

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

**Metodologia de Análise do Desempenho da Usina  
de Concentração da Samarco Mineração S.A.  
Baseada em Simulação das Operações**

**Autor:** Duílio Donizete Teixeira de Carvalho

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas, área de concentração: Tratamento de Minérios.

**Ouro Preto – MG  
Julho / 2003**

C331m

Carvalho, Duílio Donizete Teixeira de  
Metodologia de Análise do Desempenho da Usina de Concentração  
da Samarco Mineração S.A. Baseada em Simulação das Operações  
/.Duílio Donizete Teixeira de Carvalho - Ouro Preto - UFOP, 2003

xii, 103 p.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

1. Minas – método de simulação. 2. Engenharia de minas.  
3. Minas e mineração – simulação (computadores). I.  
Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas.  
Departamento de Engenharia de Minas. II. Título.

CDU: 622:519.872

<http://www.sisbin.ufop.br>

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DO DESEMPENHO DA USINA DE  
CONCENTRAÇÃO DA SAMARCO MINERAÇÃO S.A. BASEADA  
EM SIMULAÇÃO DAS OPERAÇÕES**

**AUTOR: DUÍLIO DONIZETE TEIXEIRA DE CARVALHO**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada, em 31 de julho de 2003, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto (Orientador / UFOP)

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Luz (UFOP)

Dr. Joaquim Donizetti Donda (Samarco Mineração S.A.)

“Dedico este trabalho a Deus, que é quem abre os caminhos, à memória dos meus pais e de meu irmão e também à minha esposa, Maria da Conceição, pelas palavras de incentivo nos momentos oportunos”.

## **Agradecimentos**

À Samarco Mineração S.A., por disponibilizar todos os recursos para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Em especial, a Wellington Ceciliano, por ter sido não só um colega de trabalho, mas um parceiro, ao longo de todo o desenvolvimento deste projeto.

Ao Paulo Rabelo, Maury, Eduardo Pessotti e Laherce pelo apoio no início e durante a realização deste trabalho.

Ao Márcio Alves e Valdirene, pelas diversas migrações de dados, pela atenção e ajuda.

À Rosaly, pela atenção, dedicação e programações de transporte.

Ao João Miranda, Márcio e amostristas, pelas amostragens e análises de laboratório.

Ao Rafael Buback, com todo o seu conhecimento de informática.

Aos demais colegas, da Engenharia de Processo, Operação da Concentração e outros departamentos da Samarco, pela colaboração e informações prestadas.

Ao Luís Henrique e Ricardo Cassel, da Prodttare, pela importantíssima colaboração.

Ao meu orientador, prof. Dr. Luiz Ricardo Pinto, pela ajuda e orientação.

À UFOP e demais professores, pelas oportunidades de aprendizagem.

Aos funcionários da UFOP, pela presteza no atendimento.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo criar uma metodologia para análise do desempenho da usina de concentração de minérios de ferro da Samarco Mineração S.A., baseada na simulação das operações. A abordagem adotada se restringe à eficiência operacional dos equipamentos e etapas do processo produtivo que, a propósito, pode ser classificado como um processo industrial contínuo.

Para a modelagem das operações da planta foi aplicado o software ARENA da Rockwell Software, que é um sistema de simulação a eventos discretos. Uma adaptação, visando adequar este software para aplicação em um sistema contínuo, foi necessária para viabilizar o projeto.

A ferramenta criada é um sistema de simulação discreta a partir de um modelo a eventos discretos em que o processo industrial contínuo foi discretizado no tempo e modelado, utilizando variáveis estocásticas (disponibilidade dos recursos) e determinísticas (capacidade dos recursos).

Com o uso desta ferramenta foi possível desenvolver um simulador específico para análises de cenários operacionais da usina. Este simulador permite que sejam avaliadas mudanças na forma de operação da usina sem necessidade de intervenção direta no sistema real, o que faz desta ferramenta uma poderosa aliada no planejamento estratégico das operações, respondendo de maneira clara perguntas do tipo “O que aconteceria, se ...?”, comuns quando se planeja alterações em sistemas produtivos.

## **ABSTRACT**

This project has for objective to create a methodology for analysis of the iron ore concentrator performance at Samarco Mineração S.A., based on the operations simulation. The adopted boarding restricts to the equipment operational efficiency and the productive process stages that, by the way, can be classified as a continuous industrial process.

For the plant operations modeling was used the ARENA software from Rockwell Software, which is a simulation system of discrete events. An adaptation, aiming at to adjust this software for application in a continuous system was necessary to make possible the project.

The created tool is a discrete simulation system from a discrete events model where the continuous production process was separated in time and modeled, using stochastic (resources availability) and deterministic variables (resources capacity).

With the use of this tool it was possible to develop a specific simulator for plant operational scenes analyses. This simulator allows that changes in the plant operation form can be evaluated without direct intervention necessity in the real system, what it makes of this powerful tool an allied one in the operations strategical planning, answering in clear way are evaluated questions it type? “What would happen if...?”, so common when alterations in productive systems are planned.

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO**

**RELEVÂNCIA** ..... 2

**OBJETIVOS** ..... 5

    OBJETIVO PRINCIPAL ..... 5

    OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 6

**MÉTODO DO TRABALHO** ..... 6

    Etapas do trabalho ..... 9

    Definição do tema de pesquisa ..... 10

    Construção do referencial teórico ..... 10

    Construção do método proposto ..... 10

**DELIMITAÇÃO**..... 13

**ESTRUTURA DO TRABALHO**..... 14

### **CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

2.1. BREVE HISTÓRICO DA PESQUISA OPERACIONAL ..... 17

2.2. HISTÓRICO DA SIMULAÇÃO..... 19

2.3. CONCEITOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ..... 20

2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO ..... 29

2.5. APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS ..... 33

2.5.1. Aplicações da Simulação na Mineração ..... 34

2.6. MÉTODO DE CONDUÇÃO DE PROJETOS DE SIMULAÇÃO  
COMPUTACIONAL ..... 41

2.7. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS ..... 45

2.8. O SOFTWARE ARENA ..... 46

2.8.1. Aplicações do ARENA ..... 52

2.8.2. Principais elementos em um modelo de simulação ..... 52

### **CAPÍTULO 3: APLICAÇÃO PILOTO**

3.1. COMENTÁRIO SOBRE A SAMARCO ..... 58

3.2. PROCESSO PRODUTIVO A SER ESTUDADO ..... 59



3.3. APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO .....	63
3.3.1. Cenário Atual para a Tomada de Decisão .....	64
3.3.2. Desenvolvimento do Trabalho.....	65
3.3.3. Indicadores.....	78
3.3.4. Variáveis .....	79
3.3.5. Validação do Modelo.....	79
3.3.6. Cenários Construídos .....	81
<b>CAPÍTULO 4: AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO</b>	
4.1. - RESULTADOS OBTIDOS.....	84
4.1.1. Cenário 1: situação atual da usina sem paradas dos recursos.....	88
4.1.2. Cenário 2: situação atual da usina incluindo as paradas dos recursos .....	88
4.1.3. Cenário 3: utilizando o Cenário 1 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04.....	89
4.1.4. Cenário 4: utilizando o Cenário 2 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04.....	89
4.1.5. Cenário 5: situação atual da usina, aumentando o tempo entre paradas dos recursos em 100% .....	90
4.2. Comparação entre os cenários .....	90
4.2.1. Comparação A: Cenário 1 versus Cenário 2.....	91
4.2.2. Comparação B: Cenário 1 versus Cenário 3 .....	91
4.2.3. Comparação C: Cenário 2 versus Cenário 4.....	91
4.2.4. - Comparação D: Cenário 3 versus Cenário 4 .....	92
4.2.5. - Comparação E: Cenário 2 versus Cenário 5.....	93
4.2.6. - Comparação F: Cenário 4 versus Cenário 5.....	93
4.3. - DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	94
4.4. AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL .....	94
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	
5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....	97
5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>100</b>

## **ANEXOS**

**Anexo I:** Fluxograma completo da usina de concentração da Samarco  
Mineração S.A.

**Anexo II:** Fluxograma da usina de concentração usado na modelagem  
conceitual

**Anexo III:** Distribuições de probabilidades dos dados de paradas de equipamentos

**Anexo IV:** Tabela da Distribuição “t” de Student

**Anexo V:** Exemplo dos resultados, para duas replicações do modelo, emitidos pelo  
ARENA

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Maneiras de estudar um sistema (Law e Kelton , 1991). .....	4
Figura 1.2: Figura ilustrativa de um processo seriado de fluxo puxado de informações. ....	12
Figura 2.1: Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC)....	23
Figura 2.2: Trajetória de um sistema dinâmico de eventos discretos (SDED). ....	23
Figura 2.3: Exemplo de um sistema contínuo discretizado. ....	24
Figura 2.5: Representação do módulo de parâmetros da replicação.....	51
Figura 2.6: Ilustração do comportamento de variáveis e atributos em um modelo de simulação.....	54
Figura 3.1: Parte do fluxograma de processo real da usina de concentração. ....	66
Figura 3.2: Parte do fluxograma da modelagem conceitual. ....	66
Figura 3.3: Representação visual da distribuição de probabilidades feita no Input Analyzer. ....	69
Figura 3.4: Exemplo da análise de comparação entre as distribuições de probabilidades feita no Input Analyzer.....	69
Figura 3.5: Esboço ilustrativo do comportamento da fila em um processo de produção contínuo.....	73
Figura 3.6: Gráfico mostrando truncamento após 90 dias de aquecimento.....	76
Figura 3.7: Processo de alimentação da modelagem computacional.....	77
Distribuições de probabilidades dos dados de paradas de equipamentos .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Classificações de uma pesquisa. ....	7
Tabela 2.1: Benefícios da simulação mais citados (Hollocks, 1992). ....	31
Tabela 3.1: Método de validação do modelo computacional. ....	80
Tabela 3.2: Experimentos possíveis do projeto. ....	82
Tabela 3.3: Experimentos remanescentes. ....	83
Tabela 4.1: Resultados reais e dos cenários simulados em tmsc/ano. ....	87
Tabela 4.2: Análise dos cenários através do indicador IROG. ....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS

CCR: “capacity constraint resource” (recurso com restrição de capacidade)

DPS: distribuidor de polpa secundário

FIFO: “first in first out” (primeiro a entrar é o primeiro a sair)

GNA: gerador de números aleatórios

GUI: “graphical user interface” (interface gráfica com o usuário)

HVF: “high value first” (maior valor primeiro)

IROG: índice de rendimento operacional global

LIFO: “last in first out” (último a entrar é o primeiro a sair)

LVF: “lower value first” (menor valor primeiro)

PO: pesquisa operacional

PC: “personal computer” (computador pessoal)

SDED: sistema dinâmico de eventos discretos

SDVC: sistema dinâmico de variável contínua

SIGMA: sistema gerencial de manutenção

SIPVE: sistema de informação de produção vendas e embarque

TBF: “time between failure” (tempo entre falhas)

tmsc: toneladas métricas secas de concentrado

TTR: “time to repair” (tempo para reparo)

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Antes da década de 70, a demanda global era maior que a oferta, ou seja, quase tudo que as empresas produziam era vendido. Conseqüentemente, as empresas não se preocupavam com a qualidade do produto. O preço de venda era o resultado da soma entre os custos de produção e o lucro que o produtor almejava. O que importava era conseguir produzir a maior quantidade possível de poucos produtos, não interessando a opinião do cliente a respeito dos mesmos.

A velocidade sempre crescente do avanço tecnológico dos últimos anos, principalmente nas áreas de comunicação, alterou essa lógica e forçou as empresas a se adaptarem para atender a um mercado consumidor cada vez mais exigente. Paralelamente, a oferta se tornou maior que a demanda e os preços passaram a ser definidos pelo mercado, obrigando as empresas a reduzir substancialmente os custos.

Essa nova lógica criou um ambiente propício para as mega-fusões e reduziu o mercado para os pequenos produtores.

Dentro desse cenário de “curtas distâncias” e grande concorrência, as empresas passaram a produzir produtos específicos/diferenciados para atender às necessidades peculiares de cada cliente.

Isso fez com que as empresas começassem a modificar as suas estruturas e capacidades, tanto em máquinas, quanto em leiaute e fluxo de processo, de maneira que a complexidade operacional aumentou sobremaneira.

Outro fator agravante é que, tendo que aumentar a diversidade dos produtos, cada qual com seu preço, custo variável de produção, problemas logísticos e problemas estratégicos, os empresários partiram para a adoção de técnicas de Engenharia de Produção, visando garantir às organizações maior agregação de valores e maiores ganhos, sejam eles através de maximização do lucro e/ou redução de custos, ou mesmo através da diversificação de atividades.

Este quadro está exigindo das empresas decisões rápidas e eficazes, o que se consegue através da aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional.

Este trabalho visa testar e avaliar a aplicabilidade da técnica de simulação computacional no caso específico da usina de concentração da Samarco Mineração S.A. Técnicas de programação matemática não fazem parte do escopo deste trabalho.

## **RELEVÂNCIA**

O processo de tomada de decisões, em ambientes industriais do tipo da Samarco Mineração S.A., possui uma elevada complexidade devido às suas características sistêmicas e estocásticas, uma vez que soluções otimizadas localmente podem prejudicar o desempenho global do sistema produtivo. Entretanto, essa visão sistêmica é de difícil observação quando tratada de uma maneira empírica manual, possibilitando a existência de um conjunto de percepções difusas sobre a realidade.

A modelagem é uma abordagem fundamental para o melhor entendimento das complexas relações existentes em um processo empresarial. Essa modelagem é desenvolvida em vários níveis, desde o planejamento estratégico global até a programação fina. Ao longo desses diferentes níveis de planejamento, uma série de técnicas de modelagem podem ser utilizadas na tentativa de compreensão do processo produtivo e de apoio à tarefa de tomada de decisões.

Para tanto, a modelagem matemática procura descrever um sistema real a partir de um conjunto de restrições (de capacidade, financeiras, de suprimento, de transporte, mercadológicas, etc.) e, conforme um determinado objetivo (maximização de lucro ou minimização de custos), procura uma solução ótima para o modelo desenvolvido. Entretanto, essa abordagem apresenta alguns pressupostos:

- determinismo dos dados;
- as informações são estáticas;
- consistência dos dados.

A simulação computacional procura romper com estes pressupostos através do reconhecimento da variabilidade do sistema. Ela leva em conta não somente médias ou padrões determinísticos, mas também a distribuição estatística associada ao fenômeno estudado, aproximando o modelo ao mundo real, o qual é estocástico. A simulação também considera as informações sob um ponto de vista sistêmico e dinâmico, ou seja, os eventos reais são percebidos observando-se as suas seqüências temporais, possibilitando, inclusive, vários níveis de detalhamento do sistema real. Entretanto, esta técnica tem o seu uso mais adequado para aplicações estratégicas/táticas do que para as de nível operacional/repetitiva.

Em termos operacionais, a modelagem computacional de sistemas produtivos proporciona a efetivação de uma série de atividades inerentes ao processo industrial (ex.: cálculo de capacidade, seqüenciamento da produção, etc.). Devido à complexidade destas atividades, a utilização de modelos torna-se fundamental para a gestão dos modernos sistemas produtivos.

Uma das fases deste processo é a da criação de uma ferramenta que auxilie a empresa a fortalecer e agilizar as tomadas de decisões que estão aumentando a uma velocidade considerável e exigindo uma maior qualidade e rapidez nas respostas.



Law e Kelton (1991) apresentam uma das maneiras mais compreensíveis de se visualizar onde a técnica de simulação está inserida em um estudo de um sistema genérico qualquer. Ver figura 1.1.

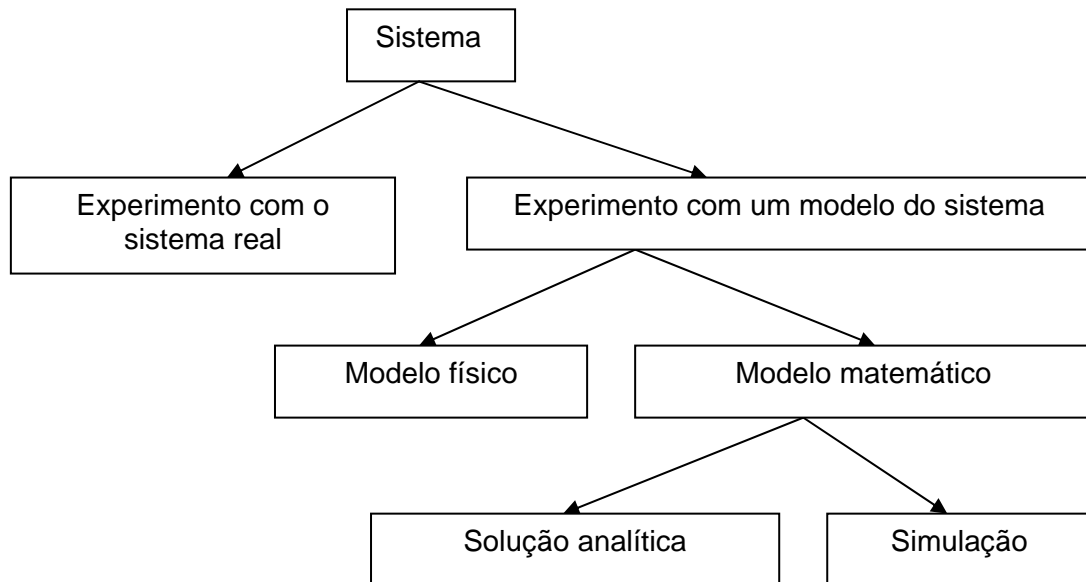


Figura 1.1: Maneiras de estudar um sistema (Law e Kelton , 1991).

Existem muitas maneiras de estudar um sistema, uma delas é modificá-lo em sua forma real e analisar o seu desempenho, mas o grande problema pode ser o tempo e os gastos envolvidos nesta operação. Outra forma pode ser a construção de modelos físicos representativos, que além de dispendiosos não conseguiriam representar um cenário particular.

A iniciativa para a construção de um simulador para a usina de concentração da Samarco Mineração S.A. é baseada nas justificativas apresentadas por Law e Kelton (1991), que suportam a criação de modelos matemáticos que representem as lógicas e relações quantitativas, podendo ser manipulados e analisados por meio de simulação.

“As soluções analíticas utilizam técnicas tradicionais de matemática e de estatística para realizar a análise e obter informações exatas sobre o sistema modelado. No entanto, se a complexidade do modelo for grande, torna-se inviável a utilização de soluções analíticas, pois as relações matemáticas ficam muito extensas e o cálculo das mesmas fica complexo. Neste caso, procura-se utilizar a simulação. Isto porque a simulação consegue modelar as características complexas do sistema, inclusive seu aspecto estocástico (ou probabilístico) e dinâmico, sem tornar o modelo difícil de ser estudado” (Law e Kelton, 1991).

A partir dos resultados apresentados pela simulação, é possível perceber o futuro no presente e elaborar um planejamento minucioso, envolvendo inclusive análise de sensibilidade das variáveis.

## **OBJETIVOS**

O desafio deste trabalho é criar uma metodologia para simular as operações da usina de concentração da Samarco Mineração S.A..

### **OBJETIVO PRINCIPAL**

O objetivo principal é avaliar a potencialidade da aplicação da técnica de simulação computacional como uma ferramenta qualificada para apoio ao processo de tomada de decisão gerencial da Samarco Mineração S.A.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver um modelo de simulação que represente o processo produtivo real e futuro da usina de concentração.
- Avaliar a aplicabilidade de um sistema de simulação a eventos discretos para simular o processo contínuo em estudo.
- Obter uma visão sistêmica do fluxo de processo da usina de concentração.
- Definir indicador de desempenho para a usina de concentração.
- Identificar o(s) gargalo(s) do processo produtivo.
- Servir como suporte ao planejamento de manutenção.
- Comparar cenários alternativos para o processo produtivo, bem como analisar a viabilidade de novos projetos.

## **MÉTODO DO TRABALHO**

Este capítulo apresenta as considerações do autor quanto ao método de pesquisa utilizado na elaboração desta dissertação. Segundo Lakatos e Marconi (1991), “método de pesquisa é um conjunto de atividades sistemáticas e racionais que orientam a geração de conhecimentos válidos, indicando um caminho a ser seguido”.

Segundo Silva e Menezes (2000), “pesquisar significa, de forma bem simples, buscar respostas para indagações propostas”, porém a pesquisa pode ser classificada segundo sua natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos, conforme apresentado na tabela 1.1.

Tabela 1.1: Classificações de uma pesquisa.

<b>Classificação</b>	<b>Tipo de Pesquisa</b>	<b>Descrição</b>
Natureza	Básica	Pesquisa que objetiva gerar conhecimentos novos e úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista.
	Aplicada	Objetiva gerar conhecimentos para a aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos.
Abordagem	<b>Quantitativa</b>	Pesquisa aplicada através de estudos estatísticos voltados à quantificação do objeto de estudo.
	Qualitativa	Pesquisa onde o processo de interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicos no processo de pesquisa. Os dados são analisados indutivamente.
Objetivos	<b>Exploratória</b>	Visa proporcionar maior familiaridade com o objeto do estudo, tentando torná-lo explícito, ou construir hipóteses.
	Descritiva	Visa descrever as características de determinada população ou fenômeno, ou ainda o estabelecimento de relação entre variáveis.
	Explicativa	Visa identificar fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência de fenômenos. Aprofunda o conhecimento porque explica o “porquê” das coisas.
Procedimentos Técnicos	<b>Bibliográfica</b>	Quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e, atualmente, de material disponibilizado na Internet.
	Documental	Quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
	<b>Experimental</b>	Quando se determina um objeto de estudo. Selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo. Definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.
	Levantamento	Quando a pesquisa envolve a interrogação direta às pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
	Estudo de Caso	Quando envolve o estudo profundo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
	Pesquisa-Ação	Quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. O pesquisador e os participantes estão envolvidos de modo cooperativo e participativo.
	Pesquisa-Participante	Quando a pesquisa se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e os membros da situação investigada.
	Expost-Facto	Quando o “experimento” se realiza após o acontecimento dos fatos.

Fonte: Adaptado de Silva, E. L. e Menezes, E. M. (2000).

Levando-se em consideração a classificação e a tipologia de pesquisa apresentada na tabela 1.1, este trabalho está enquadrado em uma pesquisa de natureza aplicada por objetivar a proposição de uma solução a um problema específico. Quanto à sua abordagem é uma pesquisa quantitativa, pois se desenvolve através de estudos estatísticos voltados à quantificação do objeto de estudo.

Quanto ao objetivo, está classificada como uma pesquisa exploratória por buscar um maior entendimento do processo alvo. E finalmente, quanto aos procedimentos técnicos, é uma pesquisa bibliográfica (esta opção será detalhada nos parágrafos seguintes) e também experimental, pois, focalizando o objeto em estudo, atua sobre variáveis do mesmo, definindo as formas de controle e de observação dos efeitos que as mesmas produzem no objeto.

Segundo Pinsonneaut e Kraemer (1993), a pesquisa exploratória procura levantar características inéditas, possibilitando estabelecer prioridades para futuros estudos. Seu objetivo principal é desenvolver hipóteses e proposições que irão redundar em pesquisas complementares. Desta forma, a pesquisa exploratória se esforça em definir, de uma maneira melhor, novos conceitos a serem estudados.

A pesquisa bibliográfica exploratória se ajusta à proposta de pesquisas em temas que são pouco explorados e, portanto, torna-se difícil formular hipóteses precisas e operacionalizáveis. Outro ponto em que a pesquisa bibliográfica exploratória se torna uma metodologia válida são os processos, que, devido a questões de temporalidade, o pesquisador prefere dividir o tema em etapas de desenvolvimento de familiarização com o conhecimento e este serve de base para outros trabalhos futuros.

Conforme descrito, nos objetivos deste trabalho, a meta é a obtenção de um método tentativo de gerenciamento industrial. Entenda-se por método tentativo como sendo um método que se desenvolve baseado em uma seqüência de eventos pré-determinados e genéricos. Devido às características de temporalidade para o desenvolvimento e implantação de um método de gerenciamento, não será possível o desenvolvimento de uma pesquisa-ação, pois os prazos para a elaboração deste trabalho e os prazos para o desenvolvimento e implantação do método são incompatíveis. Não se trata também de um possível estudo de caso, pois se trata de um método considerado recente e faltam casos de implantação para estudo. Portanto, a escolha de uma pesquisa exploratória bibliográfica cumprirá com o objetivo de trazer familiaridade com o objeto do estudo e preparará o caminho para outras pesquisas que deverão trazer aprofundamento no tema.

Este trabalho visa ser a etapa inicial de um conjunto de pesquisas futuras para o aprofundamento do estudo do gerenciamento industrial, à luz da Teoria das Restrições, em sua aplicação prática.

Este trabalho está estruturado no desenvolvimento de uma pesquisa bibliográfica exploratória na literatura disponível, buscando aspectos teóricos e práticos relacionados à implantação de métodos de gerenciamento de projetos complexos. Cabe salientar que este trabalho está baseado na metodologia da Corrente Crítica proposta por Eliyahu M. Goldratt em seu livro de mesmo nome.

### **Etapas do trabalho**

“A dissertação de mestrado deve cumprir as exigências da monografia científica. Trata-se de uma comunicação dos resultados de uma pesquisa e de uma reflexão, versando sobre um tema igualmente único e bem delimitado” (Severino, 2000).

A construção de um trabalho científico está baseada em três fases distintas, que são apresentadas a seguir.

### **Definição do tema de pesquisa**

A primeira fase é a fase da intuição, da descoberta e da criação.

### **Construção do referencial teórico**

A segunda fase é caracterizada pela pesquisa positiva, que pode ser exploratória de campo ou exploratória bibliográfica. Este é o momento da confrontação do estudo proposto com a realidade, com os fatos e as idéias de outros pesquisadores. A segunda fase tem por objetivo trazer o amadurecimento do processo criativo. É na segunda fase que as idéias são validadas, redirecionadas e, porque não, até mesmo abandonadas.

A construção do referencial teórico é uma das fases mais importantes da pesquisa, é nesta fase que se compõe a fundamentação teórica que será adotada ao longo de todo o trabalho em busca da resposta à questão da pesquisa. Através da construção do referencial teórico será erguida a estruturação conceitual, que sustentará o trabalho como um todo. A terceira fase é quando já se questionou as intuições sobre o assunto proposto e as idéias já foram testadas quanto às suas validades perante o conhecimento válido disponível. Nesta fase emerge a formulação definitiva que irá caracterizar a pesquisa em questão.

### **Construção do método proposto**

A terceira fase é a apresentação estruturada do trabalho devidamente validada pelas fases anteriores. Esta fase se caracterizará pela análise das informações obtidas na fase de construção do referencial teórico. Com a terceira fase se buscará a construção, de forma sistematizada, do modelo de implantação do sistema de gerenciamento de projetos proposto.

A ferramenta computacional a ser criada abordará todo o processo produtivo da usina de concentração e fornecerá elementos para a análise de desempenho nos cenários definidos, através de uma visão sistêmica. Ela se apoiará em dados históricos de paradas de equipamentos, capacidades operacionais máximas dos mesmos e partições de produtos.

Os dados foram levantados no período de 01/02/2002 a 31/01/2003, fechando o ciclo de um ano, visando conferir aos mesmos representatividade do universo analisado. Foram utilizados dados coletados de relatórios gerenciais e bancos de dados da Samarco Mineração S.A.. Além destes, outros dados importantes para a realização deste trabalho foram conseguidos, através de amostragens feitas no sistema real, para a determinação de partições de produtos.

As informações de caráter operacional foram mapeadas através de entrevistas realizadas com os especialistas dos departamentos de Engenharia de Processo e Operação da usina de concentração, visando esclarecer procedimentos operacionais adotados.

A simulação da usina de concentração foi feita utilizando o software Arena, versão 7.01, da Rockwell Software, que é um sistema de simulação a eventos discretos, isto é, “os processos mudam de estado, no decorrer do tempo do sistema, em pontos isolados. No Arena, estes tempos dos eventos são controlados pelo evento calendário, com as entidades movendo-se de acordo com o fluxo de processo para definir quando e quais as mudanças de estado do sistema” (Kelton e Sadowski, 2002).

Como se trata de um sistema contínuo de produção o modelo será discretizado para facilitar a manipulação das informações no aplicativo mencionado anteriormente. O método de discretização será mostrado adiante.



Um dos conceitos adotados na modelagem computacional é uma adaptação da técnica de Kanban, aplicada no Sistema Toyota de Produção, que caracteriza um fluxo de produção puxado, ou seja, cada etapa do processo solicita à etapa anterior somente aquela quantidade de entidades que ela e as etapas procedentes têm condições de tratar. No sentido inverso deste fluxo, evolui o fluxo de informações, que deve sempre ser levado em consideração no processo de tomada de decisão e no planejamento de produção. A figura 1.2 mostra uma ilustração dos fluxos puxados de informações e de entidades.

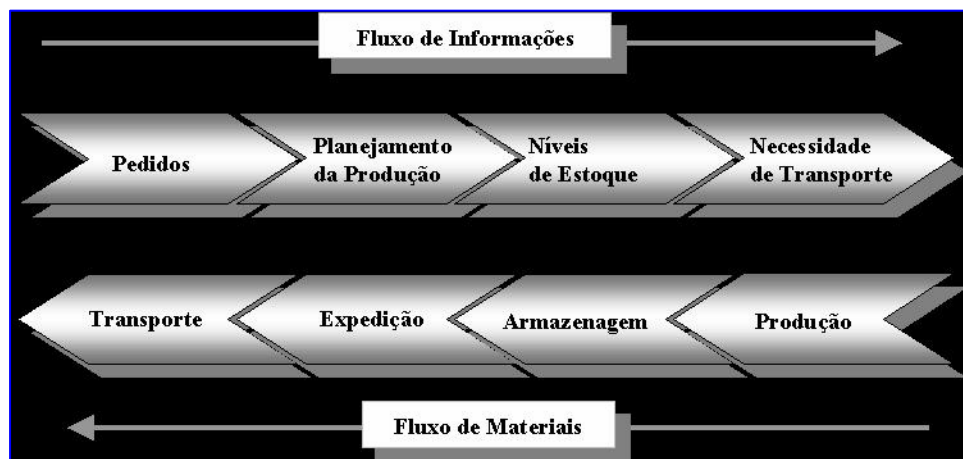


Figura 1.2: Figura ilustrativa de um processo seriado de fluxo puxado de informações.

Algumas etapas do processo foram transformadas em classes agregadas de recursos, chamadas de “caixas pretas”, onde o simulador analisa o processo daquela classe integralmente como se representasse um único recurso, para facilitar o manuseio do aplicativo. Neste sentido, transfere-se a complexidade do modelo computacional para a análise de dados de entrada que deverá manter a representatividade do sistema nesta forma agregada.

O tratamento estatístico dos dados de entrada será feito através da aplicação do software Input Analyzer, da Rockwell Software, que definirá as melhores distribuições de

probabilidades às quais os mesmos se adequam. Os intervalos de confiança para as médias dos dados de saída serão calculados usando a distribuição “t” de Student.

Como a Samarco Mineração S.A. ainda não possui uma ferramenta para antever os resultados a serem obtidos com mudanças no processo produtivo, a aplicação da simulação servirá como ferramenta para visualizar quais os resultados mais prováveis. Será possível alterar, virtualmente, o sistema atual e analisar as conseqüências possíveis de forma rápida e econômica.

## **DELIMITAÇÃO**

O simulador criado servirá somente para análise de cenários específicos da usina de concentração da Samarco Mineração S.A., pois os processos de produção de concentrado de minério de ferro se diferem de empresa para empresa, não sendo, portanto, aconselhável aplicá-lo em outros sistemas industriais. Apenas os conceitos podem ser aproveitados.

Este trabalho abordará o processo produtivo total da usina de concentração, desde os alimentadores rotativos até os espessadores de concentrado, conforme anexo I.

Devido à inexistência de uma forte correlação entre as variáveis de mineralogia da matéria-prima e as demais variáveis presentes no processo produtivo da usina de concentração, a ferramenta computacional criada não servirá à previsão de resultados que levem em consideração a qualidade da matéria-prima entrante.

Na execução das simulações, foi utilizado o software ARENA por sua facilidade de programação e análise dos dados de entrada e de saída.

## **ESTRUTURA DO TRABALHO**

A estrutura deste trabalho, que é apresentada a seguir, reúne informações desde a introdução até as considerações finais através de sumários dos capítulos abordados.

### **Capítulo 1: Introdução**

Na introdução deste trabalho, foi comentado sobre os avanços tecnológicos dos tempos modernos e suas conseqüências no mercado global. Em decorrência disto, as empresas tiveram que se adaptar e buscar técnicas que dessem suporte ao processo de tomada de decisões, privilegiando rapidez e eficácia. Esse cenário justificou a iniciativa para a realização deste trabalho.

Neste capítulo, foram também descritos os objetivos deste estudo, além de sua abordagem metodológica e delimitações que restringem seu uso ao caso específico da usina de concentração da Samarco Mineração S.A..

### **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica**

A revisão bibliográfica foi realizada através de consultas a outros trabalhos de pós-graduação, artigos nacionais e internacionais, livros e páginas especializadas da internet, através dos quais foi possível apresentar características, conceitos, além de métodos de condução de projetos de simulação.

### **Capítulo 3: Aplicação Piloto**

Este capítulo apresenta um breve comentário a respeito da Samarco Mineração S.A., destacando seu ramo de atividade, composição acionária, distribuição das vendas de seus produtos e seus diferenciais competitivos.

Em seguida, fez-se uma explanação a respeito da usina de concentração, que é o processo em estudo, situada na unidade de Germano, no município de Mariana, estado de Minas Gerais.

Finalmente, discorreu-se sobre a aplicação da simulação, mostrando o cenário atual para a tomada de decisões, a metodologia utilizada para construção do modelo computacional, a escolha dos indicadores e das variáveis, além da validação do modelo e os cenários construídos para as análises do desempenho do sistema real a partir do modelo computacional.

### **Capítulo 4: Avaliação da Aplicação**

A avaliação da aplicação relata os resultados obtidos nos experimentos realizados com a técnica de simulação, além das dificuldades encontradas no desenvolvimento do trabalho e as vantagens da utilização da simulação computacional para analisar o sistema em estudo.

Consta ainda, neste capítulo, a avaliação da aplicabilidade da simulação computacional através do modelo criado no software ARENA.

## **Capítulo 5: Conclusões e Recomendações**

No capítulo final deste trabalho, são descritas as principais conclusões obtidas durante a aplicação desta técnica de simulação nos cenários estudados.

Concluindo, são feitas recomendações de aplicação do método de simulação computacional em outras áreas da empresa.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta históricos da pesquisa operacional e da simulação, além de definições, conceitos, vantagens, desvantagens e método de condução de projetos de simulação computacional.

Apresenta também um histórico das aplicações da simulação na mineração, bem como uma explanação sobre o software de simulação ARENA e algumas aplicações do mesmo.

#### **2.1. BREVE HISTÓRICO DA PESQUISA OPERACIONAL**

Durante a Segunda Guerra Mundial, diante de grandes dificuldades nas operações militares e administrando recursos escassos, os exércitos americano e inglês contrataram matemáticos, objetivando a resolução de diversos problemas relacionados à administração dos recursos disponíveis. Estes matemáticos criaram então a Pesquisa Operacional (P.O.).

Após a guerra, as novas técnicas passaram a ser adotadas em diversos segmentos da sociedade e aplicadas principalmente na indústria, comércio e governo. As equipes que haviam participado das operações de guerra e outros cientistas que se interessaram pelo assunto, intensificaram as pesquisas. Importantes avanços no estado da arte foram realizados. Ainda em 1947, George Dantzig, usando o método Simplex, resolvia problemas de programação linear.

Em 1951, a pesquisa operacional já estava bastante desenvolvida na Inglaterra e iniciava então o processo de desenvolvimento nos Estados Unidos. No final da década de 50, algumas ferramentas de P.O. como programação linear, programação dinâmica, teoria das filas e teoria de estoques já eram bem conhecidas e aplicadas em vários países.

Os avanços nas técnicas de P.O. se intensificaram ainda mais com o advento dos computadores digitais, uma vez que a P.O. lida com problemas complexos que envolvem grande quantidade de cálculos. Resolver tais problemas à mão seria praticamente inviável, ou muito caro e extremamente moroso.

Com o grande crescimento em tamanho e complexidade das organizações atuais, e tendo em vista a capacidade sempre crescente dos computadores digitais, a P.O. passou a ser aplicada com o objetivo de servir de apoio à tomada de decisão. Por isso é que a maioria das grandes organizações mantém uma equipe de pesquisa operacional, cuidando apenas da solução de problemas, definindo o ponto ótimo de operação e estudando alternativas de desenvolvimentos futuros. A complexidade, quantidade e custo das atividades envolvidas e o enorme potencial de ganhos, para as médias e grandes organizações, justificam tal medida.

As técnicas de P.O. continuaram a evoluir. Como exemplos, pode-se citar alguns dos problemas que são resolvidos usando tais ferramentas:

- Programação linear: resolução de problemas de mistura (como, por exemplo, a determinação do ritmo de produção de frentes de lavra), alocação e transporte de materiais e pessoal.
- Programação dinâmica: planejamento de gastos com propaganda, esforços de venda e programação de produção.
- Teoria das filas: problemas de tráfego urbano, programação de tráfego aéreo, operação de hospital, programação de produção e outros que envolvam filas.
- Simulação: pode ter inúmeras aplicações, como será visto mais adiante.

Em suma, Pesquisa Operacional está envolvida com tomada de decisão ótima e modelagem de sistemas que se originam da vida real.

## 2.2. HISTÓRICO DA SIMULAÇÃO

Segundo Saliby (1989), a simulação surgiu a partir da evolução das técnicas de Pesquisa Operacional. Precisamente, ela teve sua origem como uma extensão do método de Monte Carlo, que foi proposto por Von Neumann e Ulam, em 1940, durante a segunda guerra mundial, em pesquisas realizadas, no laboratório de Los Alamos, para um projeto chamado Manhattan, cujo objetivo era a invenção da bomba atômica. Por razões de sigilo, o código “Monte Carlo” foi adotado.

Segundo Freitas (2001), em 1949, esta técnica foi divulgada em um artigo científico intitulado “The Monte Carlo Method”. Na aplicação da mesma, os dados são gerados empregando-se um gerador de números aleatórios (GNA) e uma distribuição de frequências da variável de interesse. Estes são dois pontos fundamentais na aplicação desta técnica e na sua posterior aplicação em programas de simulação.

Segundo o mesmo autor, um GNA é um programa computacional que deve ser capaz de gerar números aleatórios independentes e uniformemente distribuídos (isto é, todos com a mesma probabilidade de ocorrência, no intervalo de 0 a 1).

Saliby (1989) cita Marshall que, em 1956, se referiu ao Método de Monte Carlo como “a idéia intrigante, segundo a qual podemos utilizar métodos de amostragem aleatória para a solução de problemas matemáticos de natureza determinística”.

Após a euforia inicial que caracteriza toda descoberta, o método, que se baseava na solução de integrais múltiplas através de amostragem aleatória, caiu em desuso por



causa da grande quantidade de trabalho computacional e da baixa precisão dos resultados.

Embora o método de Monte Carlo tenha surgido na década de 40, a amostragem aleatória já era utilizada pelos estatísticos. Entre 1925 e 1935, W. S. Gosset, também conhecido por Student, deduziu, a partir de observações empíricas, a expressão da distribuição amostral do coeficiente de correlação.

### 2.3. CONCEITOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A técnica de simulação computacional é conceituada de diversas maneiras por diferentes autores, porém todos convergem para o fato de que a simulação é útil na resolução de problemas muito complexos nas organizações. A seguir, são mostrados alguns desses conceitos.

Schriber (1974) define simulação, conforme pode ser visto no clássico “Simulation Using GPSS”, da seguinte maneira: “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”. Nesta definição, Schriber não especifica se o modelo tem necessariamente que ser computacional. O motivo é que, na época, ainda era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para analisar o comportamento de sistemas.

Atualmente, simulação é quase sinônimo de simulação computacional digital. Shannon (1975) dá a seguinte definição para este tipo de modelo: “um modelo computacional é um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que ele representa”.

Szymankiewci (1988) conceitua simulação da seguinte maneira: “simulação é uma das mais poderosas técnicas disponíveis para a solução de problemas. Ela consiste na construção de um modelo matemático, correspondente ao sistema real, que pode ser experimentado e avaliado, quando submetido a diversos cenários de ação”.

Pegden (1990) define simulação como sendo “o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”.

Hollocks (1992) dá a seguinte definição: “simulação é uma técnica de Pesquisa Operacional que envolve a criação de um programa computacional que represente alguma parte do mundo real de forma que experimentos no modelo são uma antevisão do que acontecerá na realidade”.

Segundo Prado (1999), “simulação é uma técnica de solução de um problema pela análise de um modelo que descreve o comportamento do sistema, usando um computador digital”.

Apesar da existência de linguagens de simulação com propósito definido e pacotes de sistemas para facilitar a tarefa do usuário, algumas simulações podem requerer longos programas de computador com certa complexidade. Daí, em determinadas situações, produzir resultados úteis de uma simulação pode ser um processo moroso. Diante disso, Pidd (1998) defende a idéia que simulação em computador deveria ser considerada como um último recurso, para ser usado se todos os outros métodos falharem. Contudo, há casos em que o emprego da simulação pode ser a única maneira de abordar determinados problemas, em particular, aqueles que envolvam variáveis aleatórias.

Para melhor aplicar a técnica de simulação é necessário, primeiramente, classificar e entender os sistemas do mundo real. Tais sistemas podem ser classificados como:

- determinísticos: são aqueles dos quais o comportamento pode ser totalmente predito. Como exemplo, pode-se citar os ciclos de um robô em uma linha de montagem;
- estocásticos: são aqueles cujos comportamentos podem ser preditos somente em termos de distribuições de probabilidades. Também são chamados probabilísticos. Dois bons exemplos, relacionados ao tema deste trabalho, são a duração de paradas de equipamentos e o intervalo entre elas em um sistema industrial.

Quanto ao comportamento dos sistemas em relação ao tempo, eles podem ser classificados como:

- estáticos: são aqueles que não se alteram com o tempo. Ex.: simulação geoestatística, aplicações do método de Monte Carlo no cálculo de integrais;
- dinâmicos: são aqueles que variam ao longo do tempo. Normalmente, para estes modelos, é criada uma variável chamada relógio da simulação, cuja função é controlar a seqüência de eventos de acordo com o avanço do tempo. Ex.: simulação de atendimento em uma central telefônica, simulação do fluxo de clientes nos caixas de um supermercado.

Um sistema dinâmico pode ainda ser classificado como discreto ou contínuo, de acordo com o seu comportamento em relação à passagem do tempo. Um exemplo de simulação contínua, talvez a primeira, são os chamados modelos dinâmicos desenvolvidos por Forrester em 1961.

A seguir, são mostradas as definições de sistemas contínuos e discretos, segundo Cardoso et al. (1994).

Sistemas Contínuos são aqueles sistemas nos quais as variáveis de estado mudam continuamente no tempo. A grosso modo, pode-se dizer que a cada fração de segundo elas assumem novos valores. A figura 2.1 mostra uma representação esquemática de um sistema contínuo.

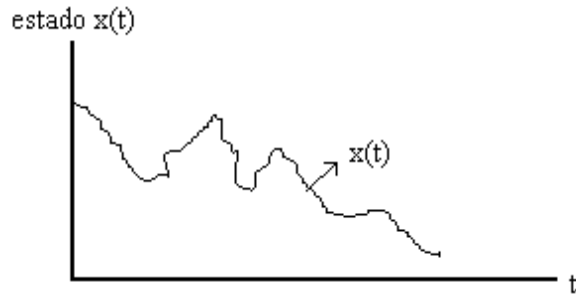


Figura 2.1: Trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC).

Como visto na figura 2.1, a trajetória de um sistema dinâmico de variável contínua (SDVC) está constantemente mudando com o estado, sendo capaz de representar o comportamento do sistema, em um instante qualquer, a partir de um instante inicial.

Sistemas Discretos são sistemas nos quais as variáveis de estado mudam só num conjunto discreto de pontos no tempo. Por exemplo: O banco é um exemplo de sistema discreto, uma vez que a variável de estado, o número de clientes no mesmo, muda só quando um cliente chega ou quando o serviço prestado a um cliente é concluído. Ver figura 2.2.

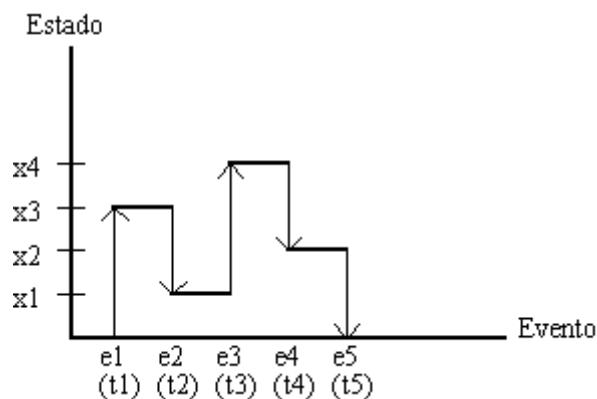


Figura 2.2: Trajetória de um sistema dinâmico de eventos discretos (SDED).

Para que um sistema contínuo possa ser estudado, é necessário que ele seja transformado em um sistema discreto, com o objetivo de adequá-lo aos softwares de simulação existentes hoje. Após esta transformação, cria-se um novo tipo de sistema dinâmico que é o sistema discretizado.

Sistemas Discretizados são sistemas estudados somente em instantes precisos. Trata-se, portanto, de sistemas contínuos observados em instantes discretos (sistemas amostrados). As variáveis de estado evoluem de maneira contínua, sem mudança brusca de comportamento, mas é somente a instantes discretos que há um interesse no seu valor. A figura 2.3 mostra um exemplo de sistema contínuo discretizado.

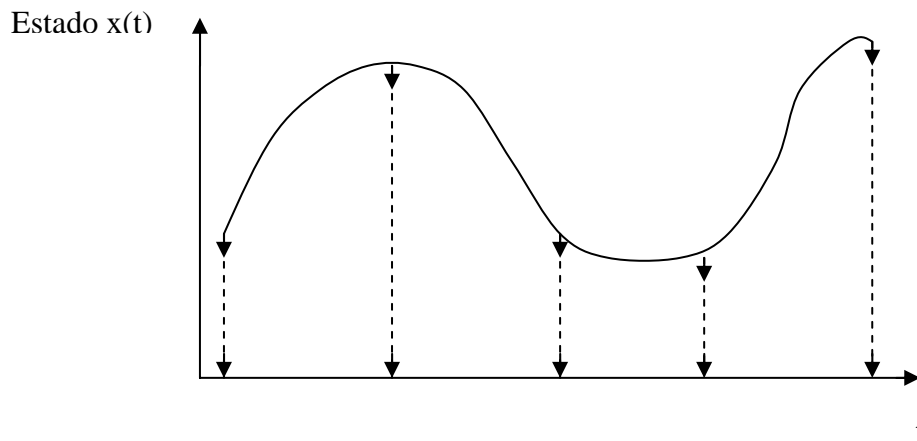


Figura 2.3: Exemplo de um sistema contínuo discretizado.

Apenas como ilustração, visando esclarecer a diferença entre os três tipos de sistemas dinâmicos, apresenta-se o seguinte exemplo. Considerando o enchimento de uma caixa com água, ele pode ser realizado de duas maneiras diferentes, porém, a partir desses sistemas, pode-se imaginar três modelos distintos:

- 1) usando-se uma mangueira, tem-se um sistema contínuo, pois a variável de estado, volume de água dentro da caixa, estará mudando de valor continuamente e assumindo um novo valor a cada instante;

- 2) usando-se um balde de 5 litros, tem-se um sistema discreto, pois a variável volume de água dentro da caixa muda de valor somente em pontos discretos do tempo, de 5 em 5 litros, ou seja, o volume permanece inalterado enquanto se busca outro balde com água;
- 3) usando-se a mesma mangueira da alternativa 1, sabendo-se a sua vazão em litros por minuto e estabelecendo-se os pontos, no tempo, em que o volume dentro da caixa aumenta, por exemplo, de 1 litro, tem-se um sistema discretizado.

Freitas (2001) classifica ainda os sistemas em terminais e não-terminais. Os terminais apresentam condições iniciais fixas (condições estas que o sistema volta a assumir ao início de cada rodada de simulação) e um evento que determina o fim natural para o processo de simulação. Como exemplos de sistemas terminais pode-se citar os serviços tais como bancos, restaurantes, lojas comerciais, etc. Os sistemas classificados como não-terminais não possuem condições iniciais fixas, nem um evento que determina o fim do processo de simulação. São exemplos de sistemas não-terminais os hospitais, os sistemas de comunicação e os sistemas que operam 24 horas por dia, que é o caso da usina de concentração da Samarco Mineração S.A.

Segundo Pidd (1998), as variáveis que são incluídas em um modelo de simulação podem ter seus valores mudando de quatro maneiras:

- a) continuamente, a qualquer ponto do tempo. Ex.: refinaria de petróleo, usina de tratamento de minérios, etc;
- b) continuamente, mas somente a pontos discretos do tempo. Ex.: operação de uma esteira transportadora de minério automática, de funcionamento intermitente, comandada por alguma variável do sistema;
- c) discretamente, a qualquer ponto do tempo. Ex.: chegada de espectadores em um teatro;
- d) discretamente, mas somente a pontos discretos do tempo. Ex.: simulação financeira.

É mais comum, e também mais fácil, a simulação de um sistema discreto, pois os simuladores existentes hoje foram desenvolvidos para tais sistemas. Para simular um sistema contínuo é necessária a discretização do mesmo no modelo. Há autores que consideram inviável a simulação de um sistema totalmente contínuo.

Segundo Arcaute et al. (2001), “a simulação de um sistema contínuo, usando um simulador a eventos discretos, é possível, porém simplificações se aplicam ao modelo, especialmente no manuseio de recursos e entidades. Os resultados são limitados se comparados aos de um sistema discreto”.

Para o melhor entendimento do simulador criado é necessário conhecer alguns conceitos, pois, em caso contrário, pode-se realizar análises imprecisas, inviabilizar o uso da ferramenta ou mesmo tomar decisões baseadas em percepções distorcidas.

a) Gargalo:

Gargalo é a operação com o maior tempo de atravessamento em um processo de produção de fluxo contínuo. Sendo o gargalo a mais lenta operação numa cadeia de operações, ele irá cadenciar a produção de toda a linha. O(s) recurso(s) gargalo(s) também pode(m) ser definido(s) como aquele(s) onde a capacidade de produção é inferior à demanda dentro do processo (Antunes, 1998).

b) Recursos com restrição de capacidade (CCR):

Os recursos com capacidade restrita são aqueles em que, em média, a capacidade é superior à demanda, porém devido a um conjunto de aspectos conjunturais (ex.: programação incorreta de produção, falta de matérias-primas, mix de produtos, problemas associados a manutenção, tempos de “set up”, etc...) acabam restringindo o desempenho global do sistema (Antunes, 1998). Ao contrário dos gargalos, no caso dos recursos com restrição de capacidade os problemas estão associados à gestão dos mesmos e não com capacidades operacionais máximas.

c) IROG (Índice de Rendimento Operacional Global):

Para um processo contínuo o IROG é definido como sendo:

$$\text{IROG} = (\text{TP} \cdot q) / (\text{TP} \cdot Q_{\text{max}}) \quad \text{equação 2.1}$$

Simplificando:

$$\text{IROG} = q / Q_{\text{max}} \quad \text{equação 2.2}$$

Sendo:

- TP: tempo de processamento de 1 entidade (minuto/entidade);
- q: quantidade de entidades realmente processadas no tempo T (nº de entidades);
- Qmax: capacidade máxima do recurso no tempo T (nº de entidades).

A equação 2.1 é uma razão entre tempos, ou seja, exprime o percentual do tempo total que um recurso necessita para atravessar o número máximo de entidades que ele realmente está utilizando para atravessá-las. A equação 2.2 é uma razão entre número de entidades (no caso em estudo, 1 entidade corresponde a 1 tonelada), ou seja, é a razão entre o número de entidades que realmente passou pelo recurso e o número máximo de entidades que poderia passar. Exprime a utilização efetiva do recurso para tratar entidades. Portanto, em um cenário que não considera as paradas dos recursos, aquele que apresenta IROG de 100,00% é o recurso gargalo.

Exemplo numérico: considerando que um recurso gaste 1 minuto para tratar (ou atravessar) 1 entidade, e sua capacidade máxima, no tempo T, é de 200 entidades; se, no mesmo tempo T, passarem por ele 180 entidades, então o IROG será:

$$\text{IROG} = (1 \text{ min/entidade} \times 180 \text{ ent.}) / (1 \text{ min/entidade} \times 200 \text{ ent.}) = 90,00\%.$$

d) Capacidade:

Capacidade é a quantidade máxima que uma instalação pode produzir sob condições normais durante um determinado intervalo de tempo. Quando a capacidade máxima de um recurso é menor do que a demanda teórica do processo, tem-se um gargalo.



e) Sistema de produção contínuo:

É considerado um sistema de produção contínuo ou fluxo em linha aquele que apresenta uma seqüência linear para fazer o produto ou serviço. Os produtos são bastante padronizados e fluem de um posto de trabalho a outro numa seqüência prevista. Às vezes, os sistemas de fluxo em linha aparecem subdivididos em dois tipos: a produção em massa, para linhas de montagem de produtos os mais variados possíveis e, no caso do sistema de produção em estudo, produção contínua propriamente dita, nome reservado nessa classificação para as chamadas indústrias de processo, como química, papel, aço, tratamento de minérios, etc. Esses processos contínuos tendem a ser altamente automatizados e a produzir produtos com elevado grau de padronização, sendo qualquer diferenciação pouco ou nada permitida.

Neste caso, a produção é feita em campanhas (ou lotes). Ao término da fabricação do lote de um produto, o próximo lote a ser produzido já toma o seu lugar nas máquinas através de um processo dinâmico e contínuo.

O sistema de produção em estudo pode ser classificado como um sistema contínuo, pois suas variáveis mudam de valor continuamente ao longo do tempo. Até mesmo no momento de mudança de campanha de produção não existe um evento que a caracterize, provocando um truncamento no sistema, pois todos os eventos vão ocorrendo dinâmico e continuamente.

f) Simulação Contínua:

Na simulação contínua as variáveis do sistema têm valores que variam continuamente ao longo do tempo, o sistema é geralmente descrito por um conjunto de equações que dão o valor de todas as variáveis em todos os instantes de tempo. Exemplificando: pode-se avançar o tempo por um  $\Delta t$  tão pequeno quanto se queira e se encontrará um  $\Delta v$  correspondente.

#### g) Simulação Discreta

Na simulação discreta as variáveis têm seus valores definidos apenas em instantes de tempo nos quais ocorrem eventos (alteração no valor de uma ou mais variáveis de estado). O sistema é descrito por um conjunto de regras que determinam o tempo do próximo evento e as alterações nos valores das variáveis.

### 2.4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO

Há uma diversidade de opiniões de autores a respeito da simulação. Para alguns ela é sempre possível e para outros, em se tratando de processo contínuo, ela é impossível ou, no mínimo, limitada. A seguir, são mostradas algumas vantagens e desvantagens da simulação.

Pegden (1990) aponta as seguintes vantagens da simulação:

- 1) uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas;
- 2) a metodologia de análise utilizada pela simulação permite a avaliação de um sistema proposto, mesmo que os dados de entrada estejam, ainda, na forma de “esquemas” ou rascunhos;
- 3) a simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos;
- 4) enquanto modelos analíticos requerem um número muito grande de simplificações para torná-los, matematicamente, tratáveis e analisam um número limitado de medidas de desempenho, a simulação não necessita de tantas simplificações para analisar qualquer medida concebível;
- 5) uma vez que os modelos de simulação podem ser quase tão detalhados quanto os sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxos de informação, etc, podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado;

- 6) hipóteses sobre como e porque certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação;
- 7) o tempo pode ser controlado, pode ser comprimido ou expandido, permitindo reproduzir os fenômenos de maneira acelerada ou lenta, para que se possa melhor estudá-los;
- 8) pode-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
- 9) a identificação de “gargalos”, preocupação maior no gerenciamento operacional de inúmeros sistemas, tais como fluxos de materiais, de informações e de produtos, pode ser obtida de forma facilitada, principalmente com a ajuda visual;
- 10) um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema opera, em oposição à maneira com que todos pensam que ele opera;
- 11) novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência podem ser tratadas, de tal forma que se possa ter, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: “o que aconteceria se...?”

Cassel (1996) cita uma pesquisa realizada por Hollocks (1992): 65 empresas do Reino Unido, que utilizavam ou já haviam utilizado a simulação, responderam quais os principais benefícios com o uso desta técnica. Os benefícios mais citados são mostrados na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Benefícios da simulação mais citados (Hollocks, 1992).

<b>Benefícios</b>	<b>% das Empresas</b>
Redução de risco	80
Melhor entendimento	75
Redução dos custos operacionais	72
Redução do tempo em processo	72
Mudanças mais rápidas da planta	52
Redução dos custos de capital	48

Segundo Cassel (1996), aplicações com sucesso da simulação já foram realizadas em várias empresas e as cifras poupadas por elas foram muito grandes, por exemplo: Northern Research and Engineering Corp. (US\$ 750.000,00), Exxon (US\$ 1,4 milhões), Draw Tite Inc. (US\$ 80.000,00).

De acordo com pesquisas recentes, verificou-se que a simulação é uma das técnicas quantitativas mais empregadas. Segundo Saliby (1989), os motivos de tamanha aplicabilidade são os seguintes:

- Maior disponibilidade de recursos computacionais: a cada ano ocorre alguma novidade envolvendo tecnologias de informática voltadas para simulação, o que contribui sobremaneira para a sua crescente aplicação em diversos segmentos sociais.
- Modelos mais realistas: a simulação não nos obriga a enquadrar um problema em determinado molde, como ocorre em programação linear. Assim, em lugar de soluções exatas para problemas aproximados, teremos soluções aproximadas para problemas reais.
- Soluções rápidas: no ambiente dinâmico e conturbado de hoje, principalmente no caso do Brasil, soluções rápidas são mais úteis que morosas soluções exatas.

- Processo de modelagem evolutivo: um modelo de simulação normalmente não é estanque, permitindo ajustes e aperfeiçoamentos que se tornam necessários com a evolução do sistema.
- Facilidade de comunicação: é muito mais fácil entender uma simulação do que um conjunto de complicadas equações matemáticas. Atualmente, já existe a simulação visual, que mostra em um vídeo uma imagem animada do problema.
- Problemas mal estruturados: a simulação é uma das poucas ferramentas para o estudo deste tipo de problema. Mas deve-se tomar cuidado com a solução obtida.

Em relação aos problemas mal estruturados, Simon (1969) afirma que “uma simulação nunca será melhor que suas próprias premissas”. As premissas às quais ele se refere constituem a definição do problema. Portanto, é de suma importância que o usuário conheça o sistema e saiba definir com precisão o problema e os objetivos da simulação.

Cassel (1996) enumera as seguintes desvantagens para a simulação:

- devido à sua natureza estocástica, os modelos de simulação devem ser rodados várias vezes antes que se possa prever o desempenho do sistema;
- normalmente os modelos de simulação são caros e consomem muito tempo para serem desenvolvidos e analisados;
- a simulação é muito dependente da validade do modelo desenvolvido;
- a simulação não fornece o resultado ótimo para o problema, ela só testa as alternativas dadas pelo usuário.

## 2.5. APLICAÇÕES DA SIMULAÇÃO EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

Dentre as vantagens da simulação, destaca-se a sua flexibilidade e facilidade de emprego e utilização. Segundo Menezes e Rodrigues (1995), “a flexibilidade envolvida na modelagem é a característica talvez mais importante de um pacote de simulação”.

A simulação abriu um enorme campo de aplicação pelo fato de utilizar ferramentas probabilísticas e conseguir representar as variações que ocorrem em sistemas industriais. Menezes e Rodrigues (1995) afirmam que existem duas grandes classes de softwares de simulação: a linguagem de simulação gráfica e os simuladores.

“Na linguagem de simulação, um modelo é desenvolvido escrevendo-se um programa usando modelos construtivos da linguagem, como entidades, atributos, recursos e filas. A grande vantagem das linguagens é a capacidade de modelar quase todos os tipos de sistemas de manufatura. As suas desvantagens, se comparadas com alguns simuladores, são a necessidade de um bom programador e possivelmente o grande período de tempo gasto para codificar e depurar o programa, que é proporcional à complexidade do sistema de manufatura. Exemplos de linguagem de simulação: GPSS, MODSIM II, SIMAN/Cinema IV, SLAMSYSTEM”.

“Nos simuladores, os sistemas a serem simulados não precisam ser programados, eles são selecionados escolhendo-se os itens no menu. A grande vantagem dos simuladores de manufatura é que o tempo de programação necessário é bem menor que o tempo necessário para uma linguagem de simulação. Outra vantagem é a maior facilidade de utilização por parte de um leigo em programação. A maior desvantagem dos simuladores básicos é a sua limitação em modelar outras configurações de manufaturas. Exemplos de simuladores: FACTOR/AIM, Micro-Saint, ProModelPC, WITNESS, SIMFACTORY”.

Segundo Sastry (1992), os primeiros esforços para a aplicação de simulação em computador para a engenharia de processamento de minérios são datados do início dos anos 60.

### 2.5.1. Aplicações da Simulação na Mineração

Sturgul (1999), levantou, em uma seqüência cronológica, as aplicações mais relevantes de simulação na mineração.

- Em 1961, Rist descreveu um modelo para determinar o número ótimo de trens no transporte de uma mina subterrânea, usando técnicas de Monte Carlo.
- Em 1964, o modelo de Rist foi ampliado por Harvey.
- Em 1965, Sanford desenvolveu uma dissertação de mestrado sobre simulação de correias transportadoras.
- Em 1965, Calder e Waring apresentaram uma discussão sobre um pacote computacional de simulação desenvolvido para a mina de Carol no Canadá.
- Em 1967, O'Neil e Manula usaram um modelo de simulação para manuseio de material em uma mina a céu aberto.
- Em 1967, Manula e Venkataraman simularam um sistema de carga e transporte em uma mina a céu aberto.
- Em 1968, Bucklen, Suboleski et al voltaram a discutir a questão da simulação de transporte por trens em minas subterrâneas.
- Em 1969, Cross e Williamson, assumindo que todos os tempos eram determinísticos, construíram um modelo computacional para estudar alocação fixa versus alocação dinâmica de caminhões, em uma mina de cobre nos Estados Unidos.
- Em 1969, Suboleski e Lucas criaram um programa denominado Simulator 1 que simulava operações em minas subterrâneas que operavam no método de câmaras e pilares.

- Em 1973, Bauer e Calder mostraram as vantagens do uso de GPSS para simular operações em minas a céu aberto.
- Em 1976, Bobilier, Kahan et al usaram GPSS para simular transporte por trens em minas subterrâneas.
- Em 1982, Steiker também usou GPSS para simular sistema de transporte em mina subterrânea.
- Em 1987, Sturgul e Yi basearam-se no estudo de Cross e Williamson e construíram um modelo em GPSS, assumindo um processo estocástico ao invés de determinístico para o cálculo dos tempos. Sturgul mostrou como GPSS pode ser usado na simulação de problemas de mineração.
- Em 1989, Sturgul e Harrison usaram GPSS para simular uma operação de lavra com o objetivo de selecionar métodos de lavra e equipamentos.

Além dos trabalhos citados acima, Basu e Baafi (1999), Knights e Bonates (1999), Konyukh, Galiyev e Li (1999), Panagiotou (1999), Sturgul e Li (1997) e Vagenas (1999) relacionaram uma série de trabalhos de simulação em mineração, que são mostrados a seguir.

- Em 1964, Elbrond desenvolveu um modelo de simulação de um sistema de transporte por trens para a mina subterrânea de ferro da LKAB, em Kiruna, Suécia.
- Em 1970, Wilke relatou o desenvolvimento de um modelo de simulação para estudar um sistema de transporte por trens em uma mina subterrânea de carvão na Alemanha.
- Em 1975, Redling usou um pacote conhecido como SIGUT para a modelagem de sistemas de correias transportadoras e carregamento e transporte, tratando dados de natureza estocástica, em minas subterrâneas de carvão, na Alemanha.
- Em 1976, Wilke et al descreveram trabalho de simulação realizado para determinar se o critério de despacho melhoraria a eficiência de um sistema subterrâneo de carregamento e transporte por trens.



- Em 1982, Wilke descreveu o desenvolvimento de um programa de computador para simular a Mina Bong, na Libéria. O objetivo principal do simulador era minimizar custos com carregamento e transporte.
- Em 1984, Nogueira descreveu a aplicação de um modelo de simulação para melhorar a operação de escavadeiras e caminhões na mina a céu aberto de ferro Cauê, da CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), em Itabira/MG.
- Em 1984, White e Jones divulgaram 7 programas desenvolvidos nos Estados Unidos para simular operações de lavra, em minas de carvão a céu aberto, com aplicação de escavadeira de arrasto.
- Em 1990, Braga et al descreveram a aplicação de um modelo de simulação para determinação dos limites da cava final e seqüência de remoção de blocos da mina de fosfato da Arafertil, em Araxá/MG.
- Em 1990, Tavares e Rúbio descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação usado para prever o desempenho de recuperação de carvão e determinar o teor de cinzas da alimentação, em uma planta de beneficiamento da Companhia Riograndense de Mineração.
- Em 1991, Baunach, Grimson e Wagstaff, usando SIMAN e CINEMA, identificaram gargalos de produção em um sistema de manuseio de material, envolvendo seis minas de carvão.
- Em 1992, Vagenas et al descreveram o desenvolvimento do METAFORA, um simulador para controle de despacho de sistemas de carregamento e transporte com escavadeiras e caminhões para minas a céu aberto. O programa foi escrito em Turbo Pascal e usava CAD para a visualização do movimento dos caminhões.
- Em 1992, Tsiflakos et al apresentaram um método interativo para modelagem de sistemas de mineração por simulação que usava modelagem orientada a objeto e visualização gráfica.
- Em 1992, Lanna et al desenvolveram um modelo de simulação para dimensionamento da frota de caminhões da mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.

- Em 1992, Pereira descreveu um modelo de simulação para estudar o efeito de alocação dinâmica na produtividade, comparado ao do modelo convencional de despacho, na mina de ferro Conceição da CVRD, em Itabira/MG.
- Em 1992, Faria desenvolveu um modelo de simulação para avaliar a operação de transporte por caminhões e determinar o custo adicional envolvido nas operações de blendagem, da mina de ferro da Ferteco Mineração, em Minas Gerais.
- Em 1992, Hoare e Willis, usando SIMAN e CINEMA, simularam um sistema de caminhões e britadores, variando o número de caminhões, numa mina de chumbo e zinco no oeste da Austrália.
- Em 1993, Mutagwaba et al descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação, escrito em C++, usando técnicas de projeto orientado a objeto, para servir como ferramenta para tomada de decisão em sistemas de transporte de mina.
- Em 1993, Espinoza relatou os resultados obtidos no desenvolvimento de aproximadamente vinte projetos de simulação para a mina de cobre El Teniente da Codelco, no Chile.
- Em 1994, Mevorach desenvolveu um simulador para operações de “stackers” e correias transportadoras em uma mina de linhito, na Grécia.
- Em 1994, Bustamante, Giacamen e Barra desenvolveram um modelo de simulação em GPSS/H e Proof Animation para a usina de fundição de cobre de El Teniente, da Codelco, no Chile. Este modelo foi uma interessante contribuição, pois usou simulação discreta para um sistema com variáveis inerentemente contínuas.
- Em 1994, Kolonja e Mutmansky usaram modelos de simulação e animação para avaliar a eficiência de vários procedimentos de despacho de caminhões em uma mina a céu aberto.
- Em 1994, Hunt usou SLAMSYSTEM para simular um sistema de transporte numa mina subterrânea do Colorado.
- Em 1995, Sturgul et al aplicaram GPSS/H e PROOF Animation em Cabillo e Rawhide (minas de carvão a céu aberto), Wyoming, para responder questões do tipo “o que aconteceria, se”, visando aumento de produção.

- Em 1995, Jacobsen et al usaram modelos de simulação e animação para determinar o número ótimo de caminhões, escavadeiras e barcas no estágio de projeto da mina e para determinar quando um novo caminhão deveria ser adicionado à frota durante a operação da mina de Lihir (mina de ouro a céu aberto), em Papua Nova Guiné.
- Em 1995, Sturgul fez uma abordagem superficial sobre aplicações de simulação e animação na mineração. Neste trabalho, ele cita a existência de alguns sistemas de simulação e animação tais como SIMAN, CINEMA e ARENA, GPSS/H e PROOF Animation, SLAMSYSTEM, MODSIM III / SIMFACTORY / SIMPROCESS e WITNESS. Cita também aplicações destes sistemas na simulação de alguns modelos específicos para mineração.
- Em 1996, Sturgul e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para prever a produção para uma variedade de combinações de carregadeiras e caminhões com um sistema de despacho em Hibbing (mina de ferro a céu aberto), Minnesota.
- Em 1996, Sturgul, Jacobsen e Tecsá usaram modelos de simulação e animação para analisar tráfego em duas mãos, num plano inclinado, em The Greens Creek Mine, Alaska.
- Em 1996, Baafi e Ataepour, usando ARENA, construíram modelos de simulação e animação para comparar a produtividade de um sistema caminhão e escavadeira com e sem despacho.
- Em 1996, Runciman, Vagenas e Newson, usando WITNESS, simularam diversas operações em uma mina subterrânea, superando as expectativas.
- Em 1997, Galiyev usou simulação de mina para analisar alternativas de combinações de tecnologias e equipamentos, estudar os melhores trajetos para transporte, locais de escavadeiras, previsão de produção e pesquisar a confiabilidade do equipamento, no Kazaquistão.
- Em 1997, Panagiotou et al apresentaram um conjunto de programas chamado STRAPAC 2 que foi desenvolvido para assistir aos engenheiros no planejamento e análise de operações de escavadeiras e caminhões em minas a céu aberto. O

simulador foi escrito em MS – Visual C++, enquanto o modelo de simulação de máquina foi escrito em GPSS/H.

- Em 1997, Medved et al descreveram o desenvolvimento de um modelo de simulação escrito em GPSS/H para estudar o sistema de transporte de caminhões, na mina de urânio Zirovski Vrh., na Eslovênia. O modelo foi usado para analisar distintos cenários de padrões de tráfego, utilização dos caminhões e custo operacional.
- Em 1997, Erdem et al apresentaram uma série de modelos de simulação por computador que foram desenvolvidos como parte de um sistema inteligente para otimizar a operação de escavadeiras de arrasto em minas de carvão a céu aberto.
- Em 1997, Bazante desenvolveu um modelo para avaliar a eficácia do sistema de escavadeiras e caminhões na mina de asbesto Cana Brava, da SAMA, em Goiás.
- Em 1997, Vargas descreveu um modelo de simulação discreta para analisar a viabilidade de instalação de uma pilha de homogeneização no projeto de mineração de níquel de Minorco's Lomas, na Venezuela.
- Pavlovic (1997) e Lazic et al (1998) simularam operações contínuas em uma mina de linhito, na Iugoslávia, utilizando programas em FORTRAN.
- Em 1998, Agioutantis et al descreveram o desenvolvimento de um simulador para estudar o desempenho de equipamentos, na mina a céu aberto de linhito de Northern Field, na Grécia. Um pacote de simulação visual chamado Micro Saint também foi usado.
- Em 1998, uma equipe de simulação da Fluor Daniel, coordenada por Rod Hoare, simulou operações na interface mina / planta de beneficiamento e ferrovia / porto e também realizou estudos de expansão de capacidade de várias instalações e estudos de aumento de áreas de armazenagem.
- Em 1998, Konyukh usou GPSS/H e Proof Animation para escolher a tecnologia de transporte mais produtiva e compor o sistema sem gargalos, para minas subterrâneas da Rússia.

- Em 1998, Rakishev, em Almaty, Kazaquistão, simulou um sistema escavadeira / ferrovia, onde fatores tais como confiabilidade de equipamento e duração de processos foram introduzidos aleatoriamente.
- Em 1998, Li desenvolveu, na China, um ambiente de simulação visual sem programação, para sistemas de mineração.
- Em 1998, Sturgul e Knights desenvolveram um modelo de simulação, usando a linguagem GPSS/H para verificar estimativas de produção para o primeiro ano de operação da mina de cobre El Abra, no Chile.
- Em 1998, Knights e Muñoz usaram a linguagem de simulação SLAM – II para modelar o tempo perdido em filas em um sistema de carregamento e transporte semi-automatizado de uma mina subterrânea.
- Em 1998, Quesada et al usaram as linguagens de simulação e animação SIMAN e ARENA para modelar a produtividade de LHD's em operações de uma mina subterrânea.
- Dubiel e Laing (1998), Vagenas et al (1998) e Yazici e Baiden (1999) registraram desenvolvimento e aplicações de simulação a eventos discretos em companhias de mineração pelo Inco Limited e Noranda e Falconbridge Limited.
- Em 1999, Runciman et al relataram aplicações das ferramentas de simulação Witness pelo Lanner Group e Auto Mod pelo Autosimulations Inc., nos Estados Unidos.

É pertinente mencionar mais dois casos de aplicação de simulação em minerações da região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

- Em 1995, Pinto cita, resumidamente, o uso do SIMUL na construção de um modelo para simulação de perfuração numa mina pertencente às Minerações Brasileiras Reunidas (MBR).
- Em 1997, Carvalho e Duarte, usando um simulador da Nordberg, estudaram várias alternativas para operar totalmente a seco a planta de peneiramento e

britagem da Samarco Mineração S.A. Atualmente, a planta está funcionando da maneira prevista, confirmando os resultados da simulação.

Como se pode notar, pelas citações acima, a evolução da modelagem e simulação para mineração foi muito rápida, porém, segundo Pinto (1999), o número de aplicações ainda é muito pequeno devido a duas limitações básicas:

- a) inflexibilidade dos modelos tipo “pacotes computacionais fechados”;
- b) falta de adequação das linguagens atualmente existentes.

O presente trabalho também busca preencher uma lacuna existente nas aplicações de simulação no campo da mineração, que é a simulação das operações de uma usina de tratamento de minérios, que é um sistema contínuo, usando um sistema de simulação a eventos discretos.

## 2.6. MÉTODO DE CONDUÇÃO DE PROJETOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Law e McComas (1992) mostram oito elementos fundamentais para o sucesso de um projeto de simulação. Eles estão divididos em três classes: técnica, gerencial e precisão dos dados.

Técnica:

- conhecer sobre a metodologia de simulação, modelos estocásticos de pesquisa operacional e teoria das probabilidades e estatística;
- modelar a aleatoriedade do sistema de maneira razoável;
- escolher o software de simulação adequado e utilizá-lo corretamente;
- usar procedimentos estatísticos apropriados para interpretar os dados de entrada e saída da simulação.

Gerencial:

- formular corretamente o problema;
- empregar técnicas de gerenciamento de projetos.

Precisão dos dados:

- obter boa informação nos procedimentos de operacionalização do sistema e lógica de controle;
- estabelecer a validade e credibilidade do modelo.

Levando-se em consideração estes elementos, deve-se seguir um método no estudo de simulação, Law e Kelton (1991) desenvolveram uma estrutura para gerenciar as diferentes etapas do trabalho. A figura 2.4 ilustra a seqüência de etapas a serem consideradas. Em seguida, uma breve explicação de cada etapa.

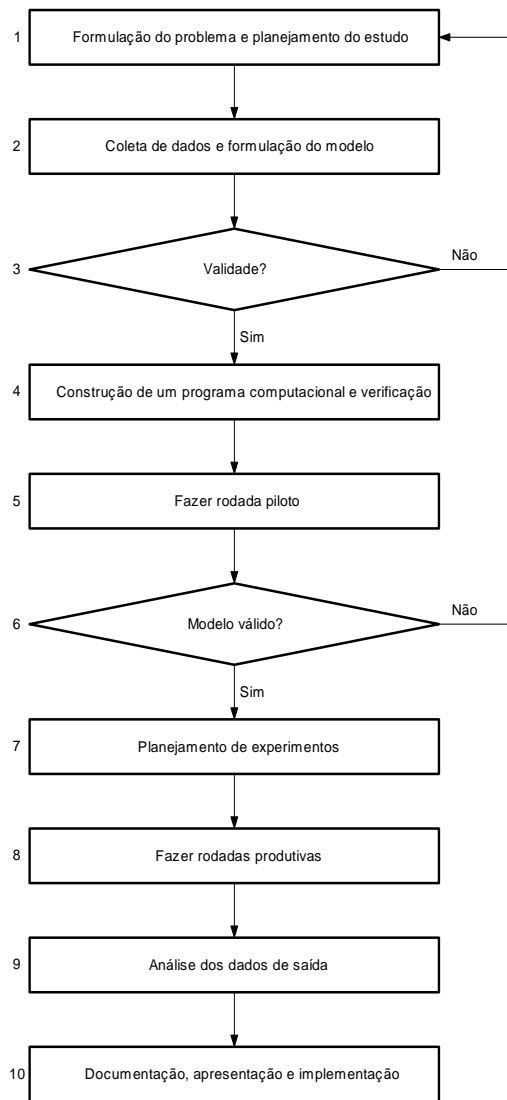


Figura 2.4: Passos num estudo de simulação (Law e Kelton, 1991).

1 – Formulação do problema e planejamento do estudo: todo estudo deve começar com o estabelecimento claro de seu objetivo principal e dos pontos específicos a serem verificados. Nesta etapa também se definem as alternativas a serem testadas e quais os pressupostos a serem adotados.



2 – Coleta de dados e formulação do modelo conceitual: as informações e os dados de interesse devem ser coletados e usados para esclarecer os procedimentos operacionais e definir as distribuições de probabilidades para as variáveis utilizadas no modelo.

3 – Validade: nesta etapa é necessário que o usuário interaja com as pessoas que conhecem o processo intimamente para verificar se seu modelo é válido em termos conceituais e nos dados coletados.

4 – Construção de um programa computacional e verificação: deve-se escolher um software de simulação e transformar o modelo teórico em um programa computacional. A escolha do software dependerá das características que se deseja dele. Depois de o programa estar pronto, deve-se verificá-lo, usando técnicas de verificação, para checar se há erros de lógica e sintaxe.

5 – Replicação piloto: deve-se fazer rodadas piloto para validar o programa na fase seguinte.

6 – Validação: feita para atestar se as rodadas piloto têm como saídas informações que refletem o sistema real.

7 – Planejamento do experimento: como a simulação tem uma natureza estocástica, ela apenas estima o comportamento do sistema para determinados parâmetros. Por isso é necessário planejar o experimento definitivo. É importante salientar a importância da definição do período de tempo para que os parâmetros estejam em condições apropriadas para a simulação daquele instante. Este intervalo de tempo é conhecido como aquecimento e seus resultados são desprezados.

8 – Fazer rodadas produtivas: considerando os parâmetros estabelecidos na etapa anterior, faz-se as rodadas para levantamento dos resultados dos cenários escolhidos.

9 – Análise dos dados de saída: técnicas estatísticas devem ser utilizadas para analisar os dados de saída. Nos casos de várias alternativas, escolhe-se a melhor opção.

10 – Documentação, apresentação e implementação: como os projetos de simulação quase sempre são usados novamente, é necessário documentar todo o projeto, a fim de poder utilizá-lo no futuro. Para que o estudo seja um sucesso, é preciso que o mesmo seja apresentado e implementado.

Neste trabalho, em linhas gerais, a seqüência adotada foi semelhante àquela proposta por Law e Kelton (1991), com uma ressalva: as etapas de coleta de dados e construção do programa computacional foram desenvolvidas simultaneamente, pois o modelo computacional é que define quais os dados precisam ser levantados; e a forma em que os mesmos estão disponíveis é pré-requisito para a modelagem computacional. Isto evita retrabalho e levantamento de dados inúteis.

Como este trabalho não se encaixa em uma classificação de pesquisa-ação, ele será encerrado na apresentação, ficando a implementação para uma fase posterior.

## 2.7. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Segundo Scherer (2001), as principais características que um software de simulação precisa ter são:

- flexibilidade: esta característica diz respeito à capacidade do software de modelar diferentes sistemas industriais;
- facilidade de programação: alguns softwares necessitam de um bom programador para serem utilizados enquanto que outros permitem que um leigo, em alguns instantes, já consiga utilizá-lo;

- tratamento estatístico: como quase todos os sistemas industriais exibem algum tipo de comportamento randômico, um pacote de simulação precisa ter boa capacidade estatística;
- portabilidade: é desejável que um software possa ser rodado em computadores de menor porte como PC's;
- dados de saída inteligíveis: os dados de saída devem ser claros e parametrizáveis, preferencialmente com a opção de saídas gráficas;
- utilização de dados externos: é interessante que o software tenha uma interface para a aquisição de dados de outros programas;
- velocidade na execução do modelo: o software deve ser o mais rápido possível na execução do modelo para que o mesmo possa ser simulado frequentemente;
- animação gráfica: a animação gráfica ajuda na verificação e na validação dos modelos, facilita a apresentação dos mesmos a pessoas não familiarizadas com a técnica de simulação e também o entendimento do comportamento dinâmico do sistema, bem como ajuda no treinamento de pessoal.

## 2.8. O SOFTWARE ARENA

Nas páginas seguintes, serão usados alguns termos em inglês. A tradução para o português, quando necessária, será feita, quando não, o termo será mantido em inglês.

O ARENA é um sistema de simulação a eventos discretos que analisa o cenário operacional, focando nos processos existentes no sistema em estudo. O ARENA usa uma interface gráfica para o usuário (GUI – “Graphical User Interface”), que automatiza o processo através do uso do “mouse”, reduzindo a necessidade do teclado do microcomputador.

O ARENA foi desenvolvido pela empresa Systems Modeling em 1993 como sucessor do SIMAN e CINEMA, que foram desenvolvidos em 1982 e 1984, respectivamente. O SIMAN é uma evolução do GPSS, lançado pela IBM em 1961. O CINEMA foi o primeiro software de animação para PC.

O ARENA é uma aplicação do Microsoft Windows, e todas as características e operações usuais estão dentro do padrão Windows. Por este motivo, ele é totalmente compatível com outros softwares Windows, como processadores Word, planilhas e pacotes CAD.

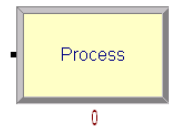
O ARENA é, ao mesmo tempo, uma linguagem de simulação e um ambiente de trabalho e experimentação, que pode ser usado para testar o modelo e fazer a apresentação de seus resultados, através de avançados recursos de animação.

Compondo o mesmo pacote do ARENA, o software Input Analyzer realiza o tratamento estatístico dos dados de entrada, adequando-os às seguintes distribuições de probabilidades: Beta, Empírica Contínua, Empírica Discreta, Erlang, Exponencial, Gamma, Johnson, Lognormal, Normal, Poisson, Triangular, Uniforme e Weibull.

O processo de modelagem (construção do modelo) nada mais é do que o ato de “explicar” ao ARENA como funciona o sistema. Essa “explicação” é feita através de uma linguagem de fácil entendimento, semelhante a um fluxograma.

O fluxograma é constituído de formas geométricas que representam procedimentos, decisões a serem tomadas, início e término de processos, etc. No ARENA, estas formas geométricas são substituídas pelos “templates”, que são os campos que reúnem os módulos básicos e avançados usados para a construção do fluxo de processo. A construção do modelo dentro do ARENA é feita através dos elementos disponibilizados nos “templates”. Estes elementos são de dois tipos distintos:

*Módulos de fluxograma:* são usados para construir o fluxograma da área de trabalho. Cada módulo pode ser colocado quantas vezes se fizerem necessárias para a construção do modelo. Possuem pontos de entrada e saída, usados para estabelecer interconexões e criar o fluxo do processo. Exemplo: módulo Process.



*Módulos de dados:* apesar de aparecerem na janela do “template”, não são colocados na área de trabalho. Ao serem selecionados, apresentam sua lista de dados na área de planilha, onde podem ser editados, excluídos ou inseridas novas informações. Exemplo: módulo Resource.



Resource

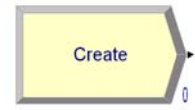
Ao construir um fluxograma, é usado o ponto de vista da parte dinâmica do sistema, ou seja, aquilo que se movimenta ou “passa” dentro do sistema. Por exemplo, em um processo de uma linha de produção, este elemento é uma peça, se for um hospital, são os pacientes, se for uma agência bancária, são os clientes. Essa parte que percorre o fluxo é chamada de “entidade”, e o fluxograma representa a estrutura estática ou fixa do sistema, assim como os processos de decisão e desvio correspondentes.

O modelo de simulação no ARENA possui uma parte que representa a estrutura disponível e as regras de trabalho e a outra parte “circulante”. Assim, um modelo de simulação é montado usando-se os elementos explicados anteriormente, criando um fluxograma que contém as regras de funcionamento do sistema e os recursos que o constituem. Iniciando a simulação, o ARENA introduz a parte circulante, representando as peças passando pela linha, ou pessoas passando pela agência bancária. Conforme mencionado acima, estas partes circulantes são as entidades.

O “template” básico do ARENA (Basic Process) reúne os elementos fundamentais para a construção dos modelos. Os principais elementos estão descritos a seguir:

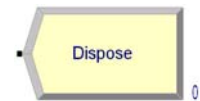
## Create

Este módulo serve para introduzir as entidades no modelo, segundo intervalos de tempo definidos através de uma distribuição probabilística e seus parâmetros de média e desvio padrão. Além destes, também é necessário inserir dados como a definição do tipo da entidade, a unidade de tempo da distribuição, o número de entidades que entram no sistema por vez, o máximo de entidades que pode entrar no sistema e pode também inserir restrição com o momento da primeira criação de entidade.



## Dispose

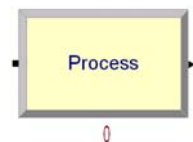
Este módulo tem função inversa à do módulo Create. Ele tem a função de retirar as entidades do sistema. Neste módulo só é possível ativar a coleta de estatísticas sobre as entidades.



## Process

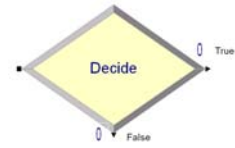
O módulo Process tem a função de representar qualquer ação dentro do sistema que leve um tempo para ser cumprida. Também é capaz de representar a ocupação de um recurso. A ação a ser tomada pelo recurso pode ser de: espera, ocupa-executa, ocupa-executa-libera, executa-libera ou só executa; o tipo da ação depende das regras impostas durante o fluxo das entidades.

Além disso, neste módulo também pode(m) ser declarado(s) o(s) recurso(s), juntamente com sua(s) capacidade(s), que é(são) alocado(s) durante a realização das atividades. O tempo de execução de cada processo é uma variável aleatória definida por uma distribuição probabilística. Define-se a distribuição desejada e coloca-se os parâmetros necessários de média e desvio padrão. Aqui já pode ser iniciado o processo de análise de custo, podendo ser definida a situação de custo associada ao processo. Por motivo de falta de tempo, na fase final deste trabalho, o módulo de custo não foi contemplado.



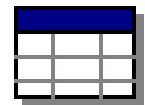
## Decide

O módulo de fluxograma Decide representa uma ramificação/decisão no fluxo do processo. Ele serve para alterar o rumo das entidades baseado em uma condição do sistema ou de um percentual probabilístico. Neste módulo deve ser definido o tipo de decisão a ser tomada (por condição ou probabilidade) e também a referida condição (ou probabilidade) a ser satisfeita para que ocorra o desvio.



## Entity

O módulo de dados Entity reúne as definições e parâmetros referentes a todos os tipos de entidades usados pelo modelo. A entrada de dados é realizada através da área de planilha ou de uma caixa de diálogo. Neste módulo é definida a figura a ser utilizada para representar a entidade quanto à animação da simulação e dados sobre valores de custo para este tipo de entidade em diferentes situações: custo inicial de valor agregado, custo inicial sem valor agregado, custo inicial de espera, de transferência e também custo de espera por hora.



**Entity**

## Resource

O módulo de dados Resource relaciona todos os recursos usados no modelo. Por recurso, entende-se uma estrutura que será usada pela entidade, a qual irá despende uma certa quantidade de tempo neste processo. Neste módulo são inseridas informações sobre o tipo de recurso (capacidade fixa ou baseada em uma programação) e a sua referida capacidade ou programação, informações sobre custos deste recurso como: custo operando, custo ocioso, valor agregado ou não e são declaradas as falhas programadas para o mesmo.



**Resource**

## Run Setup

Os estudos de simulação geralmente são feitos em um período limitado de tempo ou conjunto de períodos idênticos. No ARENA, isto pode ser configurado na janela “Replication Parameters” que se encontra representada na figura 2.5. Neste módulo, são configurados os parâmetros das replicações como: o número de replicações (intervalos de tempo) a ser simulado, o tempo de preparação do sistema para o mesmo entrar em regime, ou melhor, tornar-se mais estável, duração de cada intervalo de tempo, opções de inicialização entre as replicações (reiniciar as estatísticas e/ou o estado do sistema), como também uma condição para término da simulação.

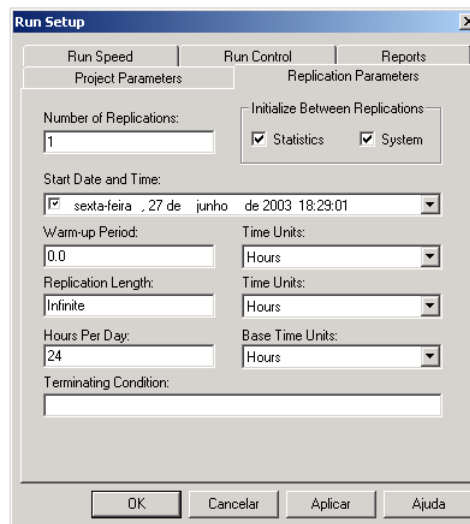


Figura 2.5: Representação do módulo de parâmetros da replicação.

## Configuração da coleta de informações estatísticas

Ao rodar a simulação, o ARENA coleta informações estatísticas padrões sobre os vários elementos do modelo, como filas (tempo de espera na fila, quantidade na fila, etc.), recursos (utilização, número de paradas, etc.) e outros. O usuário também tem a possibilidade de criar suas próprias coletas de dados. Os dados coletados constituem um relatório ao término da simulação.



### 2.8.1. Aplicações do ARENA

Além das vantagens citadas, vê-se, pelos exemplos de aplicações listados abaixo, que o ARENA é um software de simulação bastante versátil, adequado a diversos tipos diferentes de sistemas. Fonte: Paragon Consulting Technology.

- Logística de suprimento de madeira para a Aracruz Celulose – 2001.
- Expansão da aciaria da empresa Aços Vilarés / Sidenor – 2001.
- Implantação de novo forno magnésiano da empresa Ibralog / Magnesita – 2001.
- Análise de impacto do mix produtivo da Compaq Computers – 2000.
- Definição da composição ótima para transporte ferroviário urbano para a Cia. Paulista de Transporte Municipal – 1999.
- Simulação da cadeia de suprimentos da Scania – 1997.
- Simulação da nova fábrica da General Motors do Brasil – 1996.
- Dimensionamento da frota de rebocadores da Petrobrás S.A. – 1995.
- Identificação do mix ótimo para célula de termoformagem da Plascar – 1995.
- Balanceamento macro entre setores fabris da Amortecedores Cofap – 1995.
- Comparação entre diferentes métodos de produção da Mercedes Benz – 1994.
- Dimensionamento da frota de transporte interno da Usiminas – 1994.

### 2.8.2. Principais elementos em um modelo de simulação

Segundo Kelton et al. (2002), os principais elementos que fazem parte de um modelo de simulação estão descritos a seguir.

- a) Modelo: é a representação de um sistema. Existem várias formas de se classificar modelos. Os modelos são tipificados como icônicos (representação fiel do sistema, geralmente em escala diferente da real), analógicos (as

propriedades do sistema são representadas por outras equivalentes) e simbólicos (as propriedades do sistema são representadas por símbolos). Outro tipo de classificação distingue os modelos em estáticos e dinâmicos. Os modelos estáticos não consideram explicitamente a variável tempo, possuem relações determinísticas e são, normalmente, tratados por técnicas analíticas. Os modelos dinâmicos tratam com interações variáveis no tempo (o estudo do sistema em um certo instante interfere no estado do sistema no instante seguinte). Também existe uma caracterização importante para os modelos, que diz respeito às situações discreta e contínua. Um modelo discreto sofre alterações repentinas no tempo. As mudanças no estado do sistema são expressas em termos do estado do sistema no início do período. As mudanças durante um intervalo de tempo são calculadas e é deduzido um novo estado do sistema para o final deste período e início do seguinte. Um modelo contínuo sofre constantes e suaves alterações no tempo. Uma situação bastante comum é tratar um sistema contínuo como sendo uma seqüência de pequenas alterações discretas no tempo. Por fim, também são diferenciados os modelos determinísticos dos estocásticos. Os modelos determinísticos não tratam variáveis randômicas e as características operacionais envolvem relações exatas. Quando pelo menos uma variável do sistema se comporta de forma probabilística, diz-se tratar de um modelo estocástico.

- b) Entidade: também chamada de transação, é um elemento essencial para o modelo. Cada tipo de entidade (pessoa ou objeto) possui um ciclo de vida, onde estados ativos e passivos se alternam. Uma entidade pode ser classificada como temporária ou permanente. As entidades temporárias entram no sistema, percorrem o seu ciclo de vida e abandonam o mesmo. As entidades permanentes executam a sua função sem abandonar o sistema. A chegada de entidades ao sistema é gerada por um procedimento externo, ou de acordo com a necessidade imposta pelo estado do sistema. Na visão da simulação discreta convencional, as entidades temporárias são criadas primeiro. Elas participam de atividades e requisitam recursos. Uma vez terminada a atividade, a entidade é removida.

Trata-se de uma transação passiva, onde nenhum mecanismo considerado “inteligente” é assumido ou modelado.

- c) **Atributo:** são as propriedades características de cada entidade. O uso de variáveis e atributos permite uma maior personalização do modelo, tanto em termos de estatística como de lógica. Variáveis e atributos são ambos meios de armazenamento de valores, com apenas uma diferença fundamental: variáveis guardam valores que ficam disponíveis para todo o modelo, e atributos guardam valores individuais para cada entidade. A figura 2.6 mostra um diagrama que representa, graficamente, a área de abrangência:

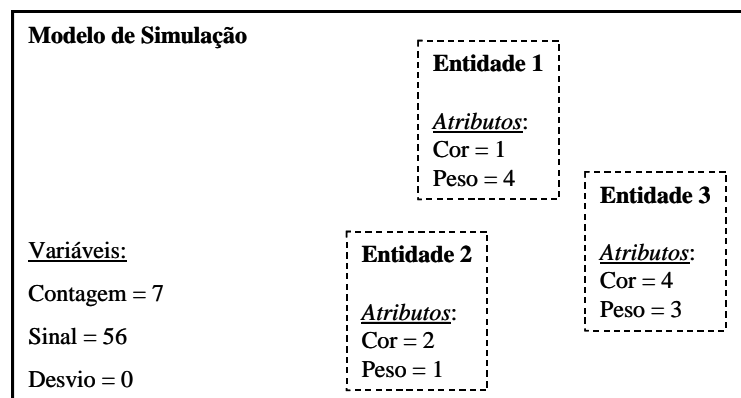


Figura 2.6: Ilustração do comportamento de variáveis e atributos em um modelo de simulação.

Portanto, cada entidade tem os seus próprios valores de atributo, enquanto que o valor das variáveis é o mesmo para todo o modelo e para todas as entidades.

- d) **Atividade:** é uma seqüência de procedimentos que causa mudança no sistema. A atividade corresponde a um estado ativo, comum a uma ou mais entidades (ou classe de entidades). A duração de uma atividade pode ser determinística ou estocástica. Assume-se que uma atividade é indivisível. Uma vez iniciada, ela não mais é interrompida. Segundo Reddy (1995), as atividades podem ser físicas

ou cognitivas. As atividades físicas são as formas convencionais de atividades, em torno das quais a simulação tem sido desenvolvida. As atividades cognitivas são formas de tomada de decisão racional e inteligente. Da mesma forma que as atividades físicas, as atividades cognitivas possuem tempo finito de duração, que pode ser randômico ou dependente das informações e/ou decisões do sistema.

- e) Evento: as atividades são iniciadas e terminadas por eventos. Eventos são instantes no tempo, enquanto atividades possuem durações no tempo. Evento é o ponto no tempo no qual acontece alguma mudança no sistema modelado. O processamento de um evento é realizado por uma rotina. Normalmente, a ocorrência de um evento dispara a ocorrência de outro(s) evento(s). Da mesma forma que as atividades, os eventos podem ser físicos ou cognitivos. As rotinas associadas aos eventos físicos são análogas às rotinas dos eventos tradicionais da simulação discreta. Os eventos cognitivos envolvem processamento de conhecimento, análogo ao procedimento cognitivo desempenhado pelo tomador de decisão. Rotinas de eventos cognitivos irão conter conhecimentos, representados por regras de produção e heurísticas, que serão processados quando uma decisão precisar ser tomada (Reddy, 1995).
  
- f) Acumuladores: são variáveis que permitem medir o desempenho do sistema. Possuem esse nome porque vão acumulando valores no tempo, para depois receberem tratamento de análise e gerar as estatísticas da simulação.
  
- g) Relógio: variável que marca o tempo de simulação do sistema. Por exemplo: o modelo tem um tempo real de execução de dez horas, mas o relógio marcará o tempo do período simulado, como no caso deste trabalho, 1 ano.
  
- h) Lista de Eventos Futuros: estrutura de dados que armazena os eventos previstos para ocorrer no futuro. Esses eventos são armazenados por ordem cronológica de ocorrência.

- i) Cenário: é uma experimentação estruturada, com um conjunto de configurações de dados e de entidades do sistema. Pode-se construir vários cenários para testar várias hipóteses.
- j) Aquecimento: é o período inicial da simulação no qual todas as estatísticas geradas são expurgadas pelo simulador, uma vez que as mesmas, devido a uma variação excessiva, são inadequadas à análise. O tempo de aquecimento é dimensionado para terminar no momento em que a simulação inicia a fase de estabilidade.
- k) Replicação: é a execução do modelo no computador. Representa o período de tempo de início e fim de um ciclo de eventos da simulação. Não inclui o período de aquecimento.
- l) Rodada (ou corrida): é o período compreendido entre o início e o fim da simulação. Envolve o período de aquecimento e todas as replicações.
- m) Variáveis de Estado: é o conjunto de variáveis que identificam o estado do sistema em um determinado instante de tempo.
- n) Recurso: é uma entidade do modelo (equipamento ou pessoa) que serve entidades dinâmicas. Esse atendimento pode ser feito simultaneamente a várias entidades. Uma entidade pode solicitar parte da capacidade ou a capacidade total do recurso.
- o) Filas: são os estados passivos pelos quais as entidades passam. Constituem locais de espera onde as entidades dinâmicas esperam sua vez de seguir através do sistema. As filas podem ser chamadas de áreas de espera ou pulmões (“buffers”). Depois de dar entrada na fila a entidade é retirada seguindo algum

tipo de critério, por exemplo, FIFO (“first in first out” – primeiro a entrar é o primeiro a sair), LIFO (“last in first out” – último a entrar é o primeiro a sair), HVF (“high value first” – maior valor primeiro), LVF (“lower value first” – menor valor primeiro) ou um critério pré-estabelecido.

## **CAPÍTULO 3**

### **APLICAÇÃO PILOTO**

Este capítulo contém uma descrição rápida da Samarco Mineração S.A., mostrando seu ramo de atuação, composição acionária, o percentual de distribuição das vendas de seus produtos nas diversas regiões do mundo e seus diferenciais competitivos.

Também apresenta o sistema industrial a ser estudado, a usina de concentração. É descrito todo o fluxo de processo da mesma para facilitar o entendimento de como ela opera.

Finalmente, mostra a aplicação da técnica de simulação através do software ARENA, versão 7.01, onde são criados e testados alguns cenários operacionais por meio de alterações de variáveis do sistema, a fim de validar o modelo desenvolvido.

#### **3.1. COMENTÁRIO SOBRE A SAMARCO**

A Samarco Mineração S.A. é uma empresa de lavra, beneficiamento, transporte, pelotização e exportação de minério de ferro. Seu controle acionário é dividido entre a CVRD (50%) e a BHPBilliton (50%), respectivamente, a maior produtora/exportadora e a terceira maior produtora de minério de ferro do mundo.

Atualmente, a China é o principal destino das pelotas da Samarco, respondendo por cerca de 37% da carteira de vendas da empresa, seguida pelo restante da Ásia e Oriente Médio, com 19% cada; Europa, com 16% e Américas, com 9%.

As operações da Samarco Mineração S.A. constituem um processo integrado da mina ao porto, envolvendo atividades de mineração e metalurgia extrativa nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Na unidade de Mariana (MG), a matéria-prima (minérios de ferro) passa pelas etapas de lavra, transporte, peneiramento, britagem, concentração e transporte via mineroduto. Na unidade de Anchieta (ES), a matéria-prima (concentrado de minérios de ferro) segue pelas etapas de filtragem, moagem em prensa de rolos, pelotização, estocagem e embarque em terminal portuário próprio, situado no mesmo município.

Em 1977, a empresa começou a operar com diferenciais baseados em tecnologia de ponta e inovação, atributos que, ainda hoje, contribuem para mantê-la entre as principais mineradoras do mundo. O transporte via mineroduto, o terminal portuário próprio, as correias transportadoras de longa distância que levam o minério das frentes de lavra até as plantas de britagem e concentração, as duas usinas hidrelétricas e duas das maiores usinas de pelotização do mundo formam o alicerce inovador de um processo produtivo de alta eficiência e baixo custo.

### 3.2. PROCESSO PRODUTIVO A SER ESTUDADO

A seguir, o processo industrial em estudo será explicado, sucintamente, destacando somente o papel exercido por cada uma das etapas do mesmo. O anexo I apresenta o fluxograma completo da usina de concentração da Samarco Mineração S.A.. Visando um melhor entendimento do mesmo, é salutar fazer um acompanhamento através do anexo I.

A usina de concentração tem como objetivo concentrar os minérios de ferro que chegam, na planta industrial, com teores de 47,5 a 49,5% de ferro metálico, para teores de 66,5 a 68,0%. Para a produção de concentrado de minério de ferro são necessárias as etapas descritas a seguir.



## ALIMENTAÇÃO

O minério é retomado da pilha pulmão (estoque intermediário entre a britagem e a pré-moagem) através de quatro linhas paralelas de alimentadores rotativos e correias transportadoras que alimentam, ora as linhas de moagem pré-primária, ora as linhas da moagem primária, dependendo das disponibilidades dos equipamentos envolvidos nestas duas etapas. O circuito usual é através da moagem pré-primária.

## PRÉ-MOAGEM (OU MOAGEM PRÉ-PRIMÁRIA)

Esta etapa é constituída por correias transportadoras, dois moinhos de bolas e bombas de polpa, que bombeiam o material para as caixas de descarga dos moinhos primários. A função dos moinhos pré-primários é realizar uma moagem mais grosseira do material.

## MOAGEM PRIMÁRIA

Esta parte do processo, que contém quatro moinhos de bolas, caixas de descarga, hidrociclones e bombas de polpa, finalizam o trabalho de fragmentação (ajuste a uma granulometria mais fina) do material, com o objetivo de liberar fisicamente os minerais de ferro da sílica, preparando a matéria-prima para a etapa de flotação convencional.

Das caixas de descarga dos moinhos primários, o material é bombeado para as baterias de hidrociclones primários que separam o material mais fino que segue para a etapa de deslamagem, do material que precisa ainda ser cominuído. Trabalhando em circuito fechado, isto é, o material que entra neste circuito só o deixa quando estiver na granulometria adequada, assim, quando o sistema atinge a estabilidade, uma carga circulante constante alimenta o moinho primário. Nas caixas de descarga, ocorre a adição de soda cáustica para dispersar a lama, visando melhor desempenho na etapa de deslamagem.

## DESLAMAGEM

Os “overflows” dos hidrociclones primários, que correspondem à alimentação nova da usina, seguem o circuito e passam por três etapas de deslamagem, pela ordem, nos hidrociclones raspadores, limpadores e deslamadores, que têm o objetivo de retirar a lama do minério, preparando-o para a etapa de flotação convencional. As lamas, que constituem a fração ultrafina, saem pelos “overflows” das etapas e vão para a planta de recuperação de finos. Os underflows das duas últimas etapas de deslamagem, livres da presença de lamas, alimentam a etapa de flotação convencional.

## HIDROCICLONAGEM DE FINOS (PLANTA DE FINOS)

Esta etapa separa parte dos minerais de ferro e sílica da fração ultrafina que constitui a lama final do processo. O underflow alimenta as colunas de finos e o overflow segue para o espessamento de lama.

## ESPESSAMENTO DE LAMA

Recebe toda a lama final da usina (overflow da hidrociclonagem da planta de finos) e reaproveita a água, que retorna ao processo, descartando a lama para a barragem de rejeito. Nos dois espessadores, para acelerar a sedimentação, são adicionados cal e floculante.

## COLUNAS DE FINOS (PLANTA DE FINOS)

Nesta etapa, é feita a concentração do material, adicionando os reagentes amido e amina para separar a sílica dos minerais de ferro. Normalmente, em campanhas de sílica normal e alta, o material concentrado da planta de finos é direcionado para os espessadores de concentrado, pois o seu teor de sílica já se encontra dentro do limite de especificação máximo, e em campanha de sílica baixa, ele é bombeado para o distribuidor de polpa DPS e tratado como concentrado convencional. As colunas de finos tratam também o concentrado recuperado vindo do recleaner. Além do concentrado, é gerada uma parcela de rejeito que segue para a barragem de rejeito.

## FLOTAÇÃO CONVENCIONAL

A flotação convencional também opera com quatro linhas e tem a função de retirar a sílica do material através da adição de reagentes: amina para coletar a sílica e amido de milho, que é gelatinizado com soda cáustica, para deprimir (ou afundar) os minerais de ferro. São gerados dois produtos, o concentrado convencional que segue o circuito e o rejeito que é enviado para enchimento da cava da antiga Mina do Germano.

## HIDROCICLONAGEM SECUNDÁRIA

Processo que visa separar o material que já se encontra em granulometria suficiente para passar por outra etapa de concentração via flotação em coluna de um material que ainda é necessário ser cominuído, nos moinhos secundários, antes de se juntar à fração fina que alimenta a flotação em colunas.

## MOAGEM SECUNDÁRIA

Assim como os moinhos primários, os moinhos secundários visam adequar a granulometria do material para a etapa seguinte de flotação em colunas. É importante salientar que o objetivo principal é apenas de redução de granulometria e não de liberação de partículas mistas.

## FLOTAÇÃO EM COLUNAS (RECLEANER)

Nesta etapa, é feita a concentração do material, utilizando amido para deprimir os minerais de ferro, separando-os da sílica. Neste processo são gerados três produtos: o concentrado do recleaner que segue o circuito, o rejeito final que vai para a cava da antiga Mina do Germano e o concentrado recuperado que é bombeado para as colunas de finos.

## RECICLONAGEM

Etapa semelhante à hidrociclonação secundária, que tem o objetivo de classificar o material, enviando o produto pronto físico-quimicamente para o espessador de concentrado e o material que ainda necessita se adequar às especificações de superfície específica e granulometria para a remoagem. É nesta etapa do processo que ocorre a entrada, no circuito da usina de concentração, do concentrado, adquirido da CVRD pela Samarco, a uma taxa instantânea máxima de 300 toneladas por hora.

## REMOAGEM

Tem a finalidade de adequar o produto underflow da reciclonagem às especificações de superfície específica e granulometria do produto final. A remoagem compreende uma etapa de hidrociclonação, trabalhando em circuito fechado com moinhos secundários.

## ESPESAMENTO DE CONCENTRADO

Finaliza o processo da usina de concentração, elevando o percentual de sólidos do concentrado final, através da adição de amido e floculante, adequando-o ao transporte via mineroduto, e reaproveitando a água, que retorna ao processo.

### 3.3. APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Para a descrição da aplicação da simulação computacional, é feita, inicialmente, uma rápida análise do procedimento atual para a tomada de decisão na usina de concentração.

Em seguida, é mostrado como foi desenvolvido o trabalho. Neste tópico, são apresentados os procedimentos para levantamento e tratamento de dados e construção do modelo computacional. A partir daí são definidos os indicadores de desempenho e as variáveis que devem fazer parte do projeto de experimentos que avalia os diversos cenários de operação. A validação do modelo deve ser confirmada antes dos experimentos.

### 3.3.1. Cenário Atual para a Tomada de Decisão

O processo de tomada de decisão, em ambientes industriais do tipo da Samarco, possui uma elevada complexidade devido às suas características sistêmicas e estocásticas. Soluções otimizadas localmente podem prejudicar o desempenho global do sistema produtivo. Entretanto, essa “visão sistêmica” dificilmente é possível quando tratada de uma maneira empírica manual, possibilitando um conjunto de percepções difusas sobre a realidade.

Atualmente as decisões são tomadas baseadas no conhecimento e experiência das equipes técnica e gerencial que atuam na administração da usina de concentração. Em se tratando de alteração no circuito ou projeto de maior porte, evidentemente, a decisão só é tomada após a realização de um teste industrial.

Este é um procedimento correto, que evita erros graves, porém a realização do teste pode gerar custos, perdas de recursos e paradas de equipamentos. O que se propõe é a criação de uma ferramenta computacional que analise virtualmente o sistema, eliminando ou reduzindo a necessidade dos referidos testes e propiciando uma base estatística ao processo de tomada de decisões.

### 3.3.2. Desenvolvimento do Trabalho

O desenvolvimento do trabalho utilizou o método de condução de projetos de simulação citado anteriormente no capítulo 2.

A simulação do processo de concentração foi feita com o software ARENA, que é um sistema de simulação a eventos discretos. Por se tratar de um sistema contínuo de produção o modelo foi construído de forma que o fluxo de produção fosse puxado, assemelhando-se ao método de Kanban, para que assim fosse possível a verificação do rendimento operacional dos recursos, através do IROG, e assim, identificar o gargalo do processo. A técnica de Kanban será explicada, sucintamente, adiante.

Após o estudo detalhado do processo a ser analisado e a elaboração do fluxograma completo da usina (anexo I), foi identificada a necessidade de realizar simplificações para facilitar o processo de modelagem computacional.

As simplificações feitas são representadas no fluxograma da modelagem conceitual (anexo II) e foi estabelecido que alguns recursos seriam agrupados e estudados em conjunto, e a estes agrupamentos foi dado o nome de “caixas pretas”. As figuras 3.1 e 3.2 exemplificam este procedimento. Na figura 3.1, é apresentada uma pequena parte do fluxo total de processo da usina, destacando as etapas de moagem primária e deslamagem da linha 01. A figura 3.2 mostra as mesmas etapas, porém transformadas em caixas pretas e inseridas no modelo computacional.

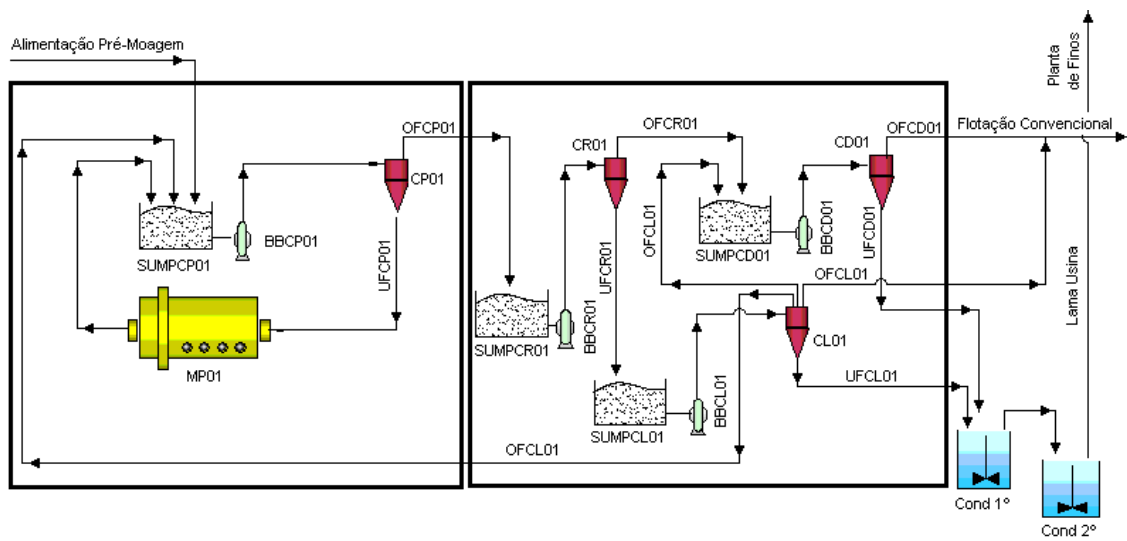


Figura 3.1: Parte do fluxograma de processo real da usina de concentração.

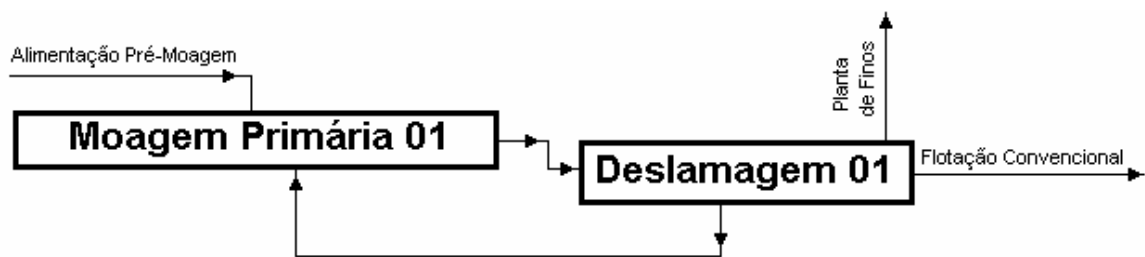


Figura 3.2: Parte do fluxograma da modelagem conceitual.

A ferramenta criada é um sistema de simulação discreta de um modelo a eventos discretos onde o processo de produção contínuo foi discretizado no tempo e modelado, utilizando variáveis estocásticas (disponibilidade dos recursos) e determinísticas (capacidade dos recursos). A discretização adotada foi a massa de 1 tonelada de matéria-prima, ou seja, estabeleceu-se que a entidade, no modelo, equivale a 1 tonelada de minério. Conseqüentemente, cada recurso, de acordo com a sua capacidade máxima, gasta um determinado tempo para tratar cada entidade, ou seja, cada recurso gasta uma determinada quantidade de minuto para atravessar 1 tonelada de minério.

O simulador construído propicia a análise das alterações de desempenho da usina, em cada cenário escolhido, através de uma visão sistêmica do processo.

A ferramenta computacional criada será alimentada com dados de capacidades máximas das etapas, duração e intervalo entre paradas de equipamentos e partições e terá como dados de saída a produção e o IROG em cada etapa.

### 3.3.2.1. Levantamento e Tratamento dos Dados de Entrada

Após estabelecida a modelagem conceitual, foi iniciada a etapa de coleta e tratamento dos dados. Primeiramente, foi feito um planejamento para definir os procedimentos a serem adotados, envolvendo questões do tipo: quais os dados devem ser levantados? Onde procurá-los? Qual o período a ser investigado? Qual a frequência (Horária? Diária? Semanal? Mensal? Etc)? Qual o software a ser adotado no tratamento estatístico dos dados? Qual o procedimento para eliminar dados expúrios? Como e por quanto tempo armazená-los? Quais as pessoas ligadas ao sistema industrial devem ser entrevistadas? Quais esclarecimentos são necessários nessas entrevistas?

Esta etapa, juntamente com a de construção do modelo computacional, foram, sem dúvida, as mais trabalhosas. A busca pelas fontes dos dados é um processo moroso. É muito importante verificar se a fonte dos dados é confiável. Esta etapa é tão importante quanto a criação do modelo, pois se o simulador for alimentado com dados imprecisos, ele fornecerá resultados errados.

A maior parte dos dados foi coletada de relatórios do Sistema de Informação Samarco (SIS), Sistema de Informação de Produção, Vendas e Embarque (SIPVE) e Sistema Gerencial de Manutenção (SIGMA), e o período escolhido foi o de 01/02/2002 a 31/01/2003, estratificado por campanha de produção: CLS (concentrado de sílica baixa), CNS (concentrado de sílica normal) e CHS (concentrado de sílica alta). Escolheu-se o último período de doze meses, antes do início da etapa de levantamento e tratamento de dados, em que a usina de concentração operou a plena carga.



Vale ressaltar que dados históricos precisam ser conferidos para a verificação da existência ou não de erros e dados dúbios. Todas as paradas de todos os equipamentos da usina de concentração existentes no SIGMA (Sistema Gerencial de Manutenção) foram coletadas e exportadas para planilhas do Microsoft Excel, utilizando o programa SIS Equipamentos, desenvolvido especificamente para este trabalho.

De posse destes dados, fez-se necessária a eliminação de redundâncias e adequação dos dados dos recursos aos dados relativos às caixas pretas. Após esta etapa, foi realizado o cálculo dos tempos entre paradas e duração das paradas das caixas pretas, pois era conhecida a data inicial e final das ocorrências.

Uma das mais importantes tarefas na análise de dados para a simulação consiste em encontrar uma distribuição teórica de probabilidades que seja compatível com a frequência de dados reais. A seleção deve ser feita utilizando critérios visuais, experiência do modelador e considerações teóricas. Neste sentido, os dados relativos a duração das paradas (“TTR – time to repair”) e intervalo entre paradas (“TBF – time between failure”) receberam tratamento estatístico com o aplicativo Input Analyzer, da Rockwell Software. Esta ferramenta, presente no ARENA, determina a distribuição de probabilidades que melhor represente um certo conjunto de dados. Além disto ela faz testes de aderência de distribuições específicas (pertencentes ao software), permitindo a comparação de várias distribuições e mostra também o efeito da troca dos parâmetros das mesmas.

Na figura 3.3, um exemplo de gráfico do Input Analyzer para os dados de paradas de um equipamento da usina, destacando o histograma da distribuição de dados reais e a curva representativa da distribuição teórica mais adequada a estes dados.

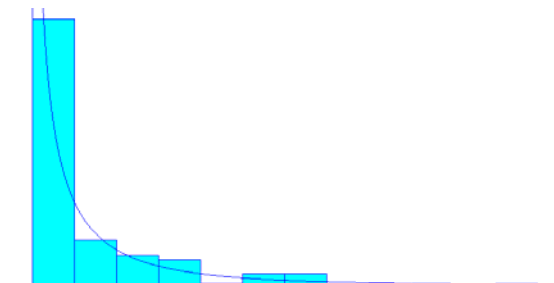


Figura 3.3: Representação visual da distribuição de probabilidades feita no Input Analyzer.

A figura 3.4 mostra os resultados dos testes de aderência para o mesmo conjunto de dados através do erro quadrado (“square error”). Observa-se que, neste caso, a distribuição Weibull, apresentando o menor erro quadrado, é a mais adequada.

```

=====
Fit All Summary
Data File: Exemplo.txt

Function      Sq Error -----
Weibull      0.00232
Beta         0.00368
Lognormal    0.00961
Gamma        0.0275
Exponential  0.0357
Erlang       0.0357
Normal       0.258
Triangular   0.373
Uniform      0.419
    
```

Figura 3.4: Exemplo da análise de comparação entre as distribuições de probabilidades feita no Input Analyzer.

O anexo III mostra todas as distribuições de probabilidades dos dados de paradas e intervalo entre paradas dos equipamentos da usina inseridas no modelo computacional.

Além dos dados de paradas de equipamentos, foram coletados dados sobre:

- consumo de insumos: corpos moedores, amido, amina, floculante e cal em todas as etapas do processo em que eles são adicionados e o consumo total de soda cáustica;
- consumo de energia elétrica;
- a análise química, contendo teores de ferro, sílica, alumina, PPC (perda por calcinação) e fósforo em todos os produtos da usina, desde a alimentação até o concentrado final;
- as massas, em t/dia, nos pontos de amostragem do balanço de massas;
- dados históricos de partições, complementados por dados gerados a partir de amostragens no sistema real;
- as recuperações metálicas;
- a mineralogia dos minérios alimentados na usina.

É importante mencionar que, usando o software estatístico MiniTab, foram calculados os coeficientes de regressão linear (R), com o objetivo de checar a existência de correlação entre a mineralogia da matéria-prima entrante na usina com a produção, teores de ferro e sílica do concentrado Samarco, superfície específica e granulometria do concentrado final, teores de ferro e sílica do concentrado convencional e consumos de todos os reagentes.

Após o estudo, constatou-se que todas as correlações são fracas, inferiores a 0,6. Isto significa que os resultados obtidos na usina não dependem somente da qualidade da matéria-prima. Outros fatores tais como o rendimento operacional dos recursos e atuação das equipes de operação também influenciam os resultados da usina. **Mediante**

**estes resultados obtidos, conclui-se que não é possível inserir, no modelo, previsões de desempenho da usina de acordo com a qualidade da matéria-prima entrante. Talvez, num trabalho posterior, seja interessante tentar modelar as leis que regem esses fenômenos, adotando alguma técnica que seja adequada para tal.**

A seguir, são apresentadas as premissas estabelecidas para o tratamento dos dados:

- todos os dados de duração de paradas e intervalo entre paradas foram calculados em minutos;
- as paradas de um equipamento por causa da parada de outro, classificadas como “em função de” foram eliminadas;
- paradas curtas, com intervalos inferiores a 10 minutos, foram reunidas em uma parada única, como se fizessem parte da regulagem do recurso para entrar plenamente em operação;
- as paradas de equipamentos por motivo de parada geral foram expurgadas;
- operação de moinho somente com água (sem minério) foi considerada como parada;
- as paradas das caixas pretas foram relativas à interação entre as paradas dos recursos que delas fazem parte;
- não foram consideradas paradas para manutenção da reciclonagem e espessadores de concentrado fora dos dias de parada geral;
- as paradas de equipamentos foram estratificadas por tipo: mecânicas, operacionais, elétricas e de instrumentação (estas duas últimas foram reunidas devido ao número muito reduzido de ocorrências).

### 3.3.2.2. Construção do Modelo Computacional

Depois da modelagem conceitual, simultaneamente à coleta e tratamento de dados, iniciou-se a construção do modelo computacional.

Algumas técnicas utilizadas para sua elaboração são descritas a seguir.

O modelo foi discretizado em uma tonelada, ou seja, cada recurso despende um certo tempo para processar uma tonelada; neste caso (min/t).

A decisão básica e principal a respeito da lógica de modelagem foi uma adaptação da técnica de produção enxuta, que utiliza o sistema de Kanban, em processos seriados de manufatura. Ribeiro (1989) define o Kanban como sendo “um sistema de controle da produção, comandado através do uso de cartões, onde quem determina a fabricação de um novo lote é o consumo das peças realizado pelo setor seguinte”. Fazendo-se uso desta definição e adaptando-a a um sistema de fluxo puxado de produção, uma etapa só enviará material à etapa seguinte quando esta estiver em condições (disponibilidade de recurso e capacidade produtiva) para produzi-lo.

Neste processo, as filas são aqui declaradas como números determinísticos (seriam como os cartões do sistema Kanban) e servem de calibração do modelo computacional; quanto menor, maior a aderência.

Admitindo esta consideração, as entidades que ocupam o recurso do processo inicial esperarão uma condição da teórica fila do processo seguinte para a liberação deste recurso inicial e seguir o fluxo. Esta fila teórica neste processo contínuo pode também ser entendida como o material que está em trânsito de um processo para o outro. Sendo assim, a teórica fila do modelo computacional se comporta como os cartões do sistema Kanban. Esta explicação é melhor entendida, analisando o diagrama ilustrativo da figura 3.5.

É importante salientar que, no processo contínuo em estudo, as filas não são materializadas através de estoques em processo, o que ocorre, na verdade, são sinais de transbordos e uma conseqüente redução de alimentação.

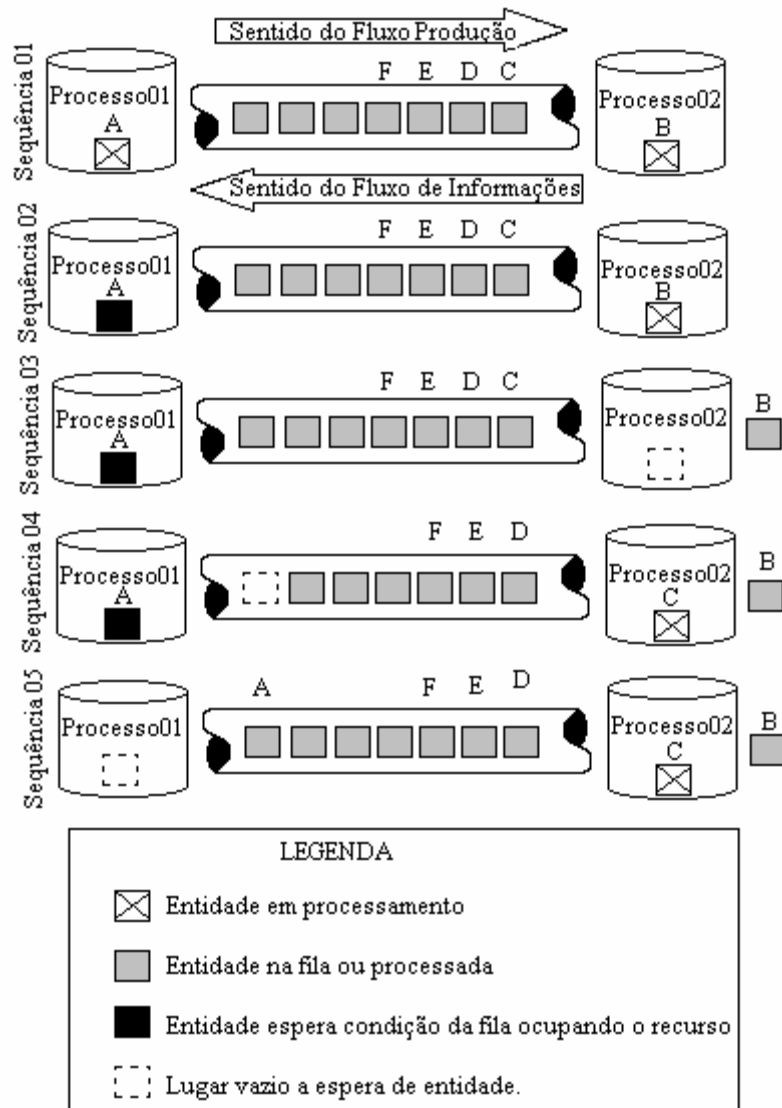


Figura 3.5: Esboço ilustrativo do comportamento da fila em um processo de produção contínuo.

Na Situação 01, a entidade A está ocupando o recurso do Processo 01 e sendo processada, enquanto a entidade B está ocupando o recurso do Processo 02 e sendo processada.

Na Situação 02, a entidade A já foi processada, mas ainda ocupa o recurso do Processo 01 devido a espera da condição da fila entre o Processo 01 e 02 ser menor que 07, e a entidade B ainda está sendo processada pelo Processo 02.

Na Situação 03, a entidade A ainda ocupa o recurso do Processo 01 e aguarda a condição da fila entre o Processo 01 e 02 ser menor que 07. A entidade B libera o recurso do Processo 02.

Na Situação 04, a entidade A ainda ocupa o recurso do Processo 01 e aguarda a condição da fila entre o Processo 01 e 02 ser menor que 07. A entidade C ocupa o recurso do Processo 02 e inicia o processamento, liberando uma entidade da fila entre o Processo 01 e 02.

Na Situação 05, a entidade A libera o recurso do Processo 01 porque a fila entre o Processo 01 e 02 é menor que 07, neste caso 06. A entidade C ainda ocupa o recurso do Processo 02 e continua em processamento.

Considerações da modelagem computacional relativas a:

#### **Lógica de decisão**

- conforme já comentado anteriormente, a lógica de modelagem adotada é baseada na técnica de Kanban;
- todos os processos de redirecionamento de material distribuem seus produtos de acordo com os processos de menor fila. Isto confirma a utilização do método abordado no item anterior.

#### **Cálculo das informações das caixas pretas**

- as capacidades das caixas pretas foram definidas através do fechamento dos balanços de massas das mesmas, ou seja, a capacidade de uma caixa preta é igual à capacidade de seu componente que tem a menor capacidade;
- as paradas do processo de hidrociclonagem secundária foram inseridas nas paradas dos moinhos secundários da mesma linha para facilitar a lógica da

modelagem. Parada de moinho secundário provoca também parada da hidrociclonagem da mesma linha.

### **Partição**

- nas partições de produtos, as entidades se mantêm íntegras, ou seja, elas se dividem obedecendo à probabilidade atribuída, não sendo divididas em valores decimais de entidade (ex.: se 100 entidades entram num processo e sofrem uma partição de 30%, significa que 30 delas vão para um caminho e 70 vão para o outro).

### **Manobras**

- todas as paradas consideradas para a moagem pré-primária foram seguidas de operação em linha direta, isto é, os alimentadores enviam o material diretamente para a moagem primária, e, neste caso, há uma redução de capacidade do recurso que também foi considerada;
- as rotas de todas as entidades dentro do modelo computacional foram consideradas com tempo simbólico de 1 segundo, ou seja, o deslocamento da entidade dentro do circuito é feito quase que instantaneamente de um processo para o outro.

### **Preparação para a execução do aplicativo**

- foram consideradas 72 horas de parada geral por ano;
- o modelo foi rodado com 3 meses de aquecimento e 5 replicações de 362 dias, totalizando 1900 dias para cada cenário.

O período de aquecimento estabelecido antes da corrida de um modelo computacional, conforme explicado anteriormente, tem a finalidade de esperar que as estatísticas a



serem extraídas do experimento se estabilizem. Portanto todos os dados gerados dentro deste período são expurgados pelo simulador.

Neste trabalho, adotou-se um aquecimento de 90 dias, visando garantir a coleta de resultados, emitidos pelo simulador, compreendidos dentro da faixa de estabilidade do experimento. Na figura 3.6, um gráfico, gerado em um dos experimentos realizados, mostrando, em uma rodada piloto de 180 dias, o período de aquecimento separado por uma linha tracejada. Todos os resultados anteriores à linha tracejada foram expurgados.

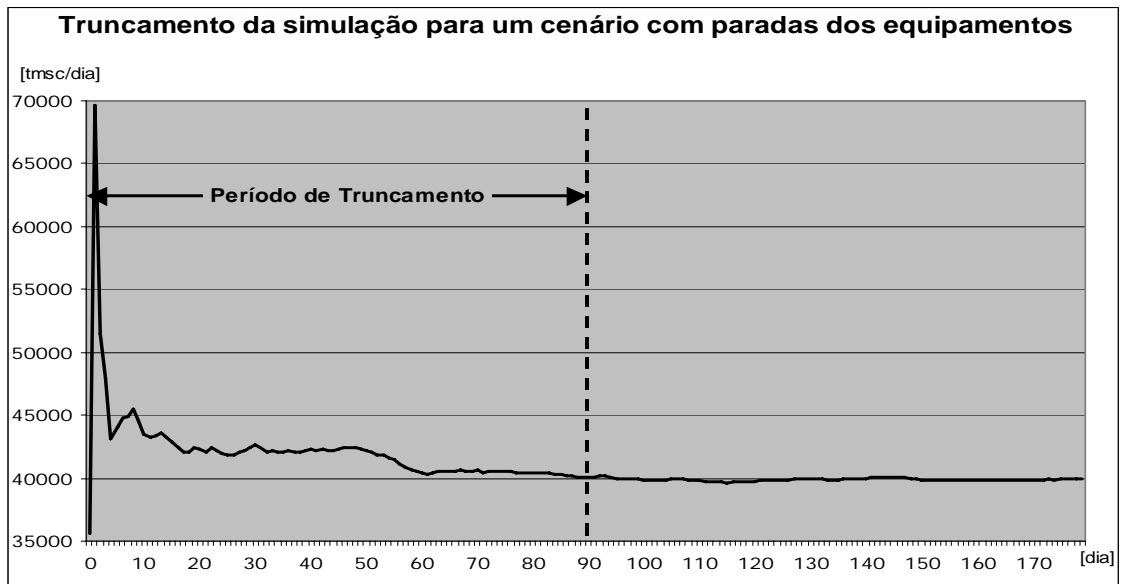


Figura 3.6: Gráfico mostrando truncamento após 90 dias de aquecimento.

O processo de alimentação foi pinçado de toda a estrutura do modelo computacional para servir como exemplo da lógica fundamental do modelo, que foi a aplicação da técnica de Kanban, que expressa, literalmente, um fluxo de produção puxado. A figura 3.7 apresenta o processo de alimentação modelado no ARENA e esclarece essa lógica citada anteriormente.

## Processo de Alimentação

Neste processo, existe um módulo que gerará uma, e somente uma, entidade (Módulo Create) que ativará o processo de criação das mesmas para o esquema de fluxo de produção puxado, isto é, só ocorrerá alimentação de entidades quando o sistema satisfizer a condição de alimentação. A figura 3.7 ilustra o processo de alimentação da linha 01 usado na modelagem computacional.

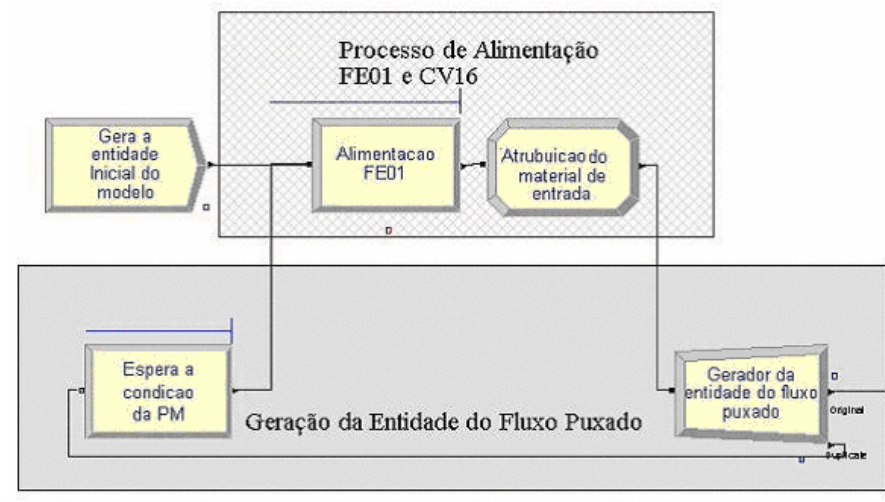


Figura 3.7: Processo de alimentação da modelagem computacional.

## Detalhando a Alimentação

A seguir, é feita a explicação da lógica, adotada na modelagem conceitual, que está por trás da figura 3.7. Serão usados os mesmos nomes, em inglês, para facilitar a conexão com o software utilizado.

**Módulo Create:** Gera a entidade inicial do modelo.

Neste módulo, há a criação de uma única entidade que serve para ativar o início da simulação.

**Módulo Process:** Alimentação FE01

Neste módulo, existem ações como: ocupar os recursos, tempo de processamento e liberação dos recursos. Aqui o único recurso ocupado foi a caixa preta da “Alimentação FE01” que é o recurso que faz a ação de processamento. Este tempo de processamento é o tempo que uma tonelada fica em processo nesta caixa preta.

**Módulo Assign:** Atribuição do material de entrada

Neste módulo, realiza-se as atribuições de valores para as variáveis de processo globais ou relativas à entidade, características das entidades e indicadores do processo.

**Módulo Separate:** Gerador da entidade do fluxo puxado

Este módulo é responsável pela duplicação da entidade, enviando uma para o próximo processo (moagem pré-primária, como é o caso deste exemplo) e a outra volta para um “loop” infinito, dentro do processo de Alimentação, que serve como um gerador de entidades.

**Módulo Hold:** Espera a condição da PM (Pré-moagem)

Este módulo espera a condição declarada para que a entidade prossiga o loop iniciado no processo anterior. Esta decisão é relativa à fila do processo posterior e à disponibilidade física do recurso seguinte. Resumindo, o modelo, como um todo, funciona de acordo com o comentário anterior: há sempre uma condição a ser respeitada para que uma entidade prossiga no fluxo de material e, após atingida esta condição, a entidade, se for caso de partição para fluxos diferentes, segue o caminho para o processo de menor fila.

### 3.3.3. Indicadores

Os indicadores de desempenho utilizados para a tomada de decisão, no modelo desenvolvido, são descritos a seguir:

- *volume de produção*: é a produção de concentrado em tmsc/ano (toneladas métricas secas de concentrado anuais) para cada cenário simulado;

- *rendimento global dos recursos*: é medido pelo Índice de Rendimento Operacional Global (IROG), já explicado anteriormente.

Nota: foi considerado um ano de 362 dias, pois 3 dias foram reservados para parada geral.

#### 3.3.4. Variáveis

As variáveis a serem consideradas na realização das rodadas de simulação, em cada um dos cenários desenvolvidos para a usina de concentração, são mostradas a seguir:

- capacidade dos recursos;
- duração das paradas dos recursos;
- tempo entre paradas dos recursos.

Outra variável do sistema, que não sofreu alteração durante os experimentos, mas que poderia, perfeitamente, ter sido alterada nos mesmos é a partição de produtos.

#### 3.3.5. Validação do Modelo

Validar um modelo significa comprovar que ele gera resultados muito parecidos com os do sistema real. Vale ressaltar que, devido à aleatoriedade dos resultados da simulação, várias replicações devem ser feitas, com o objetivo de definir um valor médio que melhor retrate a situação simulada. Este resultado médio é o parâmetro do modelo que deve ser checado quanto à sua validade.

Jain, R. (1991) afirma que “a validação completa de um modelo é um mito”. Na realidade, diz ele: “pode-se demonstrar que um modelo não é inválido para algumas das

situações comparadas. Provar que um modelo produz os mesmos resultados que o sistema original, em todas as circunstâncias, necessita uma quantidade muito grande de recursos”.

Pidd (1994) afirma que “um modelo válido é aquele irrefutável segundo pressupostos bem especificados”.

O método de validação adotado neste trabalho foi o de comparar os resultados da simulação com dados históricos. A comparação foi feita adotando-se como parâmetro a recuperação em peso no modelo e a recuperação em peso no sistema real no período de 01/02/2002 a 31/01/2003. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Método de validação do modelo computacional.

<b>Descrição</b>	<b>Simulador (tms/dia)</b>	<b>Real (tms/dia)</b>	<b>Diferença (%)</b>
Alimentação da Usina	59.248	61.060	- 2,97
Concentrado CVRD	5.345	5.414	- 1,27
Alimentação Total	64.593	66.474	- 2,83
Concentrado Samarco	35.831	36.700	- 2,37
Concentrado Total	41.176	42.114	- 2,23
<b>Recuperação em Peso</b>	<b>63,75%</b>	<b>63,35%</b>	<b>+ 0,63%</b>

Uma diferença de 0,63% é um resultado excelente, tendo em vista a grande variabilidade apresentada pelos sistemas real e virtual. Foi usada a recuperação em peso na validação, mas qualquer um dos outros indicadores da tabela 3.1 poderia ter sido

usado, devido à pequena diferença entre os números. Estes resultados atestam a validade do modelo para realizar as rodadas produtivas de simulação.

### 3.3.6. Cenários Construídos

A simulação computacional é uma técnica de experimentação da realidade. Entenda-se por experimentação, em termos de simulação, o processo de realização das replicações, no modelo computacional, de diversos cenários criados pelo usuário.

O projeto experimental adotado foi um projeto fracionário de 3 fatores a dois níveis (+,-), totalizando 8 experimentos, conforme apresentado na tabela 3.2. Por ser fracionário, apenas 5 dos 8 experimentos possíveis foram testados, como será visto adiante.

Os fatores definidos, a partir das variáveis apresentadas no tópico (3.3.4) deste capítulo, foram: paradas dos recursos, aumento de 25% na capacidade da flotação convencional e aumento de 100% no intervalo entre paradas (TBF) dos recursos. Os motivos para a escolha destes fatores são apresentados a seguir.

Experimentos são rodados sem as paradas de equipamentos, visando procurar o gargalo do processo, uma vez que, como será visto adiante, as paradas mascaram tal análise.

Através de resultados de testes reais já conduzidos na usina e da experiência de toda a equipe técnica e gerencial da área de Beneficiamento, tinha-se indicativos de que a flotação convencional fosse o gargalo do processo. Após a realização do primeiro experimento (cenário 1) isto ficou confirmado. Portanto, para conseguir um aumento real de capacidade em todo o processo, deve-se atuar primeiro no gargalo, que é a flotação convencional. O aumento de 25% de capacidade foi um número arbitrado.

O aumento do intervalo entre paradas dos recursos só é conseguido através de programas que visem redução de falhas e, conseqüentemente, de reparos corretivos no processo produtivo. Tendo em vista que a Samarco, no momento, está implantando programas de manutenção autônoma (Beneficiamento) e “Falha Zero” (Manutenção), foi oportuna a escolha do fator aumento do TBF para ser analisado via simulação. O aumento de 100% foi definido por ser uma meta ousada, porém factível.

Tabela 3.2: Experimentos possíveis do projeto.

Experimento	Com paradas dos recursos	Aumento de 25% na capacidade da flotação	Aumento em 100% no TBF dos recursos
1	-	-	-
2	+	-	-
3	+	+	-
4	+	-	+
5	+	+	+
6	-	+	-
7	-	+	+
8	-	-	+

O sinal (+) significa que aquele fator participa da análise e o sinal (-) significa que o fator não foi levado em consideração naquele experimento. Exemplo: no caso das paradas dos recursos, o sinal (+) quer dizer que as paradas foram incluídas nas rodadas de simulação e o sinal (-) significa que as replicações foram feitas sem as paradas dos recursos.

A experimentação exaustiva de todas as possibilidades, em termos práticos, muitas vezes demanda um tempo computacional proibitivo e geralmente não se faz necessária. Assim sendo, necessita-se de um projeto de experimentos que defina quais os principais cenários a serem observados, buscando reduzir o tempo computacional consumido sem prejudicar o resultado das análises.

Em termos do projeto, seria possível eliminar alguns experimentos sem significado prático. Os experimentos 7 e 8 não possuem significado, pois são experimentos sem as paradas e com aumento do TBF. O experimento 5 também não precisa ser realizado, pois ele reúne aumento de capacidade da flotação com a dobra do intervalo entre paradas, o que não vai acrescentar nada à análise, uma vez que os cenários 3 e 4 podem substituí-lo. A tabela 3.3 apresenta os experimentos remanescentes, aqueles que realmente foram simulados.

Tabela 3.3: Experimentos remanescentes.

Experimento	Com paradas dos recursos	Aumento de 25% da capacidade da flotação	Aumento em 100% no TBF dos recursos
1	-	-	-
2	+	-	-
3	+	+	-
4	+	-	+
6	-	+	-

Em resumo, os cenários realmente experimentados, após renomeados, são apresentados a seguir:

- Cenário 1: situação atual da usina sem paradas dos recursos;
- Cenário 2: situação atual da usina, incluindo as paradas dos recursos.
- Cenário 3: utilizando o Cenário 1 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04;
- Cenário 4: utilizando o Cenário 2 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04;
- Cenário 5: situação atual da usina, aumentando o tempo entre paradas dos recursos em 100%.

No capítulo seguinte, serão realizadas as análises relativas a estes cinco cenários simulados.



## **CAPÍTULO 4**

### **AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO**

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos em cada um dos cenários, através das alterações percebidas nos indicadores estabelecidos no capítulo anterior.

Além disso, são relatadas as dificuldades encontradas em todas as etapas deste trabalho, desde a formulação do problema e planejamento do estudo até a documentação e apresentação.

Este capítulo também aborda o objetivo principal deste trabalho que é a avaliação da potencialidade da aplicação da técnica de simulação computacional como uma ferramenta qualificada para o apoio à tomada de decisão para uma usina de tratamento de minérios.

#### **4.1. - RESULTADOS OBTIDOS**

Os resultados dos cinco cenários simulados são apresentados a seguir, destacando as alterações ocorridas nos indicadores, incluindo seis comparações entre os cenários tomados aos pares. Comparações também com os resultados históricos do período foram realizadas para alguns cenários.

Deve-se ressaltar que os resultados correspondem a 362 dias de produção rodados em cinco replicações, com aquecimento de 90 dias na primeira replicação.

Os resultados das replicações das simulações receberam tratamento estatístico, sendo calculados os intervalos de confiança para as médias, com aplicação da distribuição “t” de Student. A fórmula utilizada para o cálculo do semi-intervalo de confiança “h” foi:

$$h = t_{n-1, 1-\alpha/2} \times \frac{S}{\sqrt{n}} \quad \text{equação 4.1}$$

sendo,

h: semi-intervalo de confiança;

t: função da distribuição “t” de Student;

n: número de amostras (ou replicações);

(1- $\alpha/2$ ): nível de confiança para intervalo bilateral;

S: desvio padrão.

Na tabela “t” de Student (anexo IV), entrando com:

$$n = 5$$

$$\alpha = 5\%, \text{ tem-se:}$$

$$t = 2,78.$$

Utilizando a equação 4.1 obtém-se:

$$\begin{aligned} h &= t_{4;0,975} \times \frac{S}{\sqrt{5}} \\ h &= 2,78 \times \frac{S}{2,23} \\ h &= 1,24 \times S \end{aligned} \quad \text{equação 4.2}$$

Apenas como exemplo, será apresentado o cálculo do intervalo de confiança para a média de produção diária de concentrado para o cenário 2: situação atual da usina com paradas de equipamentos.

Após as 5 replicações, os resultados de produção anual foram:

14.584.499 tmsc		40.289 tmsc/dia
14.936.830 tmsc		41.262 tmsc/dia
14.898.579 tmsc	dividindo por 362 dias:	41.156 tmsc/dia
15.003.672 tmsc		41.447 tmsc/dia
15.105.408 tmsc		41.728 tmsc/dia

Calculando a média e o desvio padrão, encontra-se:

média: 41.176 tmsc/dia;

desvio padrão:  $S=541,46$  tmsc/dia.

Aplicando a equação 4.2, tem-se:

$$h=1,24 \cdot S = 1,24 \times 541,46 = 671,41.$$

A notação do intervalo de confiança é a seguinte:

(média - h ; média + h).

Portanto, para o cenário 2, o intervalo, com 95% de confiança, é:

(40.505 ; 41.847)

Significa uma probabilidade de 95% de este intervalo conter a média daquela população, ou seja, resultados possíveis, aplicando o cenário 2.

A seguir são feitas as análises dos resultados de cada cenário. A tabela 4.1 mostra os resultados de produção de concentrado, rejeito gerado e alimentação da usina para os cinco cenários e também os resultados reais do período estudado. A tabela 4.2 apresenta os resultados do IROG, em todas as etapas do processo, nos cinco cenários avaliados.

Tabela 4.1: Resultados reais e dos cenários simulados em tmsc/ano.

Indicadores	Cenário 1: Atual sem paradas	Cenário 3: 25% Flotação sem paradas	Cenário 2: Atual com Paradas	Cenário 4: 25% Flotação com paradas	Cenário 5: TBF (x2)	Resulta- dos reais
Produção de Concentrado	18.539.450	18.669.586	14.905.798	15.182.867	16.229.193	15.245.350
Geração de Rejeito	10.778.365	10.957.346	8.477.160	8.716.721	9.381.305	8.818.072
Alimentação da Usina	29.317.815	29.626.932	23.382.958	23.899.588	25.610.498	24.063.422

Tabela 4.2: Análise dos cenários através do indicador IROG.

Indicadores	Sem Paradas				Com Paradas					
	Cenário 1	Média IROG por Processo	Cenário 3: 25% Flotação	Média IROG por Processo	Cenário 2: Real com Paradas	Média IROG por Processo	Cenário 4: 25% Flotação com paradas	Média IROG por Processo	Cenário 5: TBF (x2)	Média IROG por Processo
Alimentação 01	83,42%	83,44%	85,66%	84,64%	67,56%	65,61%	68,02%	67,38%	74,12%	72,56%
Alimentação 02	83,42%		85,66%		67,48%		66,99%		73,80%	
Alimentação 03	83,45%		83,63%		63,47%		67,40%		70,86%	
Alimentação 04	83,45%		83,63%		63,93%		67,10%		71,45%	
Hidrociclonação Secundária 01	97,88%	93,16%	98,49%	96,55%	89,04%	79,03%	89,20%	78,30%	93,02%	86,26%
Hidrociclonação Secundária 02	93,19%		96,00%		85,53%		87,20%		90,19%	
Hidrociclonação Secundária 03	88,41%		95,16%		62,50%		58,51%		75,58%	
Hidrociclonação Secundária 04	57,33%		78,88%		41,04%		52,86%		53,59%	
Hidrociclonação Secundária 05	83,12%	74,50%	77,89%	77,93%	60,13%	54,79%	60,73%	58,62%	69,34%	64,54%
Hidrociclonação Secundária 06	83,03%		77,01%		63,18%		62,28%		70,69%	
Deslamagem L01	88,28%		96,65%		78,21%		75,94%		83,63%	
Deslamagem L02	87,94%		84,30%		64,41%		66,65%		72,60%	
Deslamagem L03	88,09%	88,13%	86,87%	89,40%	64,87%	69,29%	68,47%	71,16%	73,38%	76,63%
Deslamagem L04	88,19%		89,77%		69,68%		73,59%		76,93%	
Flotação convencional 01	100,00%		87,92%		88,95%		69,10%		95,10%	
Flotação convencional 02	100,00%		76,70%		73,25%		60,64%		82,57%	
Flotação convencional 03	100,00%	100,00%	79,04%	81,33%	73,77%	78,80%	62,30%	64,74%	83,46%	87,15%
Flotação convencional 04	100,00%		81,68%		79,25%		66,93%		87,49%	
Moagem primária 01	66,59%		72,90%		58,72%		57,06%		62,93%	
Moagem primária 02	66,33%		63,58%		48,85%		50,49%		54,91%	
Moagem primária 03	66,44%	66,47%	65,52%	67,43%	47,66%	52,26%	50,61%	53,67%	54,67%	57,80%
Moagem primária 04	66,52%		67,71%		53,83%		56,54%		58,70%	
Moagem Secundária 01	92,01%		92,59%		83,71%		83,88%		87,44%	
Moagem Secundária 02	87,63%		90,27%		80,40%		81,96%		84,79%	
Moagem Secundária 03	83,12%	87,59%	89,47%	90,78%	61,68%	75,26%	66,20%	77,35%	72,76%	81,67%
Moagem Secundária 04	68,38%		94,08%		48,96%		63,05%		63,93%	
Moagem Secundária 05	99,15%		92,91%		71,74%		72,42%		82,69%	
Moagem Secundária 06	99,04%		91,86%		75,36%		74,28%		84,31%	
Pré Moagem 01	89,62%	89,64%	92,02%	90,93%	71,72%	69,57%	71,33%	70,99%	79,13%	77,42%
Pré Moagem 02	89,65%		89,84%		67,43%		70,64%		75,71%	
Reciclonagem	94,96%	94,96%	98,36%	98,36%	76,63%	76,63%	79,80%	79,80%	85,62%	85,62%
Recleaner	95,60%	95,60%	100,00%	100,00%	74,36%	74,36%	78,09%	78,09%	84,79%	84,79%

Todos os comentários daqui para frente estarão se referindo às duas tabelas acima. Quando houver menção a números de produção, deve-se observar a tabela 4.1 e, no caso de análise de IROG, deve-se olhar para a tabela 4.2.

#### 4.1.1. Cenário 1: situação atual da usina sem paradas dos recursos

Sabe-se que este é um cenário irreal, uma vez que é impossível operar, por um ano, o sistema industrial em estudo com disponibilidade física de 100%. Porém ele é útil para eliminar distorções de percepção em estudos de capacidade máxima do sistema, provocadas pela interferência das paradas de equipamentos. Comparando os resultados obtidos neste cenário com os números reais da usina no período analisado, observa-se que houve aumento de produção de 21,6%. O que já era esperado, pois, para o simulador, **aspectos puramente operacionais assumem importância capital, uma vez que o mesmo “não enxerga” outros fatores que influenciem a produção.**

Analisando os resultados de IROG de cada etapa do processo, percebe-se, com clareza, que a flotação convencional é a etapa que estabelece a máxima restrição de capacidade, apresentando IROG de 100,00% em todas as quatro linhas. Em outras palavras, a flotação convencional é o gargalo do processo.

#### 4.1.2. Cenário 2: situação atual da usina incluindo as paradas dos recursos

Este cenário foi usado no capítulo anterior para validar o modelo computacional. Ele simula exatamente a situação real do período.

A produção de concentrado esteve 2,2% abaixo da produção real. Explica-se tal diferença como sendo normal e decorrente da variabilidade inserida no simulador e da variabilidade que ocorreu no sistema real naquele ano de produção.

Um detalhe muito importante a salientar neste cenário é a dificuldade de identificação do gargalo, uma vez que a indisponibilidade dos recursos provoca considerável redução de produção e, conseqüentemente, do IROG de todas as etapas do processo. A explicação para esta redução geral do IROG é a seguinte: a indisponibilidade provocada pelas paradas dos recursos, em todas as etapas do processo, reduz a utilização dos mesmos, reduzindo, conseqüentemente, o fluxo de entidades através de todo o processo produtivo, ou seja, reduz o numerador da equação 2.2 ( $IROG = q / Q_{max}$ ). Como o denominador é um número constante, ocorre uma redução geral do IROG.

4.1.3. Cenário 3: utilizando o Cenário 1 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04

Novamente, o modelo foi rodado sem as paradas dos recursos, pois o objetivo precípua era identificar o deslocamento do gargalo, uma vez que a flotação convencional teve sua capacidade aumentada em 25%, deixando de ser o gargalo, apresentando IROG de 81,33%.

Após a análise do IROG, vê-se que a etapa da flotação em colunas (recleaner), com um resultado de 100,00%, aparece como o novo gargalo do processo. Com IROG de 98,36%, a reciclonagem pode ser considerada como uma forte candidata a futuro gargalo.

4.1.4. Cenário 4: utilizando o Cenário 2 como base, aumentou-se de 25% as capacidades das caixas pretas flotação 01, 02, 03 e 04

Este cenário retrata a situação real da usina, pois inclui as paradas dos recursos, porém somente a flotação convencional tem a sua capacidade aumentada em 25%.

Apesar do aumento de capacidade na flotação, a produção permaneceu praticamente igual à produção real, apresentando ligeira redução de 0,4%. Este resultado, aparentemente surpreendente, pode ser explicado pela aleatoriedade inserida no modelo e pelo surgimento de recursos com restrição de capacidade, emergentes no processo, uma vez que as paradas foram novamente introduzidas no simulador.

A exemplo do cenário 2, a identificação do gargalo através do IROG é nebulosa, pois os números ficam muito baixos, conforme já explicado na análise do cenário 2.

4.1.5. Cenário 5: situação atual da usina, aumentando o tempo entre paradas dos recursos em 100%

Para rodar este cenário os parâmetros das distribuições de probabilidades de intervalo entre paradas (TBF) dos recursos foram multiplicados por dois.

Em relação à situação real, o aumento de produção observado foi de 6,5%. Resultado bem melhor que o do cenário anterior, que praticamente coincidiu com a produção real.

Isto significa que investir uma quantia calculada em programas que busquem aumento de confiabilidade e disponibilidade de todas as etapas do processo, o que significa atuar na prevenção de falhas e quebras, pode gerar ganhos consideráveis para a empresa. É bem mais produtivo e econômico eliminar as falhas, minimizar as ações corretivas e realizar somente intervenções programadas no processo produtivo.

4.2. Comparação entre os cenários

Com o objetivo de melhorar a análise e facilitar o entendimento foram realizadas comparações entre os cinco cenários, tomados dois a dois.

Foram escolhidas seis comparações consideradas as mais indicadas para a realização das análises.

#### 4.2.1. Comparação A: Cenário 1 versus Cenário 2

Tomando como base o cenário 1, houve redução de produção de 19,6% após a inclusão das distribuições de paradas dos recursos. Por este motivo também, houve redução geral do IROG. Na flotação, que é o gargalo no cenário 1 com IROG de 100,00%, no cenário 2, o IROG cai para 78,80% devido a influências conjunturais do sistema e relacionadas às paradas dos recursos.

#### 4.2.2. Comparação B: Cenário 1 versus Cenário 3

Cenário 3 é o cenário 1 com aumento de 25% da capacidade da flotação convencional. O ganho percebido na produção é desprezível (0,7%). Isto explica porque o aumento de capacidade não deve ocorrer apenas na flotação convencional, pois outro gargalo surge imediatamente no sistema. No caso, o Recleaner, com IROG de 100,00%. O IROG da flotação teve uma redução de 18,7% por causa do aumento de capacidade. Todas as outras etapas tiveram o IROG aumentado de 0,3% a 4,4%.

#### 4.2.3. Comparação C: Cenário 2 versus Cenário 4

Esta comparação é semelhante à anterior, porém incluindo as distribuições de paradas dos recursos.

O entendimento do ocorrido no cenário 4 é facilitado, observando conjuntamente as comparações seguintes. Na comparação B, o ganho de produção com o aumento de capacidade na etapa de flotação convencional é de apenas 0,7%. Nesta comparação



(Cenário 2 versus Cenário 4), com inclusão das paradas, o ganho de produção no cenário 4 em relação ao 2 é de apenas 1,9%, confirmando o resultado da comparação B.

Pode-se afirmar que o aumento de capacidade não deve ocorrer somente na flotação convencional, pois quando há investimento no gargalo, ele pode se deslocar. Portanto, quando se investiu na flotação convencional, aumentando sua capacidade em 25%, o gargalo mudou para outro ponto do sistema, aumentando a produção em apenas 1,9%. Vale lembrar que a identificação do gargalo só deve ser feita em cenários que não levem em consideração as paradas dos recursos.

É importante salientar que a capacidade da flotação depende diretamente da qualidade intrínseca de outros dois fatores, que são: a qualidade da matéria-prima e atuação das equipes operativas.

#### 4.2.4. - Comparação D: Cenário 3 versus Cenário 4

Adotando o cenário 3 como base, ocorre redução de produção de 18,7%. Bem próximo ao percentual de redução de 19,6% existente na comparação A.

Pode-se fazer uma analogia entre a comparação A (cenário 1 com 2) e D, devido ao fato que a comparação D realiza a mesma comparação, porém com aumento da capacidade da flotação convencional nos dois cenários, 3 e 4.

Ocorre redução geral do IROG do cenário 3 para o cenário 4, dificultando mais uma vez a identificação do gargalo, caracterizando o surgimento de recursos com restrição de capacidade.

#### 4.2.5. - Comparação E: Cenário 2 versus Cenário 5

Dobrando os parâmetros das distribuições de probabilidade de TBF, houve aumento de produção de 8,9%, bem melhor que o resultado encontrado na comparação C que foi de aumento de 1,9%. Houve aumento do IROG em todas as etapas do processo, pois os recursos, com o aumento do TBF, tiveram suas utilizações e, conseqüentemente, suas produções aumentadas.

#### 4.2.6. - Comparação F: Cenário 4 versus Cenário 5

Tomando como base o cenário 4, houve aumento de produção de 6,9% quando se aplicou o cenário 5.

O cenário 5 apresenta, além do melhor resultado de produção, algumas outras vantagens tais como:

- aumenta a confiabilidade e disponibilidade do sistema;
- torna o sistema mais estável;
- diminui a probabilidade de coincidência ou encadeamento de paradas;
- diminui custos de manutenção corretiva;
- diminui custos de estoque de peças de reposição.

Em resumo, o cenário 4 reflete uma atuação local enquanto o cenário 5 uma atuação sistêmica.

#### 4.3. - DIFICULDADES ENCONTRADAS

Durante a realização deste trabalho, surgiram diversas dificuldades e dúvidas que afetaram a evolução do mesmo. As principais são apresentadas a seguir:

- a) a maior dificuldade sempre esteve relacionada à iniciativa de simular um sistema contínuo usando um software de simulação a eventos discretos;
- b) a escolha do software mais indicado, uma vez que não existe software específico para simulação de uma usina de tratamento de minérios, com “templates” adequados a sistemas contínuos;
- c) a complexidade do sistema, aliada ao fato de se tratar de um trabalho inédito, trouxe dificuldades já a partir da definição do problema;
- d) sem dúvida, as etapas mais trabalhosas foram o levantamento e tratamento de dados e construção do modelo computacional. Várias premissas e simplificações foram necessárias, conforme apresentado no capítulo 3. Destaque para a inexistência de informações atualizadas das partições e capacidades dos equipamentos nas diversas etapas do processo;
- e) total desconhecimento do software de simulação ARENA antes de começar o trabalho.

#### 4.4. AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A aplicação da técnica de simulação, neste projeto, mostrou vantagens e desvantagens na sua utilização como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão na usina de concentração.

Uma das vantagens da simulação computacional é a capacidade de representar o sistema real estudado e suas variações. Através da simulação é possível antever o

funcionamento e os resultados de um projeto antes mesmo de ele começar a ser instalado.

A flexibilidade e a facilidade na programação da simulação computacional através do software utilizado, são características relevantes que contribuem para a sua aplicação.

A interação do usuário com o sistema ocorre através da visualização do modelo pelo sistema de processos, filas e nodos de decisão facilmente identificáveis. Esta característica facilita, inclusive, um melhor entendimento do funcionamento do processo produtivo por pessoas que não estejam familiarizadas com o mesmo.

Outro ponto positivo da simulação, a ser destacado, é a agilidade que ela proporciona ao usuário para fazer alterações nas variáveis em cada cenário do modelo criado. Desta maneira, obtém-se um melhor controle sobre as variáveis do sistema. Além disto é possível analisar o impacto individual de cada alteração realizada e suas conseqüências no sistema como um todo, pois a simulação proporciona uma visão sistêmica do processo.

Neste caso em estudo, a aplicação da técnica de simulação computacional permitiu que os resultados fossem avaliados, imediatamente, ao final de cada replicação do modelo, através de relatórios completos emitidos pelo ARENA. O anexo V mostra um exemplo do relatório emitido pelo simulador para duas replicações de um determinado cenário.

Outra importante vantagem da simulação é a possibilidade de simular, em curto espaço de tempo, situações que ocorrem em longos períodos. Esta característica comprova que a técnica de simulação apresenta-se como uma forma rápida e econômica de testar um sistema.

Deve-se ressaltar que, através do modelo, é possível mensurar informações que não estão disponíveis, no momento, na empresa, como foi o caso do Índice de Rendimento Operacional Global (IROG). Atualmente, a Samarco Mineração S.A. não possui ferramenta para calcular este índice de desempenho.

Através da simulação, é possível identificar os gargalos de produção para cada alternativa de circuito, testar mudanças de capacidade, além de verificar, após mudanças, o(s) equipamento(s) que passa(m) a ser gargalo(s) ou recurso(s) com restrição de capacidade. É útil também para mensurar investimento e o provável retorno e dimensionar aumento de demanda.

Apesar das vantagens relatadas anteriormente, a técnica de simulação computacional também apresenta algumas desvantagens.

Durante a aplicação da simulação é necessário que o modelo desenvolvido e os dados inseridos representem fielmente as informações do sistema real, pois, do contrário, o trabalho seria em vão. No caso específico deste trabalho, o modelo criado imitou fielmente o sistema real e a base de dados se mostrou extremamente confiável.

A realização de diversas replicações do modelo criado deve-se ao fato de que a simulação necessita, por sua natureza estocástica, que os modelos sejam rodados repetidamente para que se possa prever, com maior precisão, o desempenho do sistema.

A técnica de simulação não é otimizante, ela apenas aponta o melhor dentre vários cenários, mas que não corresponde necessariamente a uma solução ótima.

Considerando-se as características, vantagens e desvantagens apresentadas, pode-se afirmar que a simulação computacional é aplicável como ferramenta de apoio à tomada de decisão dentro do contexto estudado neste trabalho.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Este capítulo está dividido em duas partes. Primeiramente, estão explicitadas as principais conclusões acerca do estudo realizado e, posteriormente, são feitas algumas recomendações de futuros estudos baseados neste trabalho.

#### **5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES**

Tendo em vista os objetivos estabelecidos, algumas conclusões são mostradas a seguir.

Conforme mencionado no capítulo 2, uma vez construído o modelo computacional, ele pode ser usado diversas vezes como um laboratório virtual para estudar o sistema, comparar alternativas de mudanças e analisar projetos, bastando apenas que os dados sejam atualizados.

Dissipou-se a dúvida a respeito da aplicabilidade de um sistema de simulação a eventos discretos para simular um processo contínuo. De acordo com os resultados, pode-se afirmar que é possível, porém com um maior grau de dificuldade se comparado a um processo de eventos discretos.

Uma das grandes vantagens da ferramenta criada é a facilidade que ela oferece ao usuário para enxergar todo o processo de maneira sistêmica, integrada e unificada.

Através da definição de um novo indicador de desempenho, o IROG, ainda não utilizado pela Samarco Mineração S.A., foi possível identificar, com clareza, o gargalo do processo para cada condição específica. Esta característica torna a ferramenta desenvolvida extremamente útil para nortear as ações que visem aumento de produtividade de todo o sistema.

Analisando os cinco cenários definidos neste trabalho, conclui-se que, em caso de necessidade de aumento de capacidade, é salutar atuar na flotação convencional, que é o gargalo do processo, porém em decorrência disto, o aumento de capacidade deve ocorrer também no recleaner, reciclonagem e hidrociclonagem da remoagem.

A situação anterior retrata atuações locais. Foi visto, no cenário 5, que uma atuação sistêmica, através do aumento da confiabilidade em todas as etapas do processo, pode trazer benefícios ainda maiores.

Tendo em vista o objetivo principal deste trabalho, pode-se concluir que é viável e útil a técnica de simulação computacional para analisar cenários operacionais para a usina de concentração da Samarco Mineração S.A..

## 5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se estender a aplicação da técnica de simulação computacional a todos os processos da empresa. Não se recomenda interligar todo o processo produtivo, pois a complexidade e tamanho do modelo poderiam inviabilizar o projeto, porém a interligação de duas etapas sequenciais pode trazer consideráveis benefícios como os que foram apresentados neste trabalho.

Outra linha de atuação que se mostrou interessante, a partir deste trabalho, se relaciona a estudos voltados para o aumento de confiabilidade dos processos industriais da empresa.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, J. A. V. & KLIPPEL, M. **Uma abordagem metodológica para o gerenciamento das restrições dos sistemas produtivos: a gestão sistêmica, unificada/integrada e voltada aos resultados do posto de trabalho**, 1998

ARCAUTE, K. & MODI, C. & MORALES, D. & OSPINA, M. C. **Optimize foamvolute process through analysis of production constraints and performance variables using ARENA 5.0 software submitted to Dr. Rafael S. Gutierrez**, United States, The University of Texas at El Paso, 2001.

BASU, A. J., BAAFI, E. Y., **Discrete Event Simulation of Mining Systems: Current Practice in Australia**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, nº 13, pp. 79 – 84, 1999.

CARDOSO, J.; FARINES, J. M. e CURY, J. E., **Controle de Sistemas de Manufatura**. Apostilas do Curso de Pós-Graduação em Automação Industrial, a nível de especialização, Universidade Federal de Santa Catarina & Universidade de Caxias do Sul, 1994.

CASSEL, R. A., **Desenvolvimento de uma abordagem para a divulgação da simulação no setor calçadista gaúcho**, Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

FREITAS, P., **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas**, Visual Books Editora, Florianópolis, 2001.

GOLDRATT, E. M. **Corrente Crítica**. Trad. por Thomas Corbett Neto. São Paulo, Nobel,.1998.

HOLLOCKS, B. **A well-kept secret? Simulation in manufacturing industry reviewed**, OR Insight, p.12-17, 1992.

JAIN, R., **The art of computer system performance analysis**, 2nd, McGraw-Hill, NY, 1991.

- KELTON, W. D., SADOWSKI, R. and SADOWSKI, D., 2002. **Simulation with ARENA**, 2nd Edition, WCB/McGraw-Hill, New York, NY, 2002.
- KNIGHTS, P. F. and BONATES, E. J. L., **Applications of Discrete Mine Simulation Modeling in South America**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, n° 13, pp. 69 – 72, 1999.
- KONYUKH, V., GALIYEV, S., Li, Z., **Mine Simulation in Asia**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, n° 13, pp. 57 – 67, 1999.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A., **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Atlas, 1991.
- LAW, A. M. & KELTON, W. D. **Simulation modeling & analysis**. Singapura, McGraw Hill, 1991.
- LAW, A. M. & MCCOMAS, M. G. **How to select simulation software for manufacturing applications**, Industrial Engineering, p. 29-35, 1992.
- MENEZES, A. F. S. & RODRIGUES, L. H., **Breves considerações sobre a flexibilidade e o grau de especialização técnica das ferramentas de simulação computacional**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.
- PANAGIOTOU, G. N., **Discrete Mine System Simulation in Europe**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, n° 13, pp. 43 – 46, 1999.
- PARAGON CONSULTING SOLUTIONS, **Introdução à Simulação com o ARENA 5.0 – Apostila de Treinamento**, São Paulo.
- PARAGON CONSULTING SOLUTIONS, **Projetos realizados, no ARENA, pela Paragon**, São Paulo.
- PARAGON CONSULTING SOLUTIONS, **Técnicas Avançadas com o ARENA 6.0 – Apostila de Treinamento**, São Paulo.
- PEGDEN, C. D., AHANNON, R. E., SADOWSKI, R. P., **Introduction to simulation using SIMAN**, McGraw-Hill, NY, 2nd, 1990.
- PIDD, M., **Computer simulation in management science**. Grã-Bretanha, John Wiley & Sons, 1994.

- PIDD, M., **Computer Simulation in Management Science**, quarta edição, Inglaterra, editora John Wiley and Sons, 1998.
- PINSONNEAULT, A. and KRAEMER, K. L., **Survey research methodology in management information systems: an assessment**. Journal of Management Information Systems, v.10, n.2, Autumn, p.75-105, 1993.
- PINTO, L. R., **Uso de técnicas de pesquisa operacional na otimização das operações de lavra**, In: VI Congresso Brasileiro de Mineração, pp. 53-61, Salvador, Agosto/1995.
- PINTO, L. R., **Metodologia de Análise do Planejamento de Lavra de Minas a Céu Aberto Baseada em Simulação das Operações de Lavra**, tese de doutorado, Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ, 1999.
- PRADO, D. S., **Teoria das Filas e da Simulação**, Belo Horizonte, Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.
- PRADO, D. S., **Usando o ARENA em Simulação**, Belo Horizonte, Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.
- REDDY, R., **Grand challenges in ACM Computing Surveys**, 27(3):301-303, 1995.
- RIBEIRO, P. D., **Kanban - Resultados de uma implantação bem sucedida**. 4ª Edição. Rio Janeiro COP Editora, 1989.
- ROCKWELL SOFTWARE, **Reference Guide – Professional ARENA**, Systems Modeling Corporation, USA, 2000.
- ROCKWELL SOFTWARE, **User's Guide – Professional ARENA**, Systems Modeling Corporation, USA, 2000.
- SALIBY, E., **Repensando a Simulação: a Amostragem Descritiva**, São Paulo, editora Atlas S.A., 1989.
- SASTRY, K. V. S., **Exciting Trends for an Ideal Mineral Process Simulator**, Berkeley, California University, Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 1992.
- SCHERER, W. R., **Avaliar a potencialidade da aplicação da técnica de simulação computacional como ferramenta qualificada para o apoio à tomada de decisão**, São Leopoldo, 2001.

- SCHRIBER, T. J., **Simulation using GPSS**, Wiley, NY, 1974.
- SEVERINO, A. J., **Metodologia do trabalho científico**, São Paulo: Cortez, 2000.
- SHANNON, R. E., **Systems simulation: the art and science**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1975.
- SILVA, E. L. e MENEZES, E. M., **Metodologia de Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. Florianópolis : UFSC,PPGEP,LED, 113p, 2000.
- SIMON, H., **The Sciences of the artificial**. Cambridge, Mass: MIT, 1969.
- SOARES, L. F. G., **Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas**, PUC, Rio de Janeiro, editora Campus, 1992.
- STURGUL, J. R., **Discrete Mine System Simulation in the United States**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, nº 13, pp. 37 – 41, 1999.
- STURGUL, J. R., LI, Z., **New Developments in Simulation Technology and Applications in the Minerals Industry**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, nº 11, pp. 159 – 162, 1997.
- SZYMANKIEWICI, J., MCDONALD, J. & TURNER, K., **Solving business problems by simulation**. Grã-Bretanha, McGraw-Hill Book Company, 1988.
- VAGENAS, N., **Applications of Discrete-Event Simulation in Canadian Mining Operations in the Nineties**, International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, nº 13, pp. 77 – 78, 1999.

# **ANEXOS**

## **Anexo I**

Fluxograma completo da usina de concentração da Samarco Mineração S.A.

## **Anexo II**

Fluxograma da usina de concentração usado na modelagem conceitual

## **Anexo III**

Distribuições de probabilidades dos dados de paradas de equipamentos

## Anexo IV

Tabela da distribuição “t” de Student

Graus de Liberdade (n-1)	Nível de Confiança				
	0,995	0,990	0,975	0,950	0,900
1	63,66	31,82	12,71	6,31	3,08
2	9,92	6,96	4,30	2,92	1,89
3	5,84	4,54	3,18	2,35	1,64
4	4,60	3,75	<b>2,78</b>	2,13	1,53
5	4,03	3,36	2,57	2,02	1,48
6	3,71	3,14	2,45	1,94	1,44
7	3,50	3,00	2,36	1,90	1,42
8	3,36	2,90	2,31	1,86	1,40
9	3,25	2,82	2,26	1,83	1,38
10	3,17	2,76	2,23	1,81	1,37
11	3,11	2,72	2,20	1,80	1,36
12	3,06	2,68	2,18	1,78	1,36
13	3,01	2,65	2,16	1,77	1,35
14	2,98	2,62	2,14	1,76	1,34
15	2,95	2,60	2,13	1,75	1,34
16	2,92	2,58	2,12	1,75	1,34
17	2,90	2,57	2,11	1,74	1,33
18	2,88	2,55	2,10	1,73	1,33
19	2,86	2,54	2,09	1,73	1,33
20	2,84	2,53	2,09	1,72	1,32
21	2,83	2,52	2,08	1,72	1,32
22	2,82	2,51	2,07	1,72	1,32
23	2,81	2,50	2,07	1,71	1,32
24	2,80	2,49	2,06	1,71	1,32
25	2,79	2,48	2,06	1,71	1,32
26	2,78	2,48	2,06	1,71	1,32
27	2,77	2,47	2,05	1,70	1,31
28	2,76	2,47	2,05	1,70	1,31
29	2,76	2,46	2,04	1,70	1,31
30	2,75	2,46	2,04	1,70	1,31
40	2,70	2,42	2,02	1,68	1,30
60	2,66	2,39	2,00	1,67	1,30
120	2,62	2,36	1,98	1,66	1,29
> 120	2,58	2,33	1,96	1,65	1,28



## **Anexo V**

Exemplo dos resultados, para duas replicações do modelo, emitidos pelo ARENA.