendo limitantes em termos de duração no carregamento;
- Um carregador de navios por berço;
- Últimos 5% do carregamento serão limitados a metade da taxa nominal do carregador de navios;
- Assumido de ocorrer abastecimento de navios paralelamente com o carregamento de outro navio, sem que haja atraso em nenhuma hipótese;
- Considerado que cada troca de porão, corresponde a um atraso de 30 minutos, e que cada porão é carregado completamente antes de haver a troca de porão. Embora saiba-se que cada porão é carregado mais de uma vez (em torno de 2,2 vezes, com tempo médio de 13 minutos), todos os tempos acumulados em um porão são somados e estimados em 30 minutos, simplificando o modelo;
- Todos os navios serão carregados com um único produto;
- Assumido que o carregamento não sofrerá interrupção durante a ocorrência de mau tempo;
- O carregamento deverá ser interrompido, caso o inventário esteja esgotado ou os transportadores de correia, as máquinas de pátio

(empilhadeiras/recuperadoras combinadas) ou o carregador de navios estejam fora de funcionamento.

4.1.7.9 Demurrage

Demurrage é a multa que será aplicada ao operador do porto a cada hora que o navio esteja sob sua responsabilidade, excedendo as horas especificadas em contrato.

4.2 ANÁLISE DO MODELO ESTUDADO

4.2.1 Tamanho e Número das Replicações

O tamanho das replicações é o período de tempo em que a simulação será gerada e para o presente estudo ela é de 525,600 minutos (um ano).

As replicações são realizadas com entradas aleatórias gerando resultados aleatórios que serão analisados estatisticamente. A priori, deve-se realizar um número suficiente de replicações, até que obtenha-se pela terceira vez consecutiva o mesmo valor para a média acumulada de variáveis chaves, na precisão requerida (RIBEIRO, 2003; JULIÁ, 2010).

As variáveis escolhidas foram Ocupação dos Berços e dos Viradores de Vagões, representado na Figura 40.

Figura 40– Ocupação acumulada por número de replicações (Fonte: Autoria própria)

Sendo assim, os resultados das simulações serão calculados pela média das saídas de 25 replicações, garantindo a consistência estatística dos mesmos.

4.2.2 Operações na Mina / Usina de Beneficiamento

As operações detalhadas na mina não foram analisadas. Considerou-se que os investimentos necessários para atender as capacidades de base foram realizados.

Para obtenção dos resultados, considerou-se o limite do modelo nas 2 estações de carregamento de vagões das composições ferroviárias (trens), que serão previstas na usina de beneficiamento. A usina foi modelada como “*Black Box*” fornecendo material constantemente às pilhas de estocagem, com exceção das falhas e paradas programadas. O nível de estocagem foi modelado de maneira a não permitir parada da usina, devido a pilhas cheias, e de carregamento do trem, devido a pilhas vazias.

4.2.2.1 Pilhas de Estocagem de Produtos

As pilhas de estocagem foram modeladas de maneira a não permitir parada da usina devido às pilhas cheias e de carregamento do trem devido às pilhas vazias. Com isso, é obtida a capacidade de estocagem necessária, a partir da diferença entre a quantidade máxima e mínima do perfil das pilhas. A Figura 41 é um exemplo de um perfil de pilhas.

Figura 41– Perfil de pilhas de estocagem de produtos (Fonte: Autoria própria)

Os valores obtidos de cada replicação são analisados estatisticamente, primeiramente com a obtenção da média, desvio padrão e número de amostras. Posteriormente pode-se testar Intervalos de Confiança da Média e intervalos de sigma para obter o máximo valor necessário (PETERNELLI, 2012; PASQUALI, 2012). A Tabela 14 mostra a análise realizada para a pilha de material 1, e considerando um Intervalo de Confiança da Média de 99,9% e um intervalo de 3 sigma (equivalente a 99,73% de probabilidade de resultados) é obtido 498,641 t.

Tabela 14 – Análise da capacidade da pilha em toneladas de material 1

	Número de amostras	74	74	74	74
	Desvio padrão	13118	13118	13118	13118
	Intervalo de Confiança	2989	3928	5018	5933
	alfa	0.05	0.01	0.001	0.0001
Média (t)	Intervalo de confiança de:	95%	99%	99.9%	99.99%
454269	Média máxima	457257	458197	459286	460202
Valor máximo no intervalo sigma (t)	3 sigma [99.73%]	496612	497551	498641	499556
	2 sigma [95.44%]	483494	484433	485523	486438

A Figura 42 mostra graficamente como o cálculo é realizado.

Figura 42– Cálculo da capacidade da pilha (Fonte: Autoria própria)

4.2.2.2 Trens Carregados por Período

A análise dos trens carregados por período é importante para definir a fluidez do sistema e sua variação após eventos. As Figura 43 e Figura 44 mostram exemplos das duas melhores visualizações desta análise. A Figura 43 ilustra a quantidade de trens carregados por semana subdivididos pelos tipos diferentes de trens.

Figura 43 – Quantidade de trens carregados por semana (Fonte: Autoria própria)

Figura 44 – Quantidade de trens carregados por dia (Fonte: Autoria própria)

4.2.3 Operações na Ferrovia

4.2.3.1 Ciclo dos Trens

O ciclo completo do trem, que engloba desde o carregamento de todos os vagões na mina / usina de beneficiamento em Corumbá (MS), transporte por ferrovia até o terminal portuário em Santos (SP), descarregamento de todos os vagões e retorno do trem vazio, desde o terminal portuário até à mina / usina de beneficiamento, foi analisado dividindo-se as operações descritas acima, conforme segue.

Ciclo total:

Ciclo ida:

- Travessia dos trechos
- Paradas (abastecimento, troca de equipe, etc)
- Carregamento (média)
- Espera em cruzamentos e retomada da velocidade (média)

- Ciclo volta:
 - Travessia dos trechos
 - Paradas (abastecimento, troca de equipe, etc)
 - Descarregamento (média)
 - Espera em cruzamentos e retomada da velocidade (média)

A Figura 45 apresenta o ciclo total dos trens, já na Figura 46 é apresentado o tempo que os trens carregados levam na ida da mina / usina de beneficiamento em Corumbá (MS) até o Porto em Santos (SP) e na Figura 47 o tempo que os trens descarregados gastam na volta para mina / usina de beneficiamento.

Os pontos dos primeiros ciclos são desprezados por se tratarem de dados obtidos do modelo ainda não estabilizado.

Figura 45 – Ciclo total do trem (Fonte: Autoria própria)

Figura 46 – Ciclo dos trens carregados (Fonte: Autoria própria)

Figura 47 – Ciclo dos trens descarregados (Fonte: Autoria própria)

4.2.3.2 Utilização da capacidade da Ferrovia

A capacidade de um trecho varia de acordo com o layout, volume de tráfego, condições operacionais e nível de serviço esperado (CHRISPIM, 2007), mostrado na Figura 48.

Figura 48 – Medidas de Capacidade Ferroviária (Fonte: CHRISPIM, 2007)

Os dados de utilização da capacidade da ferrovia refletem quanto tempo um trem permanece num pátio ou num trecho da ferrovia. Quando a utilização da capacidade dos pátios encontra-se próximo a zero, significa que a maior parte dos trens não para naquele pátio. No entanto, os trechos não apresentam valores iguais a zero, pois a ocupação de um trecho é dado pelo tempo que todos os trens levam para percorrê-lo, em relação ao tempo total da simulação.

A Figura 49 mostra a utilização das capacidades dos nós, apenas para os trens em direção ao terminal portuário em Santos (SP). Este gráfico apresenta picos de ocupação em estações próximas a pontos de troca de equipe e pontos de parada para abastecimento, por exemplo os pátios de Campo Grande (26) e Andradina (51).

Figura 49 – Utilização da capacidade dos pátios pelos trens carregados (Fonte: Autoria própria)

A Figura 50 mostra a utilização da capacidade dos pátios dos trens indo no sentido para Corumbá (MS). Esta figura é muito diferente da anterior, pois os picos de maior utilização são menos definidos e conforme a produção transportada aumenta, mesmo mantendo o número de trens em circulação, os picos começam a se unir, formando grandes blocos de elevada ocupação. Os picos devido ao transporte de menor demanda são causados pelos pontos de troca de equipe e abastecimento ou por confluência de fluxos ou por trechos extensos. Por exemplo, os pátios km 1227 (5), Campo Grande (26), Ribas do Rio Pardo (31) e entrada da cremalheira (134) são locais onde ocorre a entrada e a saída de trens; Ferreiros (39), Campo Grande (26), Botucatu (79) e Embu-Guaçu (111) são pontos de abastecimento e/ou troca de equipe. Araçatuba (57) e Pereiras (84) são pátios que precedem trechos de grandes extensões, cujo tempo de percurso ultrapassa 30 minutos.

Quando a produção é aumentada, os picos de utilização deixam de ser pontuais, o que forma um bloco de elevada utilização devido à propagação das filas. Nestas situações os tempos totais dos ciclos aumentam e a produtividade dos trens diminui, uma vez que eles param em mais pátios e esperam mais tempo em cada parada.

Figura 50 – Utilização da capacidade dos pátios pelos trens descarregados (Fonte: Autoria própria)

Pelos resultados mostrados na Figura 50, relativos à utilização do nó 43 variando a quantidade anual transportada, é possível verificar que até aproximadamente X Mtpa a utilização cresce linearmente com o aumento da produção. Após este ponto a taxa de utilização aumenta exponencialmente evidenciando a saturação da via.

Figura 51 – Ocupação do pátio 43 (Garcias) para os trens no sentido para a mina (Fonte: Autoria própria)

A Figura 52 mostra a utilização da capacidade dos trechos de via singela, ou seja, dos tempos que os trens utilizam o trecho em relação ao total. O Pátio Laranjal Paulista (85), além de ter o trecho seguinte para os trens no sentido Corumbá (MS) de extensão elevada, é um ponto de alta utilização da capacidade pois é o local onde a via deixa de ser singular e passa a ser dupla. Os trens que se locomovem no sentido para Corumbá (MS), esperam a montante deste ponto na via dupla para entrar na via simples, causando uma fila para passar por este trecho e aumentando sua utilização. O trecho mostrado pelo número 27 é o trecho que antecede o ramal utilizado pela VALE em Atílio Inocêncio. Este trecho também apresenta utilização elevada devido ao fluxo de trens no desvio deste ramal. O mesmo ocorre com os números 27, 49, 71, 72. referentes a Lagoa Rica, Jupiá, Bauru e Agudos, os quais são trechos localizados próximos a pontos de entrada ou saída de tráfego. Os trechos ressaltados pelos números 55, 76 e 82 apresentam elevadas extensões cujos tempos de percurso são superiores a 30 minutos.

Figura 52 – Ocupação dos trechos de via singela (Fonte: Autoria própria)

Para verificar os locais mais utilizados, considerando pátios e trechos, criou-se os “setores”, definidos neste estudo como sendo um trecho em questão somados à metade do tempo que o trem permaneceu nos pátios que tendem a entrar no trecho, conforme Figura 53. A Figura 54 contém os resultados obtidos utilizando esta abordagem.

Figura 53 – Configuração de um setor (Fonte: Autoria própria)

*Setor $[(\text{trecho } i) + (\text{nó } i \text{ na direção porto}) + (\text{nó } i+1 \text{ na direção mina})] / 2]$

Figura 54 – Utilização dos setores* (Fonte: Autoria própria)

Para o comportamento da ferrovia é possível verificar, pelos resultados obtidos, que os fatores que provocam maiores utilizações são: (i) a confluência de fluxos, pontos onde trens entram e saem do sistema, pois são trechos onde ocorrem conflitos entre demandas e, conseqüentemente, tempos maiores de espera para ocupar os trechos; (ii) trechos de extensão elevadas, que podem provocar filas de trens que aguardam a liberação do trecho para adentrá-lo; (iii) pontos de parada para troca de equipe e para o abastecimento, pois os trens localizados nos pátios anteriores e posteriores devem esperar a conclusão das operações do trem parado para prosseguir. Observou-se, no entanto, que os trechos com utilização crítica, são os que ocorrem simultaneamente nas proximidades, duas ou mais situações descritas acima.

A Figura 55 mostra o número de composições em operação durante um ano de simulação para diferentes produções.

Figura 55 – Número de composições em operação (Fonte: Autoria própria)

A Figura 55 permite a obtenção da capacidade da ferrovia e o número de composições necessárias para sua operação normal.

4.2.3.3 Diagrama espaço tempo

Diagramas espaço x tempo representam o percurso das composições em um tempo determinado, permitindo a visualização de cruzamentos e a estimativa da capacidade da via. Na Figura 56, representou-se o movimentos dos trens nos trechos de via singela durante um intervalo de 24 horas, escolhido num período sem acidentes, somente para determinados trens. Estes resultados validam que, no modelo construído, os cruzamentos entre trens ocorrem apenas nos pátios.

Figura 56 – Diagrama espaço x tempo para 1 dia de operação, considerando somente trechos em via singela (Fonte: Autoria própria)

4.2.3.4 Material Rodante para o Ramp-Up

A Figura 55 mostra quais os investimentos demandados de composições em operação para o “ramp-up” da ferrovia.

4.2.3.5 Material Rodante para capacidade desejada

As Figura 57 e Figura 58 mostradas abaixo, apresentam um exemplo do perfil do número de locomotivas e vagões em manutenção ao longo do ano. Elas permitem determinar o número necessário de locomotivas e vagões para a operação não ser interrompida.

Figura 57 – Número de locomotivas não operantes ao longo do ano (Fonte: Autoria própria)

Figura 58 – Número de vagões não operantes ao longo do ano (Fonte: Autoria própria)

4.2.4 Operação no Porto

Os produtos de minério de ferro chegarão ao terminal portuário por via ferroviária, sendo descarregados através de Viradores de Vagões. Os Viradores de Vagões terão inicialmente capacidade para descarregar dois vagões simultaneamente, por ciclo. O pátio de estocagem recebe os produtos de minério de ferro que provém dos Viradores de Vagões, de tal forma que em caso do

volume atingir a capacidade de estocagem do pátio, não ocorrerá a entrada de minério, parando o processo. Os materiais serão empilhados e recuperados a partir de 3 máquinas de pátio (Empilhadeira / Recuperadora combinada).

Desta maneira, o porto foi analisado quanto às operações de recebimento, de armazenagem no pátio e de expedição dos produtos de minério de ferro, conforme itens a seguir.

4.2.4.1 Frota de navios

A Figura 59, mostra a ocupação do Virador de Vagões e do Berço, considerando 3 máquinas de pátio (Empilhadeira / Recuperadora Combinada) para uma frota de navios com maior capacidade (frota A).

Figura 59 – Utilização do Virador de Vagões e do Berço, para frota determinada (Fonte: Autoria própria)

A Figura 60, mostra a ocupação do Virador de Vagões e do Berço, considerando 3 máquinas de pátio (Empilhadeira / Recuperadora Combinada), considerando uma frota com utilização de navios menores (frota B).

Figura 60 – Utilização do Virador de Vagões e do Berço, para frota de navios menores (Fonte: Autoria própria)

Como já esperado, a ocupação dos berços para a frota de navios menores é maior, resultando em uma diminuição significativa da capacidade.

4.2.4.2 Equipamentos

A Figura 61 mostra a ocupação média dos dois Viradores de Vagões e dos dois Berços, nos casos da capacidade desejada e máxima, considerando o modelo do porto desconectado do modelo da ferrovia, assim sendo, os resultados não são limitados pela ferrovia.

Embora não esteja indicado, a capacidade máxima obtida com a Frota B (navios com menores capacidades) é menor do que a obtida na Frota A (navios com maiores capacidades).

Figura 61 – Utilização do Virador de Vagão e do Berço para a capacidade desejada e máxima
(Fonte: Autoria própria)

A Figura 62, mostra a ocupação do Virador de Vagões e do Berço, nos casos com 1 ou 2 Viradores de Vagões Duplo e com a utilização de um Carregador de Navios tipo Travelling ou Dual Quadrant, para a exportação desejada. Observa-se na figura, que com a utilização de dois Viradores de Vagões Duplo a ocupação reduziu de 60% para 30%. Com a utilização do Carregador de Navios tipo Dual Quadrant, a ocupação diminuiu de 79% para 72% e a ocupação dos Viradores de Vagões diminuíram também devido a maior disponibilidade das máquinas de pátio, visto que os Carregadores os requisitam menos.

Figura 62 - Utilização do Virador de Vagão e do Berço, que consideram a produção desejada
(Fonte: Autoria própria)

4.2.4.3 Embarque Direto

O Embarque Direto foi avaliado considerando o período de utilização deste e a disponibilidade do porto. Ele mostrou-se pouco influente na disponibilidade do porto, ordem de 0,2% da ocupação dos berços, visto que ele foi modelado para ser utilizado apenas em situações emergenciais, quando a pilha do material do trem estivesse cheia, ou a pilha do material do navio estivesse vazia, ou ainda as máquinas dos pátio estivessem fora de operação.

4.2.4.4 Evolução das Pilhas de Minério do Porto

A Figura 63 mostra a evolução das pilhas de minério no porto para o caso base que corresponde a configuração básica do sistema.

Figura 63 - Evolução das pilhas de minério no porto (Fonte: Autoria própria)

4.2.4.5 Demurrage

Os resultados obtidos de Demurrage, considerando um tempo de permanência nas operações portuárias sem penalidades e multa proporcionais, foram pouco representativos para a análise da capacidade desejada, ficando a baixo dos US\$0,50/t impostos no caso base.

Alguns especialistas indicam que a capacidade do porto não deve ser analisada pela ocupação dos equipamentos, mas sim pela taxa de demurrage máxima que é aceitável pagar. Em operações de certos portos é aceitável pagar valores altos de demurrage para conseguir uma grande ocupação dos berços e consequentemente de exportação.

4.2.4.6 Variação do número de produtos

A variação do número de produtos de 3 para 2 e posteriormente para 1 mostrou alteração insignificante na ocupação dos Viradores de Vagões e Berços, entretanto mostrou grande variação no Demurrage, Figura 64. Caso o número de produtos aumente, o Demurrage pode limitar a capacidade de exportação do porto.

Figura 64 – Variação do número de produtos (Fonte: Autoria própria)

4.2.4.7 Equipamentos para o Ramp-Up

O roteiro, apresentado na Tabela 15, é a maneira ideal de mostrar quais os investimentos demandados para o “ramp-up” do porto. Os valores nela são meramente ilustrativos e demonstram um ramp-up de A, B, C e F Mtpa até a capacidade máxima atingida.

Tabela 15 - Roteiro de investimentos para o Ramp-Up do Porto

Capacidade do Sistema (Mtpa)	Viradores de Vagões	Empilhadeira/ Recuperadoras	Berços (Cada um com um Carregador de Navio)
A	A1	B1	C1
B	A1	B1	C1
C	A1	B1	C1
D	A1	B1	C1
E	A1	B1	C1+C2=C3
F	A1	B1+B2=B3	C3
G	A1	B3	C3
H	A1+A2=A3	B3	C3

4.2.5 Paradas no Sistema

Para analisar os efeitos de paradas prolongadas no sistema integrado, foi realizado os seguintes testes:

- Parada na estação de carregamento de trens por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas;
- Parada em 6 pontos da via por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas mostrados pelas setas vermelhas na Figura 65;

Figura 65 – Pontos de paradas na ferrovia (Fonte: Autoria própria)

- Parada na estação de descarregamento de trens por períodos de 12, 24, 36 e 48 horas;
- Parada na estação de carregamento de navios por períodos de 1 a 19 dias;

As seguintes informações foram analisadas para permitir completa compreensão dos efeitos gerados pelas paradas:

- Ocupação dos pátios de ida na via singela e dos trechos na via dupla em intervalos de 12 horas;
- Ocupação dos pátios de volta na via singela e dos trechos na via dupla em intervalos de 12 horas;
- Filas de composições para entrar na via em intervalos de 12 horas;
- Filas de navios para entrar no canal em intervalos de 12 horas;
- Material transportado pelas composições da mina ao porto no período de um ano;

A Figura 66 mostra a ocupação dos pátios de volta na via singela e dos trechos na via dupla em intervalos de 12 horas.

Figura 66 – Ocupação dos pátios após uma parada em intervalos de 12 horas (Fonte: Autoria própria)

As linhas representam a ocupação dos pátios de volta na via singela e dos trechos na via dupla em intervalos de 12 horas, sendo mostrado de vermelho ocupação acima de 60% e em vermelho escuro de 100%.

A Tabela 16 mostra os resultados da análise de paradas, e embora esteja de difícil visualização, ela é detalhada ao longo deste documento em melhor clareza.

Tabela 16 – Resultados da análise de paradas

[illegible]

4.2.5.1 Tempo de recuperação da ferrovia

As primeiras colunas da Tabela 16 estão ampliadas a seguir (Tabela 17). A coluna “Parada no:” é o local onde ocorreu a interrupção. “Trechos afetados” são os trechos consecutivamente afetados pela interrupção a oeste (mais próximo da mina) e a leste (mais próximo do porto).

Tabela 17 – Trechos afetados pelas paradas

Paradas		Trechos afetados			
		Na volta		Na ida	
Parada no:	Horas paradas:	Trechos a oeste da parada afetados	Trechos a leste da parada afetados	Trechos a oeste da parada afetados	Trechos a leste da parada afetados
Trecho 30 BÁLSAMO a RIBAS DO RIO PARDO	12				
	24				
	36				
	48				

As colunas ampliadas da Tabela 16 a seguir (Tabela 18), “Tempo de recuperação (Dias)”, representam o tempo de recuperação necessário para que os pátios da via singela ou os trechos da via dupla, retornem a ter ocupação menor que 60%, após o efeito da parada ser sentido por estes.

Tabela 18 – Tempo de recuperação dos trechos afetados pelas paradas

Paradas		Tempo de recuperação (Dias)								
		Trechos na volta								
Parada no:	Horas paradas:	15 - Agachi	30 - Bálamo	45 - Arapuá	60 - Penápolis	75 - Paranhos	90 - Entre Iperó e Canguera	105 - Entre Canguera e Evangelista	120 - Entre Evangelista e Paratinga	135 - Entre Pereque e Porto
Trecho 30 BÁLSAMO a RIBAS DO RIO PARDO	12									
	24									
	36									
	48									

As colunas ampliadas da Tabela 16 a seguir (Tabela 19), “Filas de entrada nos trechos”, representam o tempo de recuperação necessário para que as filas de entradas de trens na via principal retornem ao normal. A coluna “Tempo total para a ferrovia voltar ao normal” representa o tempo após o inicial da parada para que toda a ferrovia retorne a as condições aceitáveis.

Tabela 19 – Tempo de recuperação das filas afetadas pelas paradas

Paradas		Tempo de recuperação (Dias)										
		Filas de entrada nos trechos										Tempo total para a ferrovia voltar ao normal
Parada no:	Horas paradas:	2 - Corumbá	6 - Porto Fluvial (Agente Inocêncio)	26 - Campo Grande	31 - Ribas do Rio Pardo	48 - Três Lagoas	100 - Alça de Pantojo	133 - Margem Direita	134 - Cremalheira	136 - TUF	137 - Margem Esquerda	
Trecho 1 TERMINAL DE CARGAS a MARIA COELHO	12											
	24											
	36											
	48											

4.2.5.2 Tempo de recuperação do porto

As colunas ampliadas da Tabela 16 a seguir (Tabela 20), “Filas de navios”, representam o tempo de recuperação necessário para que as filas de entradas de navios no canal retornem ao normal. A coluna “Tempo total para o porto voltar ao normal” representa o tempo após o inicial da parada para que o porto retorne a as condições aceitáveis. A coluna “Número máximo de navios na fila” mostra o pico de navios em espera.

Tabela 20 – Tempo de recuperação do porto afetado pelas paradas

Paradas		Tempo de recuperação (Dias)		Número máximo de navios na fila
Parada no:	Horas paradas:	Fila de navios	Tempo total para o porto voltar ao normal	
Carregamento de Navios no Porto	5*24			
	10*24			
	15*24			
	17*24			
	19*24			

A tabela é muito completa, e consequentemente muito extensa para ser apresentada a tomadores de decisões, que não possuam grande embasamento técnico, para isso o resumo dos resultados de recuperação pode ser apresentado conforme a seguir:

- Paradas na ferrovia (Tabela 21):

Tabela 21 – Tempo de recuperação da ferrovia devido a paradas na via

Horas paradas:	Tempo de recuperação (dias)	
	Filas de entrada na ferrovia	Trechos da ferrovia
12	X1 a X2	X9 a X10
24	X3 a X4	X11 a X12
36	X5 a X6	X13 a X14
48	X7 a X8	X15 a X16

- Paradas na estação de carregamento de trens (Tabela 22):

Tabela 22 – Tempo de recuperação da ferrovia devido a paradas na estação de carregamento de trens

Horas paradas:	Tempo de recuperação (dias)
	Filas de entrada na ferrovia
12	Impacto não significativo
24	X17
36	X18
48	X19

- Paradas na estação de descarregamento de trens (Tabela 23):

Tabela 23 – Tempo de recuperação da ferrovia devido a paradas na estação de descarregamento de trens

Horas paradas:	Tempo de recuperação (dias)
	Filas de entrada na ferrovia
12	Impacto não significativo
24	X20
36	X21
48	X22

- Paradas na estação de carregamento de navios (Tabela 24):

Tabela 24 – Tempo de recuperação do porto e ferrovia devido a paradas na estação de carregamento de navios

Dias paradas:	Tempo de recuperação (dias)	
	Filas de entrada na ferrovia	Filas de navios após o termino da parada
1	Impacto não significativo	X24
2	Impacto não significativo	X25
3	Impacto não significativo	X26
5	...	X27
10	...	X28
15	...	X29
19	X23	X30

A Figura 67 mostra o período, contados a partir do início da parada, para que a fila de navios volte ao normal.

Figura 67 – Dias para a fila de navios voltar ao normal (Fonte: Autoria própria)

A Figura 68 mostra que paradas de até X dias pouco afetam o tempo de recuperação da fila de navios no porto. O degrau existente no dia X é devido as interações entre as chegadas de navios e a fila causada pela parada.

Figura 68 – Dias após a parada para a fila de navios voltar ao normal (Fonte: Autoria própria)

A Figura 69 mostra a variação do número máximo de navios na fila de entrada do canal, acima do usual.

Figura 69 – Número máximo de navios na fila acima do usual (Fonte: Autoria própria)

4.2.5.3 Perda na capacidade da ferrovia

A perda de capacidade da ferrovia causada por paradas prolongadas foi realizado adotando as etapas seguintes:

- Foi escolhido um ponto da via (trecho 30) onde ocorreu uma parada por mês, sendo o resultado da produção uma média de 10 anos;
- Esta média é a média de produção das composições da empresa em estudo, como se apenas as composições desta empresa fossem penalizadas pela parada, visto que as outras composições atingiriam a demanda;
- Posteriormente esta perda de capacidade das composições é matematicamente transferida para as outras composições, visto que a ferrovia não iria apenas penalizar a empresa em estudo;

A “% capacidade perdida na ferrovia” representada na Tabela 25 é a capacidade anual da ferrovia perdida devido a uma parada de X horas na via singela.

Tabela 25 – % capacidade perdida na ferrovia

Período da parada (h)	% capacidade perdida na ferrovia
0	Y1
12	Y2
24	Y3
36	Y4
48	Y5

Exemplo 1: uma parada de 36 horas acarreta em uma perda anual da ferrovia de Y4%. Considerando a ferrovia com uma capacidade de 20 pares de trens por dia, esta parada resultaria numa capacidade de $20 \cdot (1 - Y4\%)$ pares de trens por dia.

Exemplo 2: doze paradas de 36 horas espaçadas no ano acarretam em uma perda anual da ferrovia de $12 \cdot Y4\%$. Considerando a ferrovia com uma capacidade de 20 pares de trens por dia, estas paradas resultariam numa capacidade de $20 \cdot (1 - 12 \cdot Y4\%)$ pares de trens por dia.

Figura 70 compara o impacto de um evento no sistema com o impacto teórico (“% estimada perdida no ano”) que seria produzido por uma parada integral no sistema com a mesma duração do evento considerado. Pode-se perceber que enquanto paradas de pequena duração conseguem ser absorvidas pelo sistemas, gerando impactos menores do que o cálculo teórico, paradas de mais de “3x” horas produzem impactos maiores.

Figura 70 – % da capacidade perdida na ferrovia devido a parada (Fonte: Autoria própria)

A Figura 70 mostra que o mais importante é ter uma equipe de recuperação de emergência eficiente, visto que, paradas acima de “3x” horas geram impactos maiores, devido a necessidade de retomada de velocidade das composições e as interações de cruzamentos.

4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos da análise do modelo foram muito promissores e permitiram que as tomadas de decisões fossem realizadas.

O modelo de apresentação dos resultados para os tomadores de decisão, referente ao “ramp-up” mostrados na Tabela 26, foi considerada ideal para exemplificação destes.

Tabela 26 - Roteiro de investimentos para o Ramp-Up do Sistema Integrado

Capacidade do Sistema (Mtpa)	Estações de Carregamento de Trem	Locomotivas	Vagões	Viradores de Vagões	Empilhadeira/ Recuperadoras	Berços (Cada um com um Carregador de Navio)
A	A1	B1	C1	D1	E1	F1
		+B2	+C2			
B	A1	B1+B2=B3	C1+C2=C3	D1	E1	F1
		+B4	+C4			
C	A1	B3+B4=B5	C3+C4=C5	D1	E1	F1
		+B6	+C6			
D	A1	B5+B6=B7	C5+C6=C7	D1	E1	F1
		+A8	+A8			+F2
E	A1	B7+B8=B9	C7+C8=C9	D1	E1	F1+F2=F3
	+1	+B10	+C10			
F	A1+1=A2	B9+B10=B11	C9+C10=C11	D1	E1	F3
		+B12	+C12		+E2	
G	A2	B11+B12=B13	C11+C12=C13	D1	E1+E2=E3	F3
		+B14	+C14	+D2		
H	A2	B13+B14=B15	C13+C14=C15	D1+D2=D3	E3	F3

Correlações não lineares, como a ocupação das máquinas de pátio combinadas (empilhadeira/recuperadora) ou número de composições ferroviárias por Mtpa, foram mostradas pelos resultados do modelo.

O estudo estatístico da capacidade mínima das pilhas de produtos de minério de ferro na mineração necessária para evitar a parada da ferrovia e da usina de beneficiamento mostrou-se muito eficiente, principalmente por permitir, de maneira rápida e prática, a comparação entre resultados de acordo com as probabilidades escolhidas.

A análise de paradas no sistema foi fundamental para determinar pontos críticos da ferrovia que necessitavam de equipe de manutenção de emergência e períodos máximos de indisponibilidade da via permissíveis antes da “onda de atrasos” diminuir significativamente a capacidade da ferrovia.

A análise da ferrovia por “setores”, que avalia conjuntamente um trecho e os pátios que tendem a entrar nele, permitiu a melhor visualização dos pontos de gargalo na ferrovia.

Os resultados referente ao porto mostraram informações importantes, como o demurrage que foi incluído no OPEX, o sequenciamento de montagem de equipamentos que otimizou o programa de investimento de capital e relações entre os equipamentos utilizados e as capacidades máximas tangíveis do porto.

Os resultados também mostraram que há uma grande quantidade de material técnico que se deve dominar antes de fazer um bom estudo. O modelo antes de algumas verificações apresentava respostas que pareciam corretas, mas na verdade não eram. Ficou claro que o modelo assemelhava-se com o sistema, entretanto não agia como ele.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou a simulação para modelar um Sistema Integrado Usina de Beneficiamento (Pátio de Estocagem) – Ferrovia – Porto com o objetivo de auxiliar nas tomadas de decisões entre diversos fatores para atingir a capacidade desejada.

Há neste trabalho quatro elementos distintos:

- Introdução a Simulação, a qual apresenta o material técnico básico necessárias para um bom estudo;
- Metodologia de Simulação, a qual apresenta uma metodologia abrangente para desenvolvimentos de trabalhos de simulação, que podem ser utilizadas em qualquer tipo de sistema;
- Construção do Modelo, a qual apresenta as premissas e dados de entrada necessários para criação de um modelo para o Sistema Integrado Usina de Beneficiamento (Pátio de Estocagem) – Ferrovia – Porto;
- Análise do Modelo, a qual apresenta os dados de saídas do modelo necessários para avaliação de um Sistema Integrado Usina de Beneficiamento (Pátio de Estocagem) – Ferrovia – Porto e sua análise.

Os quatro elementos mostraram-se comprovadamente eficientes para realização de estudos, fornecendo resultados operacionais, através dos quais é possível estimar a eficiência, bem como, analisar o comportamento dos diversos recursos e equipamentos do sistema.

Os resultados obtidos mostram a importância da análise integrada do sistema como um todo, visto que a simulação permitiu avaliar e dar visibilidade a informações despercebidas, que resultavam em conflitos não intuitivos.

A simulação forneceu uma ferramenta poderosa para aumentar o entendimento da dinâmica das operações do sistema integrado “pit to port”, identificando limites de capacidades e possibilitando testes de vários cenários.

Pela consideração de todas as fases de expansão em um único estudo, o programa de investimento de capital foi otimizado na sua totalidade, fornecendo a opção de ignorar investimentos de curto prazo que têm pouco ou nenhum

benefício em fases posteriores de expansão, deslocando o cronograma de outros investimentos de capital.

A principal desvantagem da simulação é que a acurácia do modelo é limitada pela precisão dos dados de entrada. Por exemplo, no sistema ferroviário é necessário a obtenção dos tempos de percurso em simuladores operacionais específicos para esta finalidade que podem conter erros inerentes e um aumento de 20% nestes dados pode resultar em uma perda de capacidade na ferrovia de 30%.

A utilização de uma simulação de eventos discretos para um sistema de produção contínua mostrou-se satisfatório, sendo que, a transformação dos eventos contínuos em discretos não interferiu nos resultados obtidos.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes pontos podem ser objeto de estudo de trabalhos futuros e que preenchem algumas lacunas do presente trabalho:

- Inclusão da usina de beneficiamento, para possibilitar a avaliação do dimensionamento dos equipamentos, a real disponibilidade da usina como um todo e testar as interferências que equipamentos e rotas de processos possam influenciar na capacidade da usina. Além disso, a capacidade da pilha de estocagem de produtos na mineração poderá ser estudada para minimizar custos;
- Inclusão da mina, para possibilitar que se avalie o dimensionamento da frota de equipamentos e sua interferência na usina de beneficiamento;
- Estudo considerando a possibilidade de haver quantidade de produtos acima dos três previstos na usina;
- Estudo considerando a possibilidade de haver quantidade de produtos acima dos três previstos no porto, e possível blendagem;
- Inclusão do canal no modelo;
- Inclusão do traçado do navio até os clientes possibilitando um estudo de um sistema integrado “pit to client”;
- Estudo considerando composições com outras configurações, como maior número de locomotivas ou vagões;

- Estudo considerando mais de um produto de minério de ferro a ser transportado por navio simultaneamente;
- Aumentar o detalhamento de partes do sistema, como os pátios de manobras e terminais;
- Assumir novas premissas e regras de operação que possibilitem novas configurações;
- Implementar Técnicas de Business Process Modeling (BPM) como PDCA ou IDEF-SIM.

6. REFERÊNCIAS

5º BALANÇO DO PAC 2. **5º Balanço Maio/Setembro PAC 2 O Circulo Virtuoso do Desenvolvimento.** Disponível em:

<<http://www.planejamento.gov.br/secretarias/upload/Arquivos/PAC2/p/5BalancoPAC2-ApresentacaoMinistra.pdf>>. Acesso em 4 de Janeiro de 2013.

ALTIOK, T. **Large-Scale Simulation Modeling of Ports and Waterways: Approaches and Challenges.** Workshop on Grand Challenges in Modeling, Simulation and Analysis for Homeland Security, S&T Directorate, US DHS, Washington, D.C., EUA. 17-18 de Março de 2010.

ANNINO, J. S.; RUSSELL, E. **The Ten Most Frequent Causes of Simulation Analysis Failure – And How to Avoid Them!**. Simulation Today, volume 32. Junho de 1979.

ASPEREN, E.; DEKKER, R.; POLMAN, M.; ARONS, H. S. **Modeling Ship Arrivals in Port.** Winter Simulation Conference. 2003.

BANKS, J.; GIBSON, R. R. **Don't Simulate When... 10 Rules for Determining when Simulation is Not Appropriate.** IEE Solutions. September 1997.

BALCI, O. **Modeling. Handbook of Simulation.** Capítulo 10 – Verification, Validation, and Testing. Engineering & Management Press. 1998.

BALCI, O. **Guidelines for Successful Simulation Studies.** Winter Simulation Conference. 1990.

BALCI, O.; NANCE, R. E. **Formulated problem verification as an explicit requirement of model credibility**, August 1985.

BANKS, C. M. **Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach.** Capítulo 1- What Is Modeling and Simulation?. John Wiley & Sons. 2009.

BBC. **Queda das commodities sugere fim de ciclo de crescimento na América Latina.** Disponível em: < http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2013/05/130520_commodities_queda_crescimento_america_latina_lgb.shtml>. Acesso em 26 de Julho de 2013.

RIBEIRO, F. R. **Modelo de simulação para análise operacional de pátio de aeroportos.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2003.

BORGES, C. N. **Manual Didático de Ferrovias**, Universidade Federal do Paraná, 2011.

BROOKS, F. P. JR. **The Mythical Man-Month**, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1975.

BURNS, A.; WELLINGS, A. **Real-Time Systems and Programming Languages**, Pearson Education Limited, 2001.

CARDOSO, C.R.O.; TELES M.B. **Simulação de Terminal Portuário**. XVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Gramado, RS, 1997.

CARDOSO, J. S. L. **Proposição de uma Metodologia para Comparação de Desempenho Operacional de Terminais Portuários de Graneis Sólidos Minerais**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2011.

CHRISPIM, E. M. **Análise da Operação Ferroviária do Porto do Rio de Janeiro Utilizando Simulação de Eventos Discretos**. Monografia apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora. 2007.

COUNCIL ON COMPETITIVENESS, **Challenges**, Vol. 1, No. 6. Abril de 1989.

CREMONESE, D.T.; LIVORATTI, P. **Simulation Tools: a study of application at the Nouadhibou Port**. 7th International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. Foz do Iguaçu, PR, Brasil. 2012.

CREMONESE, D.T.; TOMI, G.F. **Desafios para a Gestão Operacional de Perfuração em Minerações Subterrâneas**. 7º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & 7º Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea e no Workshop “Benchmarks em operação de minas”. Belo Horizonte, MG, Brasil. 2012.

DALAL, M. A.; JENSEN, L. P. **Simulation Modeling At Union Pacific Railroad**. Winter Simulation Conference. 2001.

DESSOUKY, M. M.; LEACHMAN, R. C. **Using Simulation Modeling to Assess Rail Track Infrastructure in Densely trafficked Metropolitan Areas**. Winter Simulation Conference. 2002.

DESSOUKY, M. M.; LEACHMAN, R. C. **A Simulation Modeling Methodology for Analysing Large Complex Rail Networks**. Simulation, ed. 65. Pg. 131-142. Agosto de 1995.

EVERETT, J.E. **Simulation Modeling of na Iron Ore Operation to Enable Informed Plannig**. Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management, Volume 5. 2010.

EXAME. **Vale reduz investimentos para US\$16,3 bi em 2013**. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/negocios/empresas/noticias/vale-reduz-investimentos-para-us-16-3-bi-em-2013>>. Acesso em 3 de Dezembro de 2012.

FEU, A.B. **Produtividade do Capital no Brasil de 1950 a 2002**. Tese de Doutorado em Economia, Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

FILHOSDASMINAS. **Marco Regulatório da Ferrovia**. Disponível em: <<http://www.filhosdasminas.org/2010/09/marco-regulatorio-da-ferrovia.html>>. Acesso em 2 de Outubro de 2012.

FIORONI, M. M.; BOTTER, R. C. **Estudo Estratégico de Dimensionamento da Infra-Estrutura do Pátio Ferroviário de Tubarão Através de Simulação**. XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Florianópolis, Santa Catarina. 8 a 12 de Novembro de 2004.

FRANKLIN, M.; GERTENBACH J. **Applying Modeling & Simulation as part of Business Process Improvement of Complex Mining Logistics**. Business Process Improvement in the Extractive Industries, Denver CO, Setembro 2005.

FLEURIET, M.; KEHDY, R. E BLANCC G. **O modelo Fleuriet: a dinâmica financeira das empresas brasileiras: um novo método de Análise, Orçamento e Planejamento**. Rio de Janeiro, Campus. 2003.

FUJIMOTO, R. M. **Handbook of Simulation**. Capítulo 12 – Parallel and Distributed Simulation. Engineering & Management Press. 1998.

GOOGLE EARTH. **Mapas**. Disponível em: <[http:// maps.google.com.br](http://maps.google.com.br)>. Acesso em 13 de Junho de 2012.

GOVERDE, R. M. P.; ODIJK, M. A. **Performance evaluation of network timetables using PETER**. Computers in Railways VIII, WIT Press, Southampton, 2002.

HARTMANN, S.; POHLMANN, J.; SCHÖNKNECHT, A. **Simulation of Container Ship Arrivals and Quay Occupation**. HSBA Working Paper 3. 2009

HENRIQUE, C. F. **Manutenção de Via Permanente com foco na Produção**. Monografia apresentada ao Instituto Militar de Engenharia. 2006

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Produção de minério de ferro deve subir 10,8%**. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=181053>. Acesso em 22 de Janeiro de 2013.

JULIÁ, A. F. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010.

KING, R. P.; SCHNEIDER, C. L. **Simulação de Usinas de Beneficiamento: Princípios Básicos**. Capítulo 18. Livro de Tratamento de Minérios. 4 edição. 2004.

KIVIAT, P. J. **Digital Computer Simulation: Modeling Concepts**, RAND Memo RM-5378-PR, RAND Corporation, Agosto de 1967.

KUO, T.; HUANG, W.; WU, S.; CHENG, P. **A Case Study of Inter-arrival Time Distribution of Container Ships**. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No 3, PP. 155-164. 2006

LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation Modeling and Analysis**, Second Edition, McGraw-Hill, 1991.

LEBEDEV, A. **Dynamic Simulation of conveyor systems in underground hard rock mines**. Beltcon 14, The South African Institute of Materials Handling, Lynnwood Ridge, South Africa, 2007.

LEBEDEV, A.; STAPLES, P. **Simulation Benefits Underground Mine Infrastructure Design**. Bulks Solids Handling, Vol. 20, No 2, PP. 191-196. 2000.

MATTOS, L. B. R. **A Importância do Setor de Transportes na Emissão de Gases do Efeito Estufa – O Caso do Município do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2001.

MCKAY, K. N.; BUZACOTT, J. A.; MOORE, J. B. E STRANG, CHRISTOPHER, J. **Software Engineering Applied to Discrete Event Simulations**. Winter Simulation Conference. WASHINGTON, DC, EUA. 1986.

MCGINTY, J. T. **Simulation Modeling for System Design and Analysis**. Part I: Principles and Guidelines. 2001.

MCGINTY, J. T.; CHAVES C.; NAVARRA P. **Port and Rail Infrastructures Expansion Planning at ARCELORMITTAL Mines Canada Via Dynamic Computer Simulation**. 39th International Meeting on Ironmaking and 10th International Symposium on Iron Ore, Ouro Preto, MG, 22-26 de Novembro de 2009.

MERRICK, J. **Generating Random Numbers**. Simulation with Arena – Further Statistical Issues. 1998.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO. **Sobre o PAC**. Disponível em: <<http://www.pac.gov.br/sobre-o-pac>>. Acesso em 6 de Janeiro de 2013.

NANCE, R. E., **A Hystory of Discrete Event Simulation Programming Languages**, System Research Center report SRC 93-003. 11 de Junho de 1993.

NETTO, J. F.; BRITO T. B.; BOTTER, R. C.; PEREIRA, N. N. **Avaliação da Capacidade do Canal de Acesso do Porto de Santos por Simulação de Eventos Discretos**. Disponível em: <<http://www.usp.br/cilip/wp-content/uploads/2012/01/59-Botter-Ferreira-neto-Pereira-y-Barros-Brito-COMPLETO-Brasil1.pdf>>. Acesso em 25 de Abril de 2012.

OLIVEIRA, R. O., MACHADO, C. C., SOUZA, A. P., LEITE, H. G. **Avaliação técnica e econômica da extração de madeira de eucalipto com “clambunk skidder”**, Revista Árvore, Volume 30, Viçosa, Março/Abril de 2006.

PASQUALI, L. A. **Curva Normal**. Disponível em: <<http://www.psi-ambiental.net/pdf/PasqCap03.pdf>>. Acesso em: 22 de Novembro de 2012.

PAGE, E. H. JR. **Simulation Modeling Methodology: Principles and Etiology of Decision Support**. Blacksburg, Virginia, EUA. Setembro de 1994.

PANKO, R. R.; SPRAQUE, R. H. JR. **Hitting the wall: erros in developing and code inspecting a ‘simple’ spreadsheet model**. Decision Support Systems, Volume 22. Abril de 1998.

PETERNELLI, L. A. **Intervalos de confiança**. Disponível em: <<http://www.dpi.ufv.br/~peterneli/inf162.www.16032004/materiais/CAPITULO7.pdf>>. Acesso em: 22 de Novembro de 2012.

PIRES, C. L.; NABETA, S. I.; CARDOSO, J. R. **Simulação digital do sistema de tração elétrica metroferroviária: modelagem e métodos**. Exacta, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 229-235, jul./dez. 2008.

PORTO, T. G. **PTR 2501 – Ferrovias**. Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2004.

PORTO, T. G. **Transporte Ferroviário e Transporte Aéreo**. Aula 5. Disponível em: <www.poli.usp.br/d/ptr2501>. Acesso em: 26 de Julho de 2013.

PRITSKER, A. A. B. **Modeling. Handbook of Simulation**. Capítulo 2 - Principles of Simulation. Engineering & Management Press. 1998.

ROSA, F. H. F. P.; PEDRO, V. A. J. **Gerando Números Aleatórios**. Laboratório de Matemática Aplicada. 2002.

SADOWSKI, D.; SADOWSKI, R.; AND KELTON D. **Simulation with Arena**, McGraw Hill, 1998.

SAGAN, A.; KING, H. **Modeling the mine-to-port supply chain**. Port Technology International Journal, Edição 48. 2011.

SANTOS, M. P.; **Introdução à Simulação Discreta**. Departamento de Matemática Aplicada, Instituto de Matemática e Estatística, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 1999.

SARMAD, A; AGRAWAL, V; THAKAR, V. **Simulation modeling helps oil producer plan for the future**. Port Technology International Journal, Edição 45. 2010.

SAVORY, P. A.; MACKULAK, G. T., **The Science of Simulation Modeling, International Conference on Simulation in Engineering Education**, Volume 26, ed. Knadler and Vakilzadian, PP. 115-119, Tempe, Arizona, Janeiro de 1994.

SCHRIBER, T. J.; BRUNNER, D. T. **Inside Discrete-Event Simulation Software: How it works and why it matters**. Winter Simulation Conference. 2005.

SHANNON, R. E. **Introduction to the art and science of simulation**. 1998 Winter Simulation Conference, Washington DC, USA. 13-16 de Dezembro de 1998.

SHANNON, E. E. **Introduction to simulation**, Winter Simulation Conference, 1992.

SHANNON, R. E. **System Simulation: The Art and Science**, Prentice-Hall, 1975.

SILVA, R. F; KAWANO, B. R.; MORES, G. V.; CUGNASCA, C. E. **Impactos Econômicos do Uso do Modal Ferroviário para a Exportação do Açúcar**

Brasileiro. XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Belo Horizonte, MG. 4 a 7 de Outubro de 2011

SIMULATION ANALYSIS. Simulation Analysis of the Coal Processing Plant of Resgen's Boikarabelo Mine. Disponível em: <http://www.simio.com/case-studies/boikarabelo_mine.html>. Acesso em: 17 de Novembro de 2010.

SKETCHUP. 3D Warehouse. Disponível em: <<http://sketchup.google.com/3dwarehouse/details?mid=e5b23d8516c1b99281b0d56f7467d8ca>>. Acesso em 13 de Junho de 2012.

SMS – SIMULATION MODELLING SERVICES PTY LTD. Computer Simulation Modelling of Rio Tinto's Pilbara Rail Network. Documento no: 27-521.01. Janeiro de 2008.

STEINBERG J. G.; TOMI G. Lean Mining: principles for modeling and improving processes of mineral value chains. International Journal of Logistics Systems and Management, Vol. 6, No. 3, 2010.

THYSSENKRUPP. Produtos. Disponível em: <<http://www.tkfla.com.br/produtos/manuseio/manuseio/attachment/virador/>>. Acesso em 13 de Junho de 2012.

TORRES, V.; ORTIZ, J. Aplicaciones de La modelación y simulación a La producción y alimentación de animales de granjas. Revista Cubana de Ciência Agrícola, Tomo 39, Número Especial, 2005.

TOWNSVILLE BULLETIN. Iron ore production surplus. Disponível em: <http://www.townsvillebulletin.com.au/article/2011/09/20/267841_business.html>. Acesso em 13 de Junho de 2012.

TSIFLAKOS, K.; MATHEWSON, S. C. A Rapid Railway Simulation Model Development System Incorporating Automatic Model Generation. Winter Simulation Conference. 1991.

ZEIGLER, B. P. Theory of Modelling and Simulation, John Wiley & Sons. 1976.