

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

CRISTINA WEBER AMBRÓSIO

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO
DE UM PROCESSO SEMI-CONTÍNUO DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS
LDG**

**JOÃO PESSOA - PB
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

CRISTINA WEBER AMBRÓSIO

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO
DE UM PROCESSO SEMI-CONTÍNUO DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS
LDG**

Dissertação submetida à apreciação da banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba para como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: **Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva**

Área de concentração: **Gestão da Produção**

JOÃO PESSOA - PB
2007

A496m Ambrósio, Cristina Weber

Modelo computacional para análise do desempenho de um processo semi-contínuo de distribuição de gás - LDG / Cristina Weber Ambrósio - João Pessoa, 2007.

101 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) PPGEP / Centro de Tecnologia / Campus I / Universidade Federal da Paraíba – UFPB.

1.Simulação 2. Modelagem de Sistema 3.Sistema de Distribuição de gás I. Título.

CDU: 004.414.23:658.5 (043)

CRISTINA WEBER AMBRÓSIO

**MODELO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO DESEMPENHO
DE UM PROCESSO SEMI-CONTÍNUO DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS
LDG**

Dissertação julgada e aprovada em 14 de dezembro de 2007 como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luiz Bueno da Silva
Universidade Federal da Paraíba
Orientador

Prof. Dr. Antônio de Mello Villar
Universidade Federal da Paraíba
Examinador

Prof. Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro
Universidade Federal de Minas Gerais
Examinador

A Deus, nosso Criador e eterno Mestre,
e aos meus pais, João e Vera, pelo apoio de sempre e
por terem despertado em mim o interesse pelo conhecimento,
dedico esta vitória.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Luiz Bueno e Luiz Cláudio, pelo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Antônio Villar, pelas sugestões feitas a esta dissertação.

Aos colegas de trabalho Osmar Vicente Sossai, José Roberto de Mello e Celso Núbio, supervisores e controladores do sistema de distribuição de LDG, pelos muitos esclarecimentos prestados.

Aos especialistas de engenharia do processo estudado, Norberto Coessens Messina e Lara Moreira, pelas informações fornecidas. E em especial ao Norberto, pelos ensinamentos sobre o sistema de controle.

Ao técnico Marcelo Becalli, pelos dados fornecidos sobre a operação das centrais termoelétricas.

Ao Marcos Vianna, Avelar Scarpe e Adriano Silva, pelas colaborações técnicas, e à Alessandra Cunha, pelo apoio de infra-estrutura.

À Letícia Piccin, pela disponibilização de acesso às informações do sistema de geração de LDG.

À CST, por disponibilizar os recursos para que este trabalho fosse realizado.

Ao professor Roberto Cintra Martins, pelos ensinamentos e contribuições valiosas durante as aulas de simulação de sistemas.

RESUMO

A simulação tem sido amplamente utilizada como ferramenta para estudos de sistemas. Com a crescente complexidade dos problemas, a simulação computacional alcançou importante papel na resolução de questões relacionadas a projetos e melhorias de plantas industriais. O Sistema de Distribuição de Gás LDG para as Centrais Termoelétricas de uma Siderúrgica possui variáveis que se alteram continuamente ao longo do tempo, tais como o nível do gás no reservatório e a vazão do gás para a Central Termoelétrica. O gás LDG, co-produto da produção do aço, é recuperado e distribuído para as centrais termoelétricas através deste sistema, proporcionando a geração de energia elétrica. Desta forma, a energia térmica é recuperada e convertida em energia elétrica, proporcionando ganhos econômicos e ambientais. Tal processo, por ser de variação semi-contínua no tempo, difere da maioria dos trabalhos encontrados em pesquisas bibliográficas, nos quais são abordados sistemas que variam de modo discreto, apenas com a ocorrência de determinados eventos. O desempenho do sistema de distribuição de LDG é medido pelos índices de aproveitamento do gás recuperado, e a adequação da modelagem pode ser constatada pela verificação da aderência entre o modelo real e o simulado. O objetivo da utilização da simulação, neste contexto, é identificar a modelagem para este sistema semi-contínuo e permitir que se avalie o seu desempenho atual e futuro, considerando-se possíveis melhorias no processo, de maneira a se obter a máxima utilização do gás. A metodologia seguida engloba uma seqüência de passos que compreende: formulação do problema e planejamento do estudo, coleta de dados, definição do modelo conceitual, construção e verificação do programa computacional, execução de rodadas piloto, projeto dos experimentos, execução da simulação e análise dos dados de saída. O modelo obtido apresentou comportamento aderente aos dados reais, possibilitando o ensaio de cenários, nos quais foram avaliados o impacto do aumento de capacidade intermediária de armazenamento e de demanda de LDG. Pôde-se constatar que, considerando-se a tendência de aumento de recuperação do gás e seu nível atual de utilização, é possível acrescentar um novo consumidor, o que pode aumentar em até 66% o índice de aproveitamento do gás.

Palavras-chave: Simulação. Modelagem de Sistemas. Sistema de Distribuição de Gás.

ABSTRACT

Simulation has been widely used in system studies. Problems have become increasingly complex. Therefore, simulation has become an essential tool to solve problems related to design and improvements in industrial plants. LDG Gas Distribution System to Thermoelectric Plants in a Steelmaking Company has parameters that vary continuously with time, such as gas level in the warehouse and gas flow to thermoelectric plants. LDG gas is co-generated in steel production and recovered and distributed to the thermoelectric plants by this system, providing electric energy generation. Thus, thermal energy is recovered and converted to electric energy, providing economic and environmental profits. The LDG distribution process varies semi-continuously in time. For this reason, this system differs from most of those found in bibliographical researches, which deal with discrete systems. Discrete system parameters vary only when some specific events occur. Performance of the studied system can be evaluated through gas utilization rate, and modeling can be verified if the simulated system adheres to the real one. In this context, simulation is used to identify the modeling for this semi-continuous system and allow measuring its current and future performance, considering future improvements in the process, in order to obtain the best gas utilization. The methodology used in this study is made of a sequence of steps, like: problem formulation, study planning, data collection, conceptual model definition, construction and verifying of the computer program, pilot runs, design experiments, simulation runs and output data analysis. The achieved model presented an adherent behavior to real data. Then, it was possible to test scenarios where increasing warehouse capacity and LDG demand impact were evaluated. It was found that, considering the increasing gas recovering trend and its current utilization rate, it is possible to add a new consumer, which can improve gas utilization at an average of 66%.

Keywords: *Simulation. System Modeling. Gas Distribution System.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Distribuição do gás LDG para as Centrais Termoelétricas	16
Figura 2 – A evolução das ferramentas de simulação computacional.....	24
Figura 3 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos discretos ...	28
Figura 4 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos contínuos..	28
Figura 5 – Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo	28
Figura 6 – Fluxograma da rotina do evento de chegada.....	36
Figura 7 – Fluxograma da rotina do evento de saída.....	37
Figura 8 – Fluxograma da rotina principal de controle (abordagem de avanço no tempo para o próximo evento).....	38
Figura 9 – Fluxograma dos passos de um estudo de simulação	39
Figura 10 – Comparação entre modelos contínuos no tempo e de eventos discretos	44
Figura 11 – Aproximação discreta de um sistema contínuo.....	45
Figura 12 – Representação contínua x discreta	46
Figura 13 – Representação contínua real (a) e discreta modelada (b) da chegada do material ao destino e comparação entre ambos (c).	46
Figura 14 – Principais grupos de critérios para avaliação de <i>softwares</i> de simulação.....	48
Figura 15 – Estrutura hierárquica do Arena	50
Figura 16 – Sistema de Recuperação do gás LDG na Aciaria.....	59
Figura 17 – Diagrama esquemático do Sistema de Recuperação do gás LDG na Aciaria.....	60
Figura 18 – Diagrama esquemático das fases do sopro em uma corrida na Aciaria	61
Figura 19 – Variação da composição química do LDG durante o período de sopro de O ₂	61
Figura 20 – Comportamento da geração de LDG na Aciaria.....	62
Figura 21 – Previsão do comportamento da geração de LDG.....	63
Figura 22 – Dados de projeto do sistema de recuperação de LDG	63
Figura 23 – Sinótico do Sistema de Distribuição de LDG	64
Figura 24 – Histórico das variáveis do Sistema de Distribuição de LDG.....	65
Figura 25 – Fluxograma do Sistema de recuperação e distribuição de LDG.....	68
Figura 26 – Análise da distribuição de probabilidade para o volume de gás produzido por corrida	71
Figura 27 – Análise da distribuição de probabilidade do período de geração de gás por corrida	72

Figura 28 – Análise da distribuição de probabilidade para tempos entre corridas.....	73
Figura 29 – Distribuição empírica do volume de gás produzido por corrida em julho de 2007	74
Figura 30 – Diagrama de blocos para identificação de sub-sistemas.....	76
Figura 31 – Discretização do fluxo de geração de gás LDG durante as corridas de produção do aço.....	77
Figura 32 – Discretização do fluxo de distribuição de gás LDG.....	78
Figura 33 – Comportamento real e simulado, no Arena e Excel, do nível do gasômetro em julho de 2006	82
Figura 34 – Comportamento real e simulado, no Arena e Excel, do nível do gasômetro em dezembro de 2006.....	82
Figura 35 – Comportamento do volume ocupado do gasômetro real e simulado no Excel....	83
Figura 36 – Comportamento do volume ocupado do gasômetro real e simulado no Arena ...	83
Figura 37 - Influência do aumento da capacidade do gasômetro sobre a redução da perda de gás LDG.....	88
Figura 38 – Correlação entre o modelo de distribuição modificado de Harris e os resultados experimentais do cenário II.....	89
Figura 39 – Comportamento real e simulado do nível de estoque intermediário de LDG.....	90
Figura 40 – Influência do aumento da demanda de LDG sobre a redução da perda de gás....	91
Figura 41 – Correlação entre modelo de distribuição modificado de Harris e os resultados experimentais do cenário III	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de geração e consumo de LDG nos meses de julho de 2006 e agosto de 2007.....	70
Tabela 2 – Distribuições de probabilidade dos parâmetros de geração de gás LDG.	74
Tabela 3 – Expressões que representam a lógica de controle do sistema.....	79
Tabela 4 – Principais variáveis do sistema de distribuição de LDG.....	80
Tabela 5 – Definição inicial dos experimentos do projeto.....	87
Tabela 6 – Resultados dos experimentos realizados no cenário II.....	88
Tabela 7 – Níveis considerados para o fator de demanda e sua influência sobre a perda de gás	90

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BFG - *Blast Furnace Gas* – Gás de Alto-Forno

COG - *Coke Oven Gas* – Gás de Coqueria

CST - Companhia Siderúrgica de Tubarão

CTE - Central Termoelétrica

CTEs – Centrais Termoelétricas

FGVA - Função Geradora de Variáveis Aleatórias

GPSS – *General Purpose Simulation System* – Sistema de Simulação de Propósito Geral

LDG – *Linz-Donawitz gas* – Gás *Linz-Donawitz* ou Gás de Aciaria

LTQ – Lingotamento de Tiras a Quente

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Mt/ano – Milhões de toneladas por ano

PCI – Poder calorífico inferior

SIMAN - general-purpose SIMulation ANalysis program

SLAM - *Simulation Language for Alternative Modelling*

LISTA DE SÍMBOLOS

Kcal - Quilocaloria

m³ – Metro cúbico

mmH₂O – Milímetro de coluna d'água

Mt/ano – Milhões de tonelada por ano

MW – Megawatt

Nm³ – Normal metro cúbico (Unidade Normalizada de Volume)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	14
1.1 O PROBLEMA	15
1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA	17
1.3 DELIMITAÇÕES E PREMISSAS DO ESTUDO	18
1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA	19
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	20
2.1.1 DEFINIÇÃO DE SIMULAÇÃO	21
2.1.2 EVOLUÇÃO DA SIMULAÇÃO	22
2.1.3 A EVOLUÇÃO DAS LINGUAGENS DE SIMULAÇÃO	23
2.1.4 CONCEITOS BÁSICOS DE SIMULAÇÃO	25
2.1.4.1 SISTEMAS.....	25
2.1.4.2 MODELOS.....	25
2.1.4.3 MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	26
2.1.4.4 TERMINOLOGIA BÁSICA UTILIZADA EM SIMULAÇÃO DE SISTEMAS.....	29
2.1.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO	30
2.1.6 INCORPORAÇÃO DA VARIABILIDADE DOS SISTEMAS REAIS AOS MODELOS DE SIMULAÇÃO	32
2.1.7 MECANISMOS DE AVANÇO NO TEMPO	33
2.2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	34
2.2.1 MÉTODOS DE MODELAGEM SEGUNDO DIFERENTES VISÕES DE SISTEMAS	34
2.2.2 FUNCIONAMENTO DAS ROTINAS DE SIMULAÇÃO	35
2.2.3 METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	38
2.2.4 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA E PLANEJAMENTO DO ESTUDO	39
2.2.5 SISTEMAS TERMINAIS E NÃO-TERMINAIS	42
2.2.6 MODELAGEM DE SISTEMAS CONTÍNUOS E HÍBRIDOS - SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS	43
2.2.7 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO	47
2.2.8 FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO EM SISTEMAS HÍBRIDOS E CONTÍNUOS	48
2.2.9 O SOFTWARE ARENA	49
2.2.9.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS CONTÍNUOS NO ARENA.....	50
2.2.10 APLICAÇÕES DO SOFTWARE ARENA	52
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	54
CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE LDG UTILIZANDO SIMULAÇÃO	57
4.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS LDG	57

4.1.1	IMPORTÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DO GÁS LDG	58
4.1.2	OBJETIVO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE LDG	58
4.1.3	RECUPERAÇÃO DO GÁS LDG NA ACIARIA.....	59
4.1.4	OPERAÇÃO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE LDG	64
4.1.5	ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE LDG	66
4.2	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO	67
4.2.1	PLANEJAMENTO DO ESTUDO	67
4.3	DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL	67
4.4	COLETA E TRATAMENTO DE DADOS	69
4.5	CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	74
4.5.1	IDENTIFICAÇÃO DE SUB-MODELOS.....	75
4.5.2	DISCRETIZAÇÃO DO FLUXO DE GÁS LDG	76
4.5.3	VARIÁVEIS E INDICADORES	78
4.6	VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL	81
CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS		85
5.1	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS	85
5.2	PROJETO DE EXPERIMENTOS	86
5.3	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS	87
5.4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	92
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		94
6.1	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	94
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	95
REFERÊNCIAS		96
APÊNDICE A - SUB-MODELOS CONSTRUÍDOS NA SIMULAÇÃO NO ARENA.....		100
ANEXO A - FLUXOGRAMA GERAL DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AÇO.....		101

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Os processos industriais têm se tornado cada vez mais dinâmicos e complexos face à multiplicidade de alternativas tecnológicas, tais como a automação. Esta última tem, por sua vez, possibilitado a construção de sistemas eficientes. No entanto, mesmo com a disponibilidade tecnológica e de automação, a interação do homem se faz necessária e é fundamental, pois a capacidade de análise crítica das situações comuns e inusitadas é característica inerente ao ser humano.

Considerando-se que o entendimento do funcionamento dos processos é condição importante para operá-los de modo correto e de forma continuamente aperfeiçoada, a utilização de ferramentas que auxiliem neste entendimento é bastante útil e por vezes fundamental.

A simulação computacional constitui uma importante técnica para o estudo de sistemas complexos. Para estes, o uso de métodos analíticos pode se tornar insuficiente devido à necessidade de simplificações sobre o sistema real. Nestes casos, o uso da simulação é indicado, pois permite modelar as características complexas do sistema, incluindo seus aspectos estocásticos e dinâmicos. Isto, sem tornar o modelo difícil de ser estudado (LAW; KELTON, 1991). A simulação prevê uma seqüência de passos capazes de conduzir à análise do comportamento de um processo que se deseja conhecer com mais detalhes.

Cada vez mais, o conhecimento é considerado um fator valioso para pessoas e empresas. Uma das razões disto é que o conhecimento está próximo da ação; o conhecimento de uma técnica, método ou forma de trabalho pode ser uma vantagem competitiva significativa em um mercado cada vez mais exigente (GAVIRA, 2003, p. 14).

Devido à complexidade das operações envolvidas no processo de Distribuição do Gás LDG, a simples análise dos dados não é o mais adequado na prática. A informação levantada experimentalmente pode ser amplificada pelo uso da técnica de modelagem e simulação, a qual permite prever o desempenho do processo. De acordo com Pedgen (1990, apud FREITAS, 2001, p. 3), a simulação projeta e experimenta um modelo computacional de um sistema real com o objetivo de entender seu comportamento ou avaliar estratégias para a sua operação.

Neste sentido, pode-se avaliar através de modelos computacionais o impacto de possíveis melhoramentos no circuito de uma forma mais realista, selecionando as opções de

melhor custo-benefício em potencial e evitando as que incorram em riscos injustificáveis na prática. A possibilidade de se determinar o melhor *lay-out* e o melhor roteiro de fluxo, a baixo custo experimental e reduzido prazo de execução, faz da técnica de modelagem e simulação uma poderosa ferramenta para a otimização, adequando a operação a flutuações inerentes ao processo.

Considerando-se o caso específico do sistema de distribuição de LDG, a simulação pode conduzir não somente a ganhos operacionais, mas também a maiores benefícios ambientais, através da descoberta de alternativas que aumentem os índices de reutilização do gás. De outra forma, este gás seria enviado para a atmosfera, após um processo de tratamento e limpeza. O gás LDG, co-produto da produção do aço, é recuperado e distribuído para as centrais termoelétricas através deste sistema, proporcionando a geração de energia elétrica. Desta forma, a energia térmica é recuperada e convertida em energia elétrica, proporcionando ganhos econômicos e ambientais.

O objetivo da utilização da simulação, neste contexto, é identificar a modelagem para o sistema semi-contínuo de distribuição de LDG e permitir que se avalie o seu desempenho atual e futuro. Considerando-se possíveis alternativas ao processo, busca-se obter melhores níveis de utilização do gás, e, por conseguinte, a minimização das perdas.

1.1 O PROBLEMA

A empresa onde funciona o sistema objeto de estudo deste trabalho é uma usina siderúrgica integrada que produz placas e bobinas de aço. Neste processo, são gerados co-produtos tais como gases de processo que, uma vez reaproveitados na co-geração de energia, revertem em redução de custos para a empresa e na diminuição da poluição ambiental atmosférica. Em 2004, foi instalado um sistema de recuperação do gás de aciaria (LDG) e, por conseguinte, um sistema de distribuição deste gás para as centrais termoelétricas (CTEs). O processo de distribuição de gás de aciaria, representado na Figura 1, é bastante dinâmico e apresenta variações contínuas em seu comportamento com o decorrer do tempo.

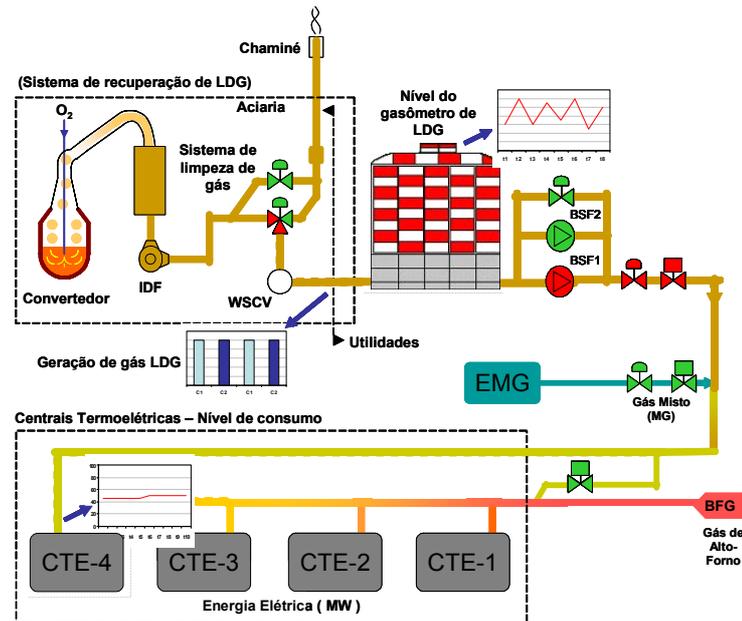


Figura 1 – Sistema de Distribuição do gás LDG para as Centrais Termoelétricas
 Fonte: CST (2004a).

O sistema de distribuição de gás LDG deve operar de modo a aproveitar, da melhor forma possível, o gás LDG recuperado, que é destinado à geração de energia elétrica nas CTEs. O nível do gasômetro, que mede o volume ocupado pelo gás, é constantemente monitorado, de forma a permanecer entre os valores máximo e mínimo permitidos (CST, 2004a). Nas situações em que estes limites são excedidos, inviabiliza-se a recuperação e distribuição do LDG.

O presente trabalho propõe a modelagem do Sistema de Distribuição de gás LDG, considerando-se que o melhor modelo é o mais simples e capaz de responder aos objetivos com confiança adequada. Serão abordados os conceitos relativos à técnica de simulação de sistemas e à sua utilização em processos contínuos em regime transiente, onde as variáveis se alteram continuamente ao longo do tempo.

O modelo computacional, usando como plataforma uma planilha eletrônica, foi desenvolvido de forma estruturada para viabilizar a entrada de dados no modelo, execução e análise dos resultados. O uso da planilha eletrônica como plataforma para o simulador permitiu o desenvolvimento rápido de um programa que pode ser compartilhado com a maioria dos computadores. O *software* de simulação Arena também foi utilizado para a simulação do modelo matemático desenvolvido. No Arena, a simulação é feita com objetos orientados à simulação. As informações necessárias para o desenvolvimento do modelo, tais

como os processos de chegada, atendimento, deslocamento entre as estações e os critérios de produção e qualidade foram determinados com a ajuda das pessoas diretamente envolvidas no processo.

Desta forma, a busca pela solução do problema em questão conduz à investigação de questões como: Qual o tipo de modelagem para o sistema semi-contínuo de Distribuição de Gás LDG, capaz de prever o desempenho deste processo segundo o objetivo de se atingir o melhor aproveitamento do gás? A adequação da modelagem poderá ser constatada se houver aderência entre o comportamento real e simulado do sistema. É possível tratar cada serviço prestado ao sistema de distribuição de LDG como pequenas caixas pretas. Modelos mais simples (discreto e estacionário, discreto e transiente) podem atender ao objetivo com a confiança adequada?

1.2 RELEVÂNCIA DA PESQUISA

As técnicas de simulação em estudos de processos industriais têm sido crescentemente utilizadas nas últimas décadas. A simulação, de acordo com Banks (1998, apud PINTO JUNIOR, 2001, p. 25), “[...] é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real num período de tempo”. Os avanços na tecnologia de informação têm proporcionado maior disponibilidade de informações sobre processos assim como a possibilidade de se analisar essas informações através de ferramentas quantitativas, como a simulação (WOLFF, 2003). Com o advento das inovações tecnológicas, o uso de *softwares* na área de simulação tem se tornado cada vez mais amplo.

A simulação é reconhecidamente importante em estudos de viabilidade e de implantação de melhorias nos diversos tipos de sistemas de produção. Segundo Wolff (2003, p.18), “[...] Se o sistema sob estudo apresenta alto grau de complexidade e uma solução analítica não é viável, a simulação muitas vezes é a única ferramenta para sua análise”. Entretanto, no caso de sistemas cujas variáveis assumem valores diferentes continuamente com o decorrer do tempo, tais simulações merecem um tratamento diferenciado.

A ferramenta Arena tem sido amplamente utilizada em trabalhos sobre simulação de sistemas, tanto no meio empresarial como no científico. Porém, grande parte destes trabalhos refere-se a sistemas discretos no tempo. Nestes sistemas, os valores assumidos pelas variáveis se alteram em instantes específicos, associados à ocorrência de eventos no sistema. Como exemplo pode-se citar os sistemas de filas e o evento de chegada de um cliente.

O Sistema de Distribuição de LDG é um caso típico de sistema semi-contínuo. A simulação deste sistema traz benefícios, pois torna possível controlá-lo virtualmente e observar seu comportamento ao se variar parâmetros operacionais. Esta experimentação conduz a um maior entendimento da dinâmica do sistema e, conseqüentemente, a ajustes de parâmetros mais adequados, capazes de tornar o processo mais eficiente. No entanto, simulá-lo através de um *software* de simulação exige que sejam consideradas suas características de sistema contínuo. Desta forma, torna-se pertinente propor a modelagem mais adequada para este sistema.

Além dos benefícios operacionais que podem ser obtidos através da análise de desempenho deste sistema no cenário atual e sob possíveis aperfeiçoamentos, somam-se os ganhos ambientais advindos do aumento do aproveitamento do gás, co-produto de um processo principal, revertido em energia e reduzindo os níveis de emissões atmosféricas. O sistema de distribuição de LDG foi desenvolvido como parte do projeto de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) da empresa. Assim, a pesquisa está em consonância com o conceito de Produção Limpa, cuja filosofia substitui o modelo *end-of-pipe*, de controle e tratamento apenas no interior da fábrica, por conceitos, estratégias e procedimentos que levam em conta a prevenção dos impactos à saúde e ao ambiente (FURTADO, 1997).

1.3 DELIMITAÇÕES E PREMISSAS DO ESTUDO

O simulador construído aplica-se somente ao processo de distribuição do gás LDG da usina siderúrgica considerada nesta dissertação. Optou-se por analisar apenas os períodos em que o sistema estivesse em funcionamento normal, o que não inclui as paradas do sistema de distribuição do gás. Por ser este um sistema de natureza contínua, a frequência de ocorrência de paradas é irrelevante, como pôde ser constatado na etapa de coleta de dados e em entrevistas a especialistas do processo.

O sistema de geração e recuperação do gás em si não faz parte do escopo deste estudo. Considerou-se apenas o comportamento das distribuições de probabilidade relativas à geração do gás, que, por sua vez, independe da qualidade do aço produzido.

O *software* de simulação escolhido tem seu funcionamento baseado em eventos discretos. Como o sistema em estudo é de natureza semi-contínua, foi necessário discretizar o processo ou fluxo do gás, para que o *software* adotado pudesse ser utilizado. Fioroni et al.

(2007) desenvolveram a simulação do transporte de minério de ferro, que é um processo de comportamento contínuo, através da discretização do fluxo do material, utilizando recursos de simulação discreta.

Segundo Cardoso et al. (2003, apud CASTRO NETO, 2006, p. 41), operações em grande escala são, por natureza, contínuas e caracterizadas por grandes fluxos de massa. Tal fato conduz a uma tendência de ampliação dos fatores causadores de erros nos instrumentos de medição, que contabilizam as taxas de massa continuamente. A influência da incerteza de medição advinda deste tipo de erro não foi considerada neste trabalho. No entanto, na etapa de validação do modelo, foi possível verificar que tais incertezas não invalidaram o simulador.

1.4 OBJETIVOS DA PESQUISA

A identificação do problema conduz à definição dos objetivos e do tipo de estudo de simulação que deve ser desenvolvido. O objetivo principal deste trabalho é propor um modelo computacional baseado em simulação para análise do desempenho do sistema de distribuição de gás LDG. Tal modelo deverá ser útil nas tomadas de decisões, sendo capaz de responder a questionamentos como:

- Quais seriam os ganhos com o aumento da capacidade das etapas críticas?
- Qual o impacto sobre o sistema de distribuição devido ao aumento de demanda de gás?

Além do objetivo geral anteriormente descrito, este trabalho pretende:

- Avaliar a aplicabilidade de um sistema de simulação a eventos discretos para simular o processo semi-contínuo em estudo;
- Desenvolver um modelo de simulação que represente o processo atual de distribuição de gás;
- Simular o sistema de Distribuição de LDG em cenários alternativos de operação, tais como o incremento na geração do gás LDG e a adição de um novo consumidor do gás.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos referentes à simulação de sistemas, suas principais vantagens e desvantagens, os mecanismos de funcionamento das rotinas de simulação e os principais passos para um projeto bem-sucedido utilizando esta técnica. Em seguida, também é abordada a modelagem de sistemas contínuos e híbridos através da simulação de eventos discretos.

2.1 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A constante competitividade entre empresas tem gerado uma crescente demanda pela utilização de ferramentas de apoio à solução de problemas e ao aperfeiçoamento de seus sistemas produtivos. Sistemas reais, em geral, apresentam grande complexidade, o que inviabiliza o uso de métodos puramente analíticos. A simulação constitui uma técnica capaz de estudar tais sistemas, representando-os através de modelos lógico-matemáticos e da utilização do computador para experimentá-los numericamente. Através da simulação, informações são coletadas de modo a estimar as características desejáveis dos sistemas (LAW; KELTON, 1991).

O uso da simulação pode ser adequado a diversas situações, segundo vários autores, tais como Strack (1984) e Freitas (2001):

- não existe formulação matemática completa para o problema;
- não há um método analítico que resolva o modelo matemático;
- a obtenção de resultados com o modelo é mais fácil através da simulação do que por métodos analíticos;
- não é possível ou é muito difícil a experimentação com o sistema real;
- a experimentação com o sistema real é muito dispendiosa;
- o sistema real ainda não existe.

A simulação possibilita estudos detalhados, conforme o objetivo a ser alcançado. Segundo Strack (1984), o grau de realismo incorporado ao modelo de simulação impacta diretamente no nível de detalhamento a ser adotado.

Segundo Kelton et al. (2001), a principal razão da popularização da simulação é sua habilidade em tratar modelos complicados, referentes a sistemas complexos. Isto torna a simulação uma ferramenta versátil e poderosa. Além disso, o aperfeiçoamento da performance dos computadores bem como a redução dos seus custos têm tornado financeiramente viável o que, há alguns anos atrás, era extremamente dispendioso.

2.1.1 Definição de simulação

A simulação, de acordo com Kelton et al. (2001), se refere a um amplo conjunto de métodos e aplicações para representar o comportamento de sistemas reais, das mais diversas áreas, geralmente em computadores, através de *softwares* apropriados.

Segundo Shannon (1975, apud STRACK, 1984, p.3), a simulação não é uma teoria, mas uma metodologia de resolução de problemas, um método de modelagem utilizado para implementar e analisar uma situação real ou proposta, utilizando-se para isto o computador ou protótipos físicos. A simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real em uma sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo (SCHRIBER, 1974, apud FREITAS, 2001, p. 3).

A simulação pode ou não ser executada através do computador, sendo que, atualmente, o termo simulação geralmente refere-se à simulação computacional. Segundo Shimizu (1975, apud GAVIRA, 2003, p 58.), o grande volume e complexidade de cálculos repetitivos em uma simulação demanda o uso intensivo do computador, capaz de reduzir significativamente o tempo de construção e solução dos modelos.

A simulação computacional compreende um método para o estudo de modelos de sistemas reais, experimentados numericamente em *softwares* apropriados, que buscam reproduzir o funcionamento do sistema ao longo do tempo, permitindo um melhor entendimento de suas características, para um dado conjunto de condições operacionais. O surgimento de *softwares* de simulação flexíveis e amigáveis ao uso por profissionais das mais diversas áreas tem contribuído para disseminar o uso desta técnica, antes dependente de

ferramentas de programação de baixo nível, mais propensas a erro, e que exigiam do usuário habilidades de programação.

Embora a técnica de simulação computacional possa ser usada para estudar sistemas simples, sua potencialidade é plenamente percebida quando utilizada no estudo de sistemas complexos.[...] O modelo de simulação pode se tornar bastante complexo caso se deseje uma representação bastante fiel do sistema, permitindo ainda assim realizar análises de simulação. Outros métodos podem necessitar que o modelo do sistema seja simplificado, de modo a permitir a sua análise, o que pode invalidar a validade do modelo (KELTON et al, 2001, p. 8).

A técnica de simulação é fundamental na resolução de diversos problemas, permitindo descrever e analisar o comportamento de sistemas reais e determinar como tais sistemas responderiam a mudanças em sua estrutura ou ambiente de funcionamento. De um modo abrangente, pode-se definir a simulação como a criação de um modelo computacional de um processo ou sistema existente ou a ser projetado, permitindo experimentá-lo, de forma a entender o seu comportamento e de avaliar estratégias adequadas de operação.

2.1.2 Evolução da simulação

De acordo com Gavira (2003), a busca pela resolução de problemas através da analogia com a realidade tem sido crescente e a impossibilidade de se testar hipóteses de solução diretamente em sistemas reais fez com que se utilizasse o método de simulação.

Entre o final da década de 50 e durante os anos 60, a técnica de simulação encontrava-se restrita a grandes corporações, tais como a indústria aeroespacial e do aço, e instituições públicas. Nesta época, a simulação exigia grandes investimentos em *hardware* e recursos humanos altamente especializados, destinados à construção de modelos de simulação complexos, utilizando-se de programação em linguagens então disponíveis, tal como o Fortran.

O uso da simulação, da forma como se conhece atualmente, iniciou-se entre o fim da década de 70 e o início da década de 80, quando os computadores tiveram sua capacidade de processamento notadamente aumentada e seu custo reduzido (KELTON et al., 2001). A partir de então, a simulação passou a ser acessível a um maior número de empresas, ainda que de grande porte. Foi também neste mesmo período que a técnica de simulação passou a ser adotada no meio científico, especialmente pela pesquisa operacional e engenharia de produção.

Nos anos 80, com o advento do computador pessoal e da animação, a simulação difundiu-se mais fortemente no mundo dos negócios, não apenas como uma ferramenta de análise de problemas já ocorridos, sendo solicitada num momento anterior ao início do processo produtivo. Ao final desta década, grandes empresas passaram a reconhecer na simulação um requisito para a aprovação de novos investimentos.

Segundo Kelton et al. (2001), a simulação começou a fazer parte do cotidiano de empresas de menor porte e de serviços nos anos 90, tornando-se presente também nos estágios iniciais de projetos de sistemas de produção. As ferramentas de simulação evoluíram para formas mais amigáveis ao uso. Ainda assim, os maiores obstáculos à padronização da simulação como ferramenta em muitas empresas são a necessidade de habilidade em modelagem e o tempo despendido no desenvolvimento de um estudo adequado utilizando a simulação.

É difícil prever as inovações na área de simulação, devido ao acelerado desenvolvimento da tecnologia e de *softwares* (BARTON et al., 2003). Já se podem observar pacotes de simulação integrados a aplicativos de análise estatística de dados, planilhas eletrônicas e bancos de dados. Continua válida a tendência de que as ferramentas de simulação se tornem mais fáceis de serem utilizadas pelos usuários, sendo previstos o surgimento de ambientes de modelagem voltados a aplicações específicas, tais como logística, fluxo de materiais, comunicações, semicondutores, dentre outros.

2.1.3 A evolução das linguagens de simulação

Com o surgimento dos computadores, nos anos 50 e 60, linguagens estruturadas de propósito geral foram as primeiras a ser utilizadas para a simulação (KELTON et al., 2001). Algumas destas linguagens, tais como Fortran e Pascal, eram utilizadas para simular sistemas complexos. Tal abordagem era flexível e customizável no que tange aos tipos de sistemas possíveis de serem simulados. Em contrapartida, cada programa era específico para cada situação, dificultando sua reutilização em outros contextos.

No decorrer do tempo, observou-se que os programas de simulação, construídos com base nas linguagens de propósito geral, possuíam características semelhantes. Desta forma, originaram-se as linguagens de simulação, capazes de reduzir o tempo necessário ao desenvolvimento de um modelo de simulação. Segundo Freitas (2001), a linguagem GPSS foi

a primeira a ser utilizada comercialmente. Além desta, pode-se citar outras, tais como SIMAN, SLAM e o SIMSCRIPT. No entanto, o tempo despendido no aprendizado destas linguagens ainda era consideravelmente grande.

De acordo com Gavira (2003), nos anos 80, surgiram ferramentas de simulação voltadas a aplicações industriais, como o ProModel e o AutoMod, sendo utilizadas por profissionais de diversas áreas.

O aparecimento de ferramentas de simulação mais elaboradas, também conhecidas como simuladores de alto nível, ocorreu nos anos 90. Estas ferramentas correspondem a ambientes de simulação, permitindo a construção de modelos de forma bastante intuitiva, através de interfaces gráficas. Bibliotecas pré-construídas disponibilizam objetos que podem ser facilmente parametrizados e utilizados pelo usuário. Estes simuladores ainda dispõem de facilidades como animação gráfica em tempo de execução do modelo. O tempo empregado na fase de programação se reduz drasticamente, podendo ser eficientemente utilizado na fase de verificação dos resultados da simulação. Na figura 2 pode-se observar a relação entre a evolução das linguagens de simulação e o tempo gasto em programação.

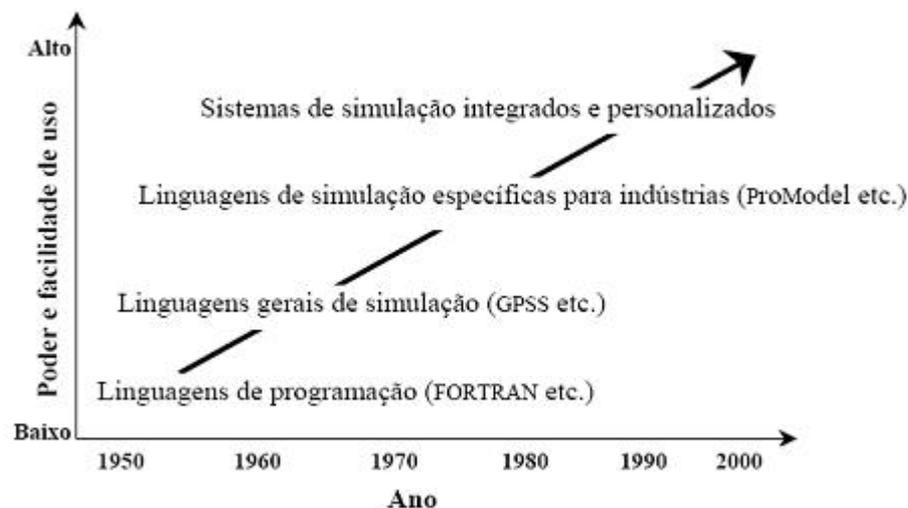


Figura 2 – A evolução das ferramentas de simulação computacional

Fonte: Harrell (1995, apud GAVIRA, 2003, p. 62).

As ferramentas de simulação tendem a se modernizar cada vez mais. No entanto, é necessário observar que, em algumas situações, facilidades fornecidas pelos simuladores podem comprometer a flexibilidade de construção dos modelos. Desta forma, os fabricantes dos *softwares* de simulação devem considerar não só a facilidade de uso, mas também a necessidade de customização. A integração de simuladores a linguagens de programação constitui-se em uma iniciativa neste sentido.

2.1.4 Conceitos básicos de simulação

Uma série de conceitos está relacionada aos elementos básicos da modelagem e simulação de sistemas. Estes conceitos são apresentados a seguir, pois sua compreensão colabora para o desenvolvimento de pesquisas que fazem uso da simulação como ferramenta principal.

2.1.4.1 Sistemas

A simulação é um dentre os muitos métodos existentes para o estudo e análise de sistemas. Segundo Taylor (1970, apud LAW; KELTON, 1991, p.3), sistema é um conjunto de entidades, tais como pessoas ou máquinas, reunidos em alguma relação de interação ou interdependência, com o propósito de atingir determinado objetivo. Em simulação, são estabelecidos os limites do sistema de modo a se considerar apenas seus componentes relevantes para os objetivos do estudo. Ao conjunto de variáveis necessárias para se descrever um sistema em um certo instante, conforme os objetivos do estudo, denomina-se estado do sistema (LAW; KELTON, 1991).

Segundo Law e Kelton (1991) em determinados períodos de existência de um sistema, surge a necessidade de estudá-lo para melhor compreender as relações entre seus componentes ou prever sua performance mediante novas condições. Porém, muitas vezes é difícil analisá-los em sua forma natural, seja por restrições de acesso, medição, custos ou fatores de risco. Desta forma, costumam-se construir modelos capazes de representar sistemas. Segundo Strack (1984), modelos possibilitam manipular e compreender sistemas existentes, além de se aplicar a estudos de sistemas ainda não existentes, onde se buscam as melhores alternativas de construção.

2.1.4.2 Modelos

Os modelos, de um modo geral, reúnem um conjunto de informações e atributos sobre o que se deseja representar, de acordo com os objetivos da análise a ser realizada. “Um modelo é uma representação de um objeto, sistema, ou idéia, em alguma outra forma que não a da entidade em si” (SHANNON, 1975, apud STRACK, 1984, p. 3).

Não se tem uma regra única para a construção de modelos. Uma boa prática é construir modelos de modo evolutivo, ou seja, deve-se iniciar partindo de um modelo simples até evoluir-se para um mais elaborado, sem perder o foco nos objetivos do estudo. As variáveis e suas relações devem ser consideradas na medida em que forem significativas para a descrição do sistema. O nível de detalhamento de um modelo deve variar conforme o objetivo a ser alcançado.

A modelagem consiste na habilidade de analisar o problema, considerando dele os aspectos essenciais, selecionando e modificando as hipóteses básicas que o caracterizam, e então aperfeiçoando o modelo, até que uma boa aproximação seja conseguida (STRACK, 1984, p.4).

O modelo deve ser capaz de representar com realismo as características qualitativas e quantitativas de um sistema. Desta forma, é necessário estabelecer o grau de precisão requerida, assim como critérios de teste e aceitação do modelo.

Os modelos podem ser classificados de vários modos. Modelos físicos ou icônicos possuem atributos físicos semelhantes ao sistema real, em dimensões reduzidas, tais como protótipos e modelos em escalas. Modelos simbólicos ou matemáticos são os mais abstratos, e portanto, muito utilizados em estudos de sistemas. Estes modelos usam símbolos algébricos e lógicos para representar entidades e suas relações. Segundo Gavira (2003), modelos de simulação são um tipo particular de modelo matemático.

Um modelo matemático, após construído, pode ser simples o suficiente para permitir que seja resolvido de forma a se obter uma solução analítica. Entretanto, sistemas muito complexos originam modelos matemáticos igualmente complexos, que dificultam a obtenção de soluções analíticas. Para estas situações, o modelo deve ser estudado através da simulação, sendo experimentado numericamente para entradas variadas e, simultaneamente, avaliado quanto aos seus efeitos sobre as respostas e medidas de desempenho do sistema (LAW; KELTON, 1991).

2.1.4.3 Modelos de simulação

Modelos matemáticos estudados através da simulação também são conhecidos como modelos de simulação, e incorporam o tempo e as mudanças que ocorrem ao longo do

tempo (CARSON II, 2004). De acordo com Barton (1989, apud GAVIRA, 2003, p. 63), um modelo de simulação possui as seguintes propriedades:

- intenção de representar todo o sistema ou parte dele;
- possibilidade de ser executado e manipulado;
- o tempo e o contador de repetições são variáveis do modelo;
- propõe-se a auxiliar o entendimento do sistema, podendo descrevê-lo, explicar seu comportamento passado ou prever seu comportamento futuro e ensinar a teoria pela qual o sistema pode ser entendido.

Os modelos de simulação podem ser classificados segundo três dimensões, de acordo com Law e Kelton (1991):

- estáticos ou dinâmicos - Os modelos estáticos representam sistemas em um determinado instante do tempo ou sistemas independentes do tempo. Sistemas dinâmicos, por outro lado, representam sistemas que evoluem ao longo do tempo.
- determinísticos ou estocásticos - Modelos determinísticos são assim classificados por não possuir elementos aleatórios. Desta forma, se o conjunto de entradas e suas relações for conhecido, o mesmo ocorre com a resposta ou saída do sistema. Modelos estocásticos representam sistemas que precisam ser modelados com pelo menos um componente aleatório. Tais modelos possuem respostas igualmente aleatórias, que devem ser tratadas como estimativas das características verdadeiras do modelo.
- discretos ou contínuos – Modelos de eventos discretos representam sistemas de modo que suas variáveis de estado se alteram, instantaneamente, em pontos específicos do tempo, nos quais se dá a ocorrência de eventos, conforme exemplificado na Figura 3. Eventos são acontecimentos instantâneos, que alteram o estado do sistema. Modelos de eventos contínuos representam sistemas de modo que suas variáveis se alteram continuamente ao longo do tempo, como mostra a Figura 4.

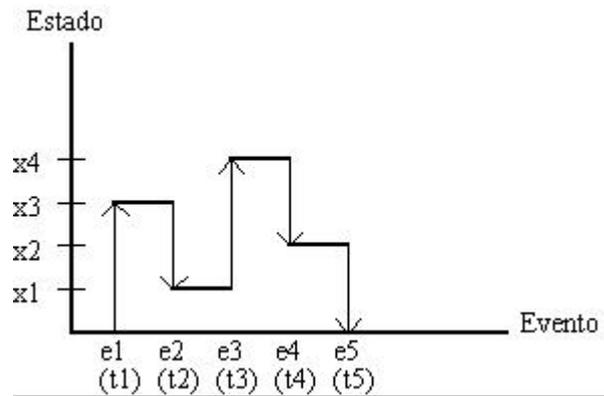


Figura 3 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos discretos
 Fonte: Carvalho (2003).

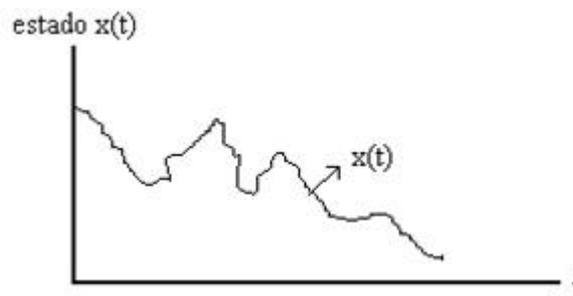


Figura 4 – Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos contínuos
 Fonte: Carvalho (2003).

É comum encontrar sistemas contínuos sendo tratados como uma seqüência de pequenas alterações discretas no tempo. Simular sistemas contínuos através de *softwares* de simulação a eventos discretos é possível. Nestes casos, é necessário modelar o sistema de modo a discretizá-lo no tempo. Surge daí a definição de sistemas discretizados, ou seja, sistemas observados em instantes discretos. Suas variáveis de estado variam continuamente, sem alterações bruscas. Porém, seus valores são amostrados apenas em instantes discretos, como se pode observar na Figura 5.

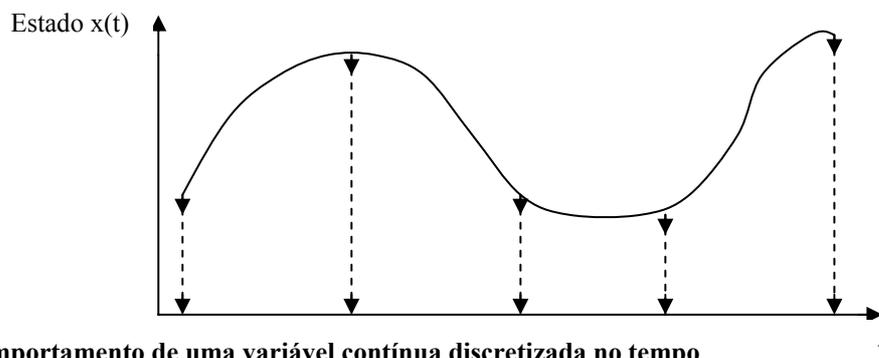


Figura 5 – Comportamento de uma variável contínua discretizada no tempo
 Fonte: Carvalho (2003).

2.1.4.4 Terminologia básica utilizada em simulação de sistemas

A conceituação dos elementos básicos da teoria de modelagem e simulação de sistemas envolve uma série de termos. A seguir, são descritos os principais termos segundo Carson II (2004), Freitas (2001), Kelton (2001) e Law (1991).

Variáveis de estado são variáveis cujos valores definem o estado de um sistema. Constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do sistema em um certo instante. A definição destas variáveis deve estar associada ao propósito do estudo (FREITAS, 2001).

Evento é um acontecimento instantâneo que altera o estado de um sistema, tal como a chegada de um cliente em um banco e o término do atendimento a este cliente (CARSON II, 2004). Eventos primários são programados para ocorrer em algum instante de tempo futuro, calculado com base em suposições estatísticas. Eventos secundários são gerados internamente pela lógica do modelo, como o evento de “início de atendimento”, gerado quando um servidor se torna disponível e existe uma entidade aguardando por atendimento na fila deste servidor. Em alguns modelos de simulação, os eventos não necessariamente alteram o estado do sistema, mas servem para programar outro evento, tal como o fim da simulação ou outra decisão sobre a operação do sistema (LAW; KELTON, 1991).

Entidades são objetos do modelo. Podem ser dinâmicas, movendo-se através do sistema, ou estáticas, servindo às entidades dinâmicas (FREITAS, 2001). Segundo Carson (2004), entidades dinâmicas são criadas no instante zero ou em outros instantes, através de eventos de chegada e geralmente representam objetos do mundo real, que fluem através dos sistemas. As entidades afetam e são afetadas por outras entidades e pelo estado do sistema, influenciando as saídas e, conseqüentemente, as medidas de desempenho do sistema (KELTON et al., 2001). Na literatura científica sobre este assunto e em *softwares* de simulação, o termo entidade refere-se, em geral, às entidades dinâmicas.

Atributos são as características das entidades. Entidades de um determinado tipo possuem os mesmos atributos, porém os valores dos atributos diferem entre as entidades deste tipo, individualizando-as. A definição dos atributos depende do objetivo do estudo.

Recursos são entidades estáticas que servem às dinâmicas. Os recursos são alocados pelas entidades. Em geral, estas competem entre si pelos serviços dos recursos. A capacidade de um recurso pode variar, possibilitando-o atender uma ou mais entidades simultaneamente. Uma entidade também pode ocupar mais que um recurso ao mesmo tempo.

Os recursos podem assumir diferentes estados, sendo ocupado e livre os mais frequentes. Outros estados possíveis são: bloqueado, em falha e indisponível.

Filas são locais no modelo onde aguardam as entidades que desejam utilizar-se de um recurso que se encontra ocupado. Existem diferentes modos de se gerenciar filas, conforme as condições de operação de um sistema. A forma mais comum é a FIFO (*first in, first out*), em que a primeira entidade a chegar na fila terá prioridade no atendimento.

De acordo com Freitas (2001), atividades são períodos de tempo predeterminados, pois uma vez iniciada, a duração de uma atividade pode ser programada. A duração da atividade pode ser uma constante, um resultado de uma expressão matemática, podendo ser também um valor aleatório baseado em uma distribuição de probabilidade, fornecida através de um arquivo externo ou também dependente do estado do sistema. O início e o fim de uma atividade são associados a eventos.

Período de espera é um intervalo de tempo sobre o qual não se tem controle sobre sua duração. Um servidor indisponível por um período não determinado exemplifica esta situação. Uma entidade aguardando em uma fila depende do tempo de processamento de outras entidades para que se saiba o seu tempo de espera ou atraso. O período de espera é delimitado pela ocorrência de eventos.

Tempo real simulado é o tempo real a ser simulado, enquanto o tempo de simulação representa o tempo necessário à execução de um experimento no computador (FREITAS, 2001). Replicação é a execução de um experimento, associado a um tempo simulado. As replicações se iniciam e terminam da mesma forma e possuem o mesmo conjunto de parâmetros de entrada. Porém, utilizam diferentes números aleatórios para tempos entre chegadas de entidades e tempos de atendimento (KELTON, 1998, apud WOLFF, 2003, p. 8).

2.1.5 Vantagens e desvantagens da simulação

A simulação permite experimentar modelos de sistemas reais. Caso contrário, haveria a necessidade de se fazer experiências nos próprios sistemas, podendo causar distúrbios, ou implementar mudanças sem análises prévias, o que representa riscos. As vantagens da simulação são abordadas por Law e Kelton (1991), Freitas (2001), Carson (2004), dentre outros autores. Das vantagens citadas, pode-se destacar algumas, tais como:

- muitos sistemas reais são complexos e envolvem fatores aleatórios. Modelos matemáticos associados a estes sistemas são difíceis ou impossíveis de serem analisados analiticamente. Nestes casos, a simulação é, muitas vezes, a única alternativa;
- propostas alternativas de projetos de sistemas ou de políticas de operação podem ser comparadas através da simulação, permitindo escolher o que melhor atende aos requisitos e que proporcione o melhor desempenho, antes mesmo de modificar ou construir um sistema. É possível a identificação de problemas tais como gargalos e falhas;
- modelos analíticos exigem que sejam feitas simplificações, de modo a enquadrá-los em um modelo padrão e torná-los matematicamente possíveis de serem solucionados. A simulação, por sua vez, permite que sejam construídos modelos mais realistas e possibilita a análise de um conjunto maior de medidas de desempenho;
- o tempo de simulação é controlável. A simulação permite estudar sistemas que evoluem lentamente ao longo do tempo, em um curto intervalo de simulação. Permite também que se avalie em detalhe o funcionamento de um sistema dinâmico, através do controle da velocidade de execução da simulação;
- em situações onde se dispõe de conhecimento parcial das variáveis de um problema e das relações entre elas, a simulação permite compreendê-las melhor e identificar quais delas exercem maior influência sobre o desempenho do sistema. O recurso de animação facilita o entendimento do sistema e a comunicação entre as pessoas envolvidas.

Por outro lado, a simulação apresenta algumas desvantagens, a saber:

- a construção de modelos de simulação demanda tempo, investimento em recursos e experiência. Em alguns casos, soluções analíticas, como teoria das filas, podem trazer resultados mais simplificados, porém menos dispendiosos;
- a simulação gera estimativas das verdadeiras características do sistema, para um conjunto particular de parâmetros de entrada. Desta forma, são necessárias várias replicações para cada conjunto de parâmetros a serem analisados;
- os resultados da simulação podem ser difíceis de serem interpretados, pois são aleatórios, dada a necessidade de capturar a variabilidade dos sistemas reais. Isto

dificulta a identificação dos resultados da simulação como causas da variabilidade do sistema ou de alguma interação significativa.

2.1.6 Incorporação da variabilidade dos sistemas reais aos modelos de simulação

A simulação de sistemas nos quais estão presentes componentes aleatórios requer, segundo Law e Kelton (1991), um método de geração de números aleatórios. As ferramentas de simulação possuem, internamente, um Gerador de Números Aleatórios (GNA), cujo principal objetivo é produzir um fluxo de números aleatórios independentes e uniformemente distribuídos entre 0 e 1 (KELTON et al., 2001).

A metodologia de geração de números aleatórios se desenvolveu ao longo de vários anos. Os primeiros métodos eram realizados manualmente, e foram evoluindo com o passar do tempo, até atingir um estágio de pleno desenvolvimento, com o surgimento dos computadores.

De acordo com Freitas (2001), a técnica de geração de números aleatórios mais amplamente utilizada denomina-se Método Congruente Linear Multiplicativo (MCLM), que deriva do Método Congruente Misto, desenvolvido em 1951, por Lehmer. Este método produz uma série de números Z_1, Z_2, \dots, Z_n através da equação 1 (KELTON et al., 2001):

$$Z_i = (aZ_{i-1} + c) \bmod m \quad (1)$$

Onde m , a e c são constantes, que devem ser cuidadosamente escolhidas, baseando-se em critérios teóricos e empíricos. A equação 1 divide $(aZ_{i-1} + c)$ por m e atribui o resto da divisão ao próximo número Z_i . Para que a função MCLM possa ser inicializada, é necessário especificar um valor para Z_0 , que é a semente. Por fim, para se gerar valores distribuídos entre 0 e 1, dividi-se Z_i por m , isto é:

$$U_i = Z_i / m \quad (2)$$

A seqüência U_1, U_2, U_3, \dots corresponde aos números pseudo-aleatórios, que podem ser usados na simulação. Qualquer método de geração de números aleatórios em computador é uma espécie de algoritmo recursivo, que pode repetir a mesma seqüência de números aleatórios várias vezes. Por isto, são conhecidos por pseudo-geradores de números aleatórios (KELTON et al, 2001).

Os programas de simulação possuem geradores de números aleatórios, que são a base das funções geradoras de variáveis aleatórias (FGVA). A FGVA gera variáveis aleatórias das distribuições de probabilidade teóricas que podem ser usadas como entrada de um modelo de simulação (FREITAS, 2001).

Existem várias técnicas para construção de uma FGVA. O algoritmo utilizado depende, evidentemente, da distribuição de probabilidade a partir da qual se deseja gerar as variáveis aleatórias. Uma destas técnicas é a da transformada inversa (MORETTIN, 2006). Nesta técnica, a partir da função densidade de probabilidade de uma variável aleatória $f(x)$, aplica-se o método da transformada inversa, obtendo-se uma expressão que gera números aleatórios em função dos parâmetros da distribuição teórica de probabilidade e de um parâmetro variável, uniformemente distribuído entre 0 e 1. Estes números gerados seguem o mesmo comportamento da variável aleatória da distribuição teórica.

2.1.7 Mecanismos de avanço no tempo

Na simulação de sistemas, é necessária a existência de um mecanismo que incremente o tempo simulado continuamente. A passagem do tempo representa o dinamismo dos sistemas, e é armazenada por uma variável conhecida por relógio da simulação (*'simulation clock'*). Dois métodos de avanço do tempo simulado se destacam: avanço do tempo para o próximo evento e avanço do tempo com incremento fixo (LAW; KELTON, 1991).

O método de avanço para o próximo evento adianta o relógio para o próximo instante de tempo em que existe evento programado para ocorrer. Ao se avançar no tempo de maneira que o próximo evento ocorra de fato, o estado do sistema e a lista de ocorrência de eventos futuros são atualizados. Este processo ocorre continuamente, até que se atinja uma condição de parada. Este método também é conhecido como *'orientado a eventos'*. Simulações de eventos discretos, geralmente, utilizam este método (GORDON, 1969).

Segundo Law e Kelton (1991), o mecanismo de avanço do tempo por incrementos fixos atualiza o relógio incrementando-o por intervalos pequenos, apropriadamente definidos, após o que verifica quais eventos estão programados para ocorrer neste último intervalo de tempo. Estes eventos são então processados no final do intervalo e o estado do sistema é atualizado. Usualmente, simulações de eventos contínuos fazem uso desta abordagem. É importante notar que este método pode ser aproximado pelo orientado a eventos, através da programação ‘artificial’ da ocorrência de eventos a cada intervalo de Δt unidades.

2.2 METODOLOGIA E FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO

Nesta segunda seção do referencial teórico são apresentados os conceitos envolvidos na construção de rotinas de simulação através de programas computacionais, capazes de simular sistemas de diferentes níveis de complexidade. A elaboração destas rotinas utilizando-se da técnica de modularização ou uso de sub-rotinas as torna mais eficientes, facilitando também a legibilidade da lógica e das interações entre as principais rotinas de simulação. Em seguida, aborda-se o uso da simulação para a análise de sistemas complexos através do uso de modelos híbridos, ou seja, uma combinação entre modelos contínuos no tempo e de eventos discretos. Os detalhes de modelagem, codificação e do funcionamento interno das simulações são, no entanto, apenas parte de um projeto de simulação, que por sua vez busca entender ou projetar um sistema complexo. Desta forma, a seção 2.2.3 apresenta uma seqüência de passos para um estudo de simulação, desde o correto entendimento do problema até a etapa final de documentação.

2.2.1 Métodos de modelagem segundo diferentes visões de sistemas

Um conceito fundamental a ser considerado na metodologia de modelagem é a visão de sistemas a ser adotada. A importância deste conceito está estritamente relacionada ao desenvolvimento das linguagens de programação para simulação e de simuladores (NANCE; OVERSTREET, 2004).

Cada uma das três visões clássicas de sistemas baseia-se, respectivamente, no agendamento de eventos, na busca por atividades ou na interação de processos, segundo Nance e Overstreet (2004). Estas visões buscam captar diferentes aspectos da realidade do funcionamento dos sistemas.

Na visão de modelagem por eventos, as interações entre entidades criam ou estão relacionadas a eventos, que por sua vez alteram o estado do sistema (FREITAS, 2001). Na modelagem por atividades, entidades interagem com recursos, participando de atividades, sob certas condições. Estas condições definem a ordem destas interações. A modelagem por processos enxerga os sistemas como um conjunto de entidades com características próprias, que fluem pelo sistema. O que diferencia estes métodos é, primordialmente, a maneira de se programar a ocorrência do próximo evento a ser processado.

A modelagem por processos é a forma mais intuitiva. Nela, os sistemas são vistos sob o ponto de vista das entidades, que competem pelos recursos ou cooperam entre si para o cumprimento de tarefas. O programa de simulação acompanha cada entidade em sua passagem pelo modelo, imitando seu comportamento e executando as atividades e processos atribuídos a ela.

2.2.2 Funcionamento das rotinas de simulação

Estudos de simulação consideram, em geral, o funcionamento dos *softwares* de simulação como uma caixa-preta, segundo Brunner e Schriber (2004). São observadas as características externas destes *softwares*. Entender os fundamentos sobre os quais se apóiam os programas de simulação permite desenvolver abordagens adequadas ao modelamento de sistemas e situações complexas. Além disto, diferentes ferramentas de simulação implementam de modo particular certas situações. O analista de simulação deve ser capaz de entender tais diferenças e estar ciente delas e de seus efeitos, de modo a trabalhá-las, obtendo os resultados desejados.

O projetista de linguagens de simulação procura representar de maneira genérica as atividades que ocorrem em simulação de sistemas. Os programas costumam ser modularizados através de rotinas ou subprogramas, que tornam claras a lógica e interações nos modelos. Segundo Law e Kelton (1991), em modelos de simulação discreta, além do programa principal, um programa de simulação inclui rotinas de inicialização, temporização,

geração de variáveis aleatórias e relatórios. As ações mais importantes, entretanto, ocorrem nas rotinas que representam os eventos de chegada de entidades no sistema e de saída de entidades após o atendimento por um servidor.

A lógica das rotinas de eventos é independente da linguagem de simulação adotada. O fluxograma da figura 6 representa o evento de chegada. Primeiramente, o instante de chegada da próxima entidade é gerado e armazenado na lista de eventos futuros. Em seguida, verificar-se-á se o servidor encontra-se ocupado. Estando ocupado, o número de clientes na fila é incrementado de uma unidade, e a entidade vai para o final da fila. Caso contrário, o tempo de permanência da entidade na fila é zero, e o estado do servidor passa a ser ocupado. Assim, o instante de saída da entidade do servidor é programado e armazenado na lista de eventos futuros, adicionando-se ao instante atual do relógio o tempo de serviço sorteado. A cada atualização a lista de eventos futuros é organizada em ordem cronológica.

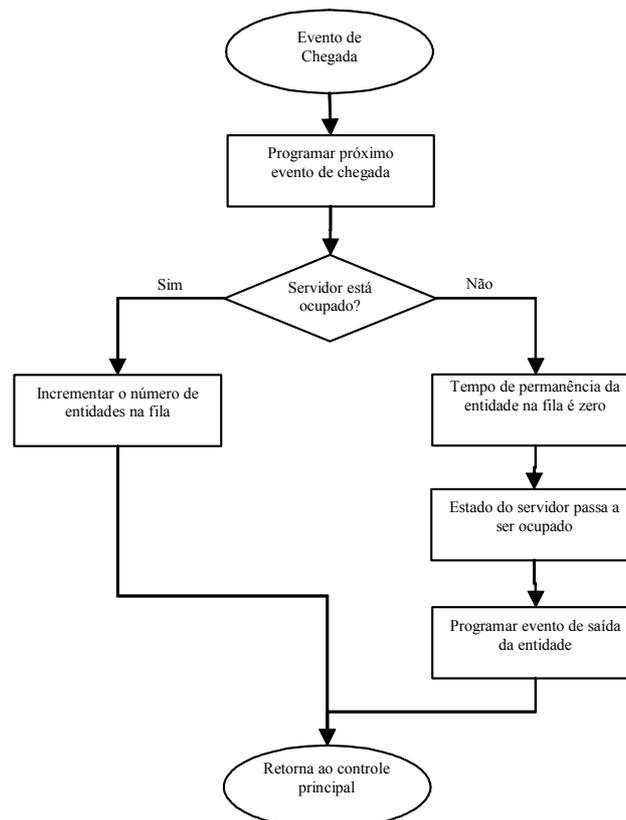


Figura 6 – Fluxograma da rotina do evento de chegada

Fonte: adaptado de Law e Kelton (1991).

O fluxograma da Figura 7 corresponde ao evento gerado quando uma entidade libera um recurso. Caso não exista nenhuma entidade na fila, o estado do servidor passa a ser livre. Se houver entidade na fila, a primeira delas passa a ser atendida pelo servidor, e o comprimento da fila é decrescido em uma unidade. O tempo de permanência desta entidade

na fila é computado e programa-se o evento de saída desta entidade do sistema, somando-se o tempo atual ao tempo de serviço sorteado. O evento programado é adicionado, ordenadamente, à lista de eventos futuros.

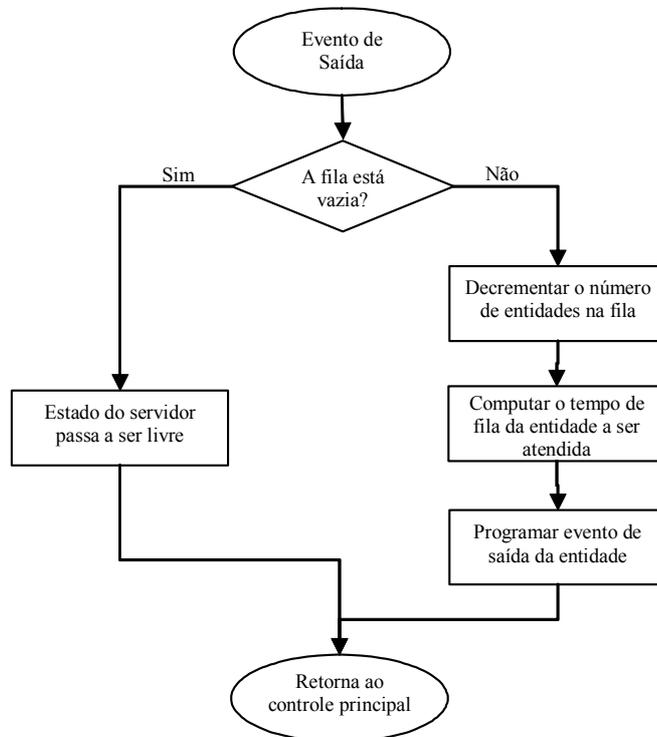


Figura 7 – Fluxograma da rotina do evento de saída

Fonte: adaptado de Law e Kelton (1991).

O fluxo de controle que representa as interações entre os componentes de um programa de simulação de avanço do tempo para o próximo evento é apresentado na figura 8. A rotina de inicialização seta o relógio para o instante zero e inicializa o estado do sistema, as estatísticas e a lista de eventos. Em seguida a rotina de avanço no tempo determina o próximo evento mais iminente, e avança o relógio da simulação para o instante de ocorrência deste evento. Então, o programa principal invoca a rotina deste evento que atualiza o estado do sistema. Estatísticas do sistema são coletadas e a lista de eventos futuros é atualizada. Neste ponto, a Função Geradora de Variáveis Aleatórias (FGVA) é geralmente utilizada. A seguir, testa-se se a simulação deve ser encerrada. Se for o momento final da simulação, a rotina de relatórios estima as medidas de performance do sistema baseando-se nas estatísticas anteriormente coletadas. Se a simulação for continuar, o controle retorna para o programa principal, reiniciando o ciclo, que só terminará quando a condição de parada for satisfeita.

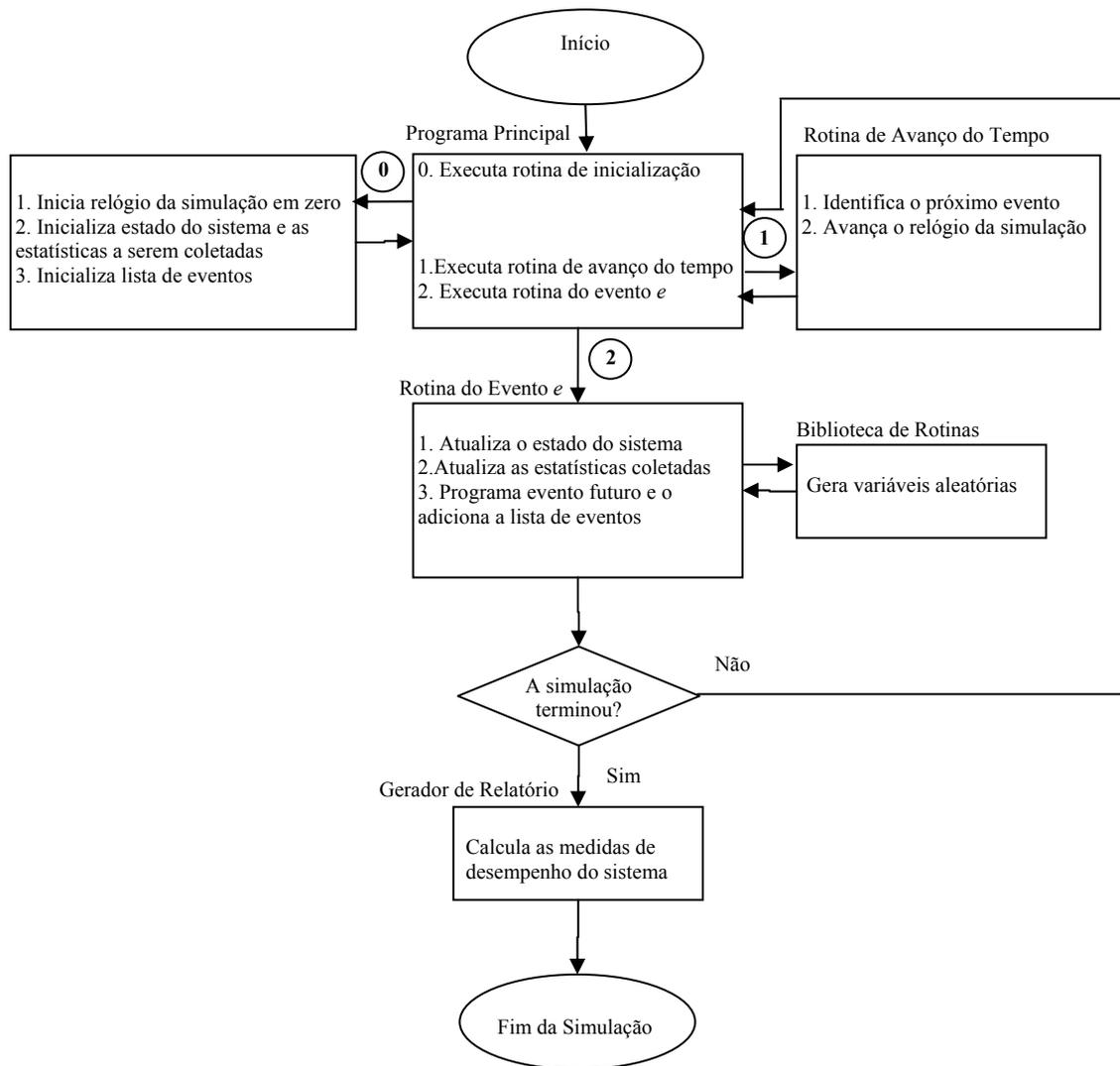


Figura 8 – Fluxograma da rotina principal de controle (abordagem de avanço no tempo para o próximo evento)

Fonte: adaptado de Law e Kelton (1991).

2.2.3 Metodologia de simulação

Um projeto de simulação baseia-se em uma seqüência de etapas, conhecidas como metodologia de simulação, de acordo com Gavira (2003). A figura 9 mostra os passos que compõem um estudo de simulação e as relações entre eles. Um estudo de simulação não é um simples processo seqüencial (LAW; KELTON, 1991). Com o decorrer do estudo, um melhor entendimento do problema pode reconduzir a uma etapa anterior. Assim, comenta-se a seguir cada etapa representada no fluxograma da figura 9.

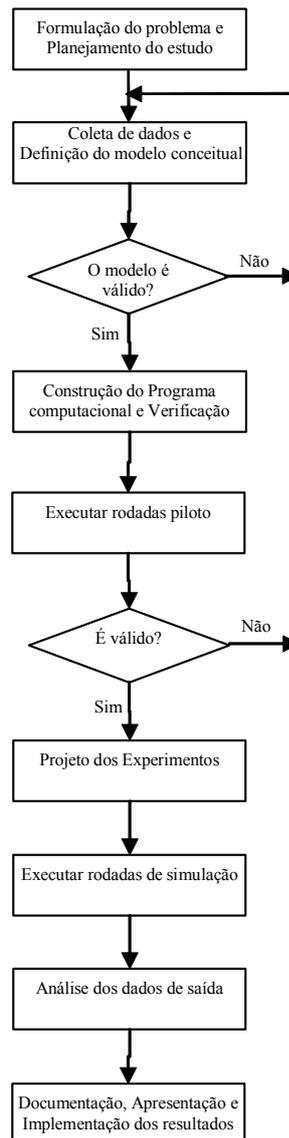


Figura 9 – Fluxograma dos passos de um estudo de simulação
 Fonte: Law e Kelton (1991).

2.2.4 Formulação do problema e planejamento do estudo

O projeto de simulação deve se iniciar pela clara definição do problema a ser estudado e estabelecimento dos objetivos a serem alcançados, tais como respostas a serem respondidas e hipóteses a serem testadas. Esta etapa inclui a definição do escopo do sistema e de suas medidas de desempenho, além de um plano de projeto. Este último inclui os recursos de tempo, pessoas, hardware e software a serem envolvidos, e a definição de cenários a serem investigados (FREITAS, 2001).

Coleta de dados e definição do modelo conceitual

Nesta fase, o sistema é abstraído através de um modelo conceitual e informações sobre o sistema são coletadas, quando disponíveis (GAVIRA, 2003). Os dados coletados são validados e tratados, e em seguida, utilizados para definir os procedimentos operacionais de funcionamento do sistema e as distribuições de variáveis aleatórias a serem usadas no modelo. A definição do modelo de um sistema, com um determinado objetivo, é mais uma arte do que uma ciência. Não existem regras rígidas (LAW; KELTON, 1991). Pode-se representar o sistema de forma gráfica, tal como em fluxogramas, ou através de pseudocódigos, definindo-se os componentes, variáveis, relações entre eles e suposições a serem feitas. Uma boa prática é a construção de modelos inicialmente simples, que vão evoluindo em complexidade, na medida em que for necessário, conforme os objetivos a serem alcançados (FREITAS, 2001).

Validação do modelo conceitual

No desenvolvimento do modelo conceitual, é fundamental que as pessoas familiarizadas com a operação do sistema sejam envolvidas. Nesta etapa, deve-se percorrer o modelo, considerando-se as suposições feitas na etapa anterior, de modo a validar o modelo construído em conjunto com os especialistas do sistema real. A adequação das distribuições de probabilidade para a geração das variáveis aleatórias do problema também deve ser verificada, através de testes de aderência estatísticos (LAW; KELTON, 1991).

Construção e verificação do modelo computacional

Esta fase inicia-se com a programação do modelo em uma ferramenta de simulação. Deve-se definir pela utilização de uma linguagem de simulação de propósito geral, linguagem de simulação ou pacote de simulação. Em seguida, deve-se verificar se o modelo funciona de acordo com o desejado, sem erros de sintaxe e lógica, conforme os objetivos do estudo e suposições definidas. Existem várias técnicas, tais como: testar o modelo alimentando-o com uma ampla variação dos valores dos parâmetros de entrada, utilizar dados de entrada determinísticos que possibilitem determinar a saída do modelo com precisão, utilizar as facilidades do simulador como o depurador e a animação, dentre outras (CARSON II, 2004). É importante considerar que os erros encontrados podem ser causados por dados de entrada, modelo conceitual ou pelo programa computacional, segundo Sargent (2004).

Realização de execuções piloto

Execuções piloto são realizadas com o modelo já verificado, com o objetivo de serem utilizadas na etapa seguinte, de validação do modelo computacional.

Validação do modelo computacional

Esta etapa consiste em determinar se o modelo programado é uma representação confiável do sistema real. A validação é obtida, em geral, pela calibração do modelo, através de um processo iterativo que compara o comportamento do modelo e do sistema real, até que se atinja um modelo com a confiabilidade requerida pelo estudo (BANKS, 1996, apud GAVIRA, 2003, p. 76). As execuções piloto podem ser usadas para testar a sensibilidade do modelo a pequenas variações nos parâmetros de entrada. Se possível, deve-se comparar as saídas e medidas de desempenho obtidas nas experimentações com o sistema real, utilizando-se inclusive dados históricos do sistema na execução da simulação.

Projeto dos experimentos

Antes da realização da simulação, é preciso decidir algumas questões como as condições iniciais para a execução da simulação, a duração do período transiente do sistema, a duração de cada simulação e o número de replicações de cada simulação (LAW; KELTON, 1991). Não existem regras rígidas para determinar a duração e o número de replicações, pois estas medidas dependem da natureza do sistema e dos objetivos do estudo. O número de replicações afeta diretamente a precisão estatística das medidas de desempenho, pois interfere no intervalo de confiança dos valores estimados (CARSON II, 2004).

Realização de execuções de simulação

Nesta etapa, são executadas as simulações, que geram as respostas do modelo, bem como suas medidas de desempenho.

Análise dos resultados

A geração de números aleatórios, baseados em distribuições de probabilidade, alimenta modelos de simulação. Por serem aleatórios, no entanto, tais valores podem apresentar grande variabilidade (LAW; KELTON, 1991). Desta forma, uma única replicação pode produzir estimativas que variam significativamente em relação aos parâmetros reais do sistema. Sendo assim, métodos estatísticos são necessários para projetar e analisar

experimentos com modelos de simulação. Segundo Law e Kelton (1991), técnicas estatísticas são utilizadas na análise dos dados de saída da simulação. O objetivo desta fase pode ser a determinação do desempenho de uma dada configuração do sistema, através da construção de um intervalo de confiança, ou a comparação entre diferentes configurações possíveis. Os dados de saída do modelo e do sistema são comparados, através de testes estatísticos clássicos, como o teste t , qui-quadrado (χ^2) e Kolmogorov-Smirnov (KS). Ao final desta análise, pode-se concluir que um maior número de replicações será necessário para que se obtenha a precisão estatística desejada (FREITAS, 2001).

Documentação e implementação dos resultados

Documentar o desenvolvimento da simulação e o modelo obtido para facilitar o entendimento do estudo realizado por pessoas não familiarizadas com o sistema, bem como a sua reutilização em projetos futuros. Os resultados obtidos são implementados se forem válidos e tiverem credibilidade junto aos tomadores de decisão (GAVIRA, 2003). O sucesso da etapa de implementação depende do bom andamento das fases anteriores.

2.2.5 Sistemas terminais e não-terminais

Os sistemas podem ser classificados em terminais e não-terminais, conforme a determinação do tempo simulado de uma replicação (LAW; KELTON, 1991). Sistemas terminais possuem um evento natural que determina o tempo simulado de cada rodada de simulação, o que não ocorre com sistemas não-terminais, que não possuem nem condições iniciais fixas de simulação nem um evento que caracterize o fim do processo de simulação (FREITAS, 2001). Nestes casos, o tempo de simulação deve ser suficientemente longo para que as condições iniciais, presentes no período transiente, não influenciem os resultados. Se o período transiente for curto quando comparado ao tempo da replicação, pode-se realizar replicações independentes, tais como em sistemas terminais, descartando-se as observações correspondentes a este período. Apenas o comportamento em regime do sistema é objeto de interesse. Também é possível realizar uma única e longa replicação, de duração suficiente para que se descarte as observações da fase transiente. O restante dos dados pode então ser dividido em lotes, a serem analisados como replicações independentes (FREITAS, 2001).

2.2.6 Modelagem de sistemas contínuos e híbridos - simulação de eventos discretos

A simulação contínua modela os sistemas de modo que as variáveis de estado se alteram continuamente ao longo do tempo. Em sistemas contínuos, suas principais atividades causam alterações suaves nos atributos das entidades do sistema (GORDON, 1969). Nestes sistemas, o estado é geralmente definido como uma medida de energia interna do sistema, tal como posição e velocidade (PRITCHETT et al., 2000).

Em geral, modelos de simulação contínua envolvem equações diferenciais, que estabelecem a taxa de variação da variável de estado, com relação ao tempo. Segundo Law e Kelton (1991), quando as equações diferenciais são simples, podem ser resolvidas analiticamente, gerando valores para as variáveis de estado ao longo do tempo, em função dos valores iniciais das variáveis de estado. Entretanto, nos casos em que a solução analítica não é possível, são utilizados métodos numéricos, tal como a integração Runge-Kutta, usada para integrar equações diferenciais numericamente.

Modelos contínuos e discretos diferem quanto à frequência em que o estado do sistema precisa ser atualizado. A figura 10 apresenta diferenças entre estes modelos. Modelos de eventos discretos buscam definir o estado do sistema, observando a ocorrência de uma dada condição ou quantificando as entidades de uma determinada categoria. Tais modelos descrevem sistemas abstraindo sua dinâmica interna. Seus parâmetros estipulam como e com que frequência ocorrem as transições entre os estados. Estes parâmetros são definidos através de observações experimentais de sistemas existentes, e capturam a natureza estocástica destes sistemas. Modelos contínuos no tempo modelam a dinâmica interna do sistema. Os estados são definidos, geralmente, como uma medida da energia interna do sistema, tal como medidas de posição e velocidade.

	Modelos contínuos no tempo	Modelos discretos no tempo
Sistema a ser simulado	Unidades mecânicas de funcionalidade complexa	Entidades múltiplas, geralmente simples
Estado do sistema	Distribuição de energia dentro do sistema	Caracterização de propriedades do sistema
Medidas de estado do sistema	Posição, velocidade (determinístico)	Tamanho da fila, frequência (propriedades estatísticas)
Fator de atualização	Tempo	Transição entre estados
Capacidade de simulação	Analisar comportamentos determinísticos de unidades mecânicas	Analisar a natureza estocástica das interações entre entidades
Aplicações comuns	Projeto e análises de unidade, treinamento em tempo real	Análise e planejamento de operações com múltiplas entidades

Figura 10 – Comparação entre modelos contínuos no tempo e de eventos discretos

Fonte: Pritchett et al. (2000).

Em modelos contínuos, os algoritmos de simulação aproximam a variação contínua através de atualizações em intervalos de tempo discretos, também conhecidos como *time steps*. Tais intervalos de tempo devem ocorrer a uma taxa duas vezes maior do que a variável de interesse, de modo a capturar seu comportamento (BELTRAMI, 1987 apud PRITCHETT, 2000).

Modelos discretos não são necessariamente utilizados para a modelagem de sistemas discretos, assim como modelos contínuos não são necessariamente usados na modelagem de sistemas contínuos (LAW; KELTON, 1991). A decisão de se utilizar um modelo discreto ou contínuo depende dos objetivos do estudo e das características do sistema.

Muitos sistemas complexos são mais adequadamente descritos através de modelos híbridos, ou seja, uma combinação de modelos contínuos no tempo e de eventos discretos, de acordo com Pritchett et al. (2000). Isto ocorre uma vez que existem sistemas que não são nem totalmente discretos nem totalmente contínuos, o que sugere a construção de modelos com características de simulação contínua e de eventos discretos, ou seja, modelos discreto-contínuos, ou híbridos. Existem três tipos de interação que podem ocorrer entre mudanças de variáveis de estado discretas e contínuas:

- um evento discreto pode causar uma mudança discreta no valor de uma variável de estado contínua;
- um evento discreto pode provocar uma mudança na relação de variação de uma variável contínua em um determinado instante de tempo;
- uma variável contínua, ao atingir um valor limite, pode disparar a ocorrência ou programação de um evento discreto.

Segundo Pritchett et al. (2000), provou-se ser possível incorporar modelos discretos ou contínuos em *softwares* de simulação direcionados para um ou outro dentre estes dois tipos. Modelos contínuos, tais como o fluxo de materiais, podem ser discretizados, isto é, tratados como modelos discretos, após algumas suposições sobre as variáveis de estado (KUO et al., 2001). A Figura 11 ilustra como mudanças de nível de um fluido em um taque podem ser simuladas no decorrer do tempo. Quanto menores os intervalos de discretização ou *time-slices*, mais precisa será a aproximação, porém, mais lenta será a simulação. Entretanto, notou-se também que este tipo de implementação requer que sejam estabelecidos pressupostos sobre o modelo, limita sua precisão, aumenta a complexidade do *software* e pode resultar em uma simulação computacionalmente ineficiente. Outra abordagem é a criação de *softwares* que aceitam de modo inerente modelos discretos e contínuos.

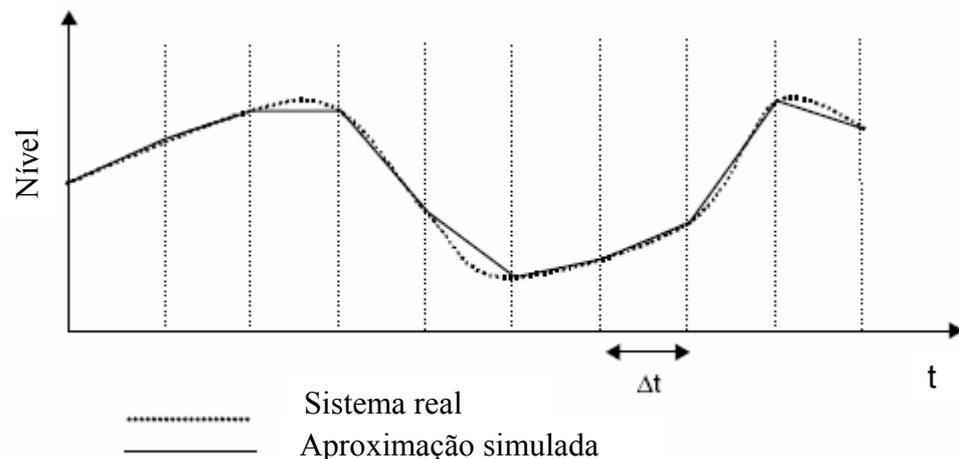


Figura 11 – Aproximação discreta de um sistema contínuo

Fonte: Robinson (2004).

Carvalho (2003) e Fioroni *et al.* (2007) utilizaram-se da discretização de sistemas contínuos para simular e analisar o desempenho de processos. Estes autores discretizaram o fluxo de materiais, tratando-o como uma série de ‘porções’, obtendo resultados estatisticamente similares ao comportamento do sistema real. O fluxo de gás LDG na simulação do processo de recuperação e distribuição foi tratado como uma seqüência de porções de volume variável.

Fioroni *et al.* (2007) modelaram um conjunto de correias transportadoras de uma grande usina siderúrgica brasileira, através da técnica de discretização. A figura 12 ilustra o principal conceito utilizado neste estudo. Nela, é representado em *A* o sistema contínuo real e em *B* o mesmo fluxo de material dividido em ‘porções’ ou ‘blocos’ equivalentes ao montante

representado em *A*. Conforme estes autores, em ambos os casos o material irá sair de sua origem e chegar ao seu destino ao mesmo tempo, usando a mesma capacidade da correia.

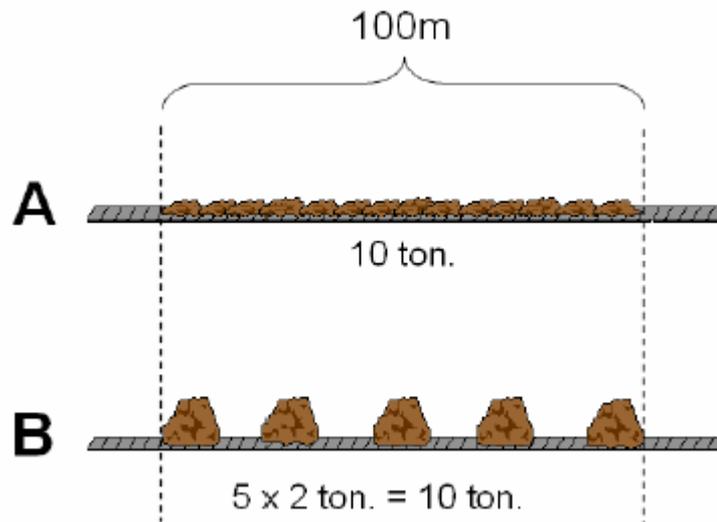


Figura 12 – Representação contínua x discreta
Fonte: Fioroni *et al.* (2007).

Através da Figura 13, tem-se o comportamento gráfico da variação do volume transportado de modo contínuo e discreto. A comparação destes dois gráficos mostra que em ambas as situações o resultado final será o mesmo. Tal fato foi comprovado na etapa de validação do modelo, onde se pôde comprovar a similaridade dos resultados da simulação ao sistema real. Segundo Fioroni *et al.* este conceito pode ser aplicado em qualquer situação onde um sistema apresente comportamento contínuo.

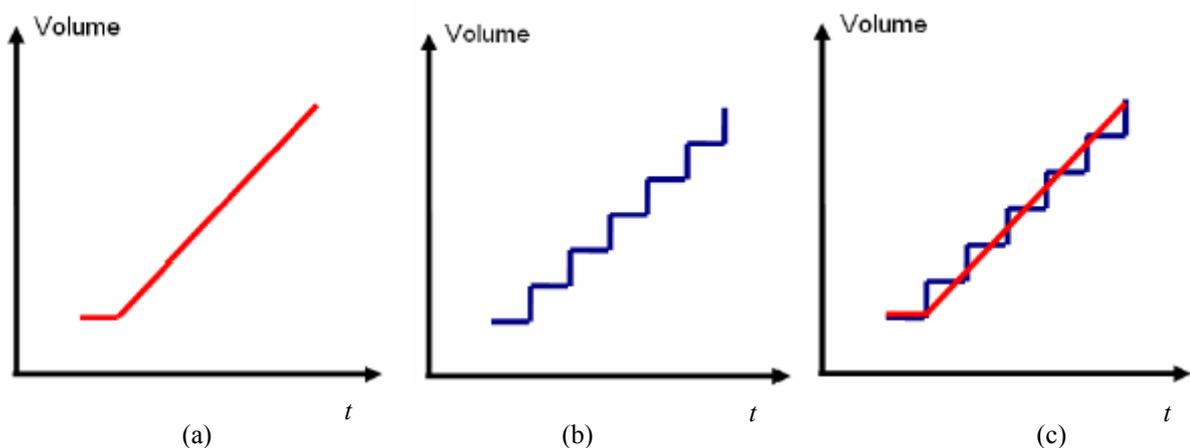


Figura 13 – Representação contínua real (a) e discreta modelada (b) da chegada do material ao destino e comparação entre ambos (c).

Fonte: Fioroni *et al.* (2007).

2.2.7 Ferramentas de simulação

Em um estudo de simulação, a etapa da construção e verificação do programa computacional busca, através do programa gerado, exercitar o modelo do sistema em computador, permitido assim que as saídas possam ser analisadas (GAVIRA, 2003). Os programas de simulação podem ser implementados através de ferramentas de simulação, por meio de programas codificados em linguagens de propósito geral, linguagens de simulação ou pacotes de simulação. Existem também pacotes de simulação específicos para algumas áreas de aplicação, tais como a manufatura, financeira, sistemas de transporte, dentre outros. Arena e ProModel são exemplos de pacotes voltados à simulação de sistemas de manufatura e de manipulação de materiais.

Em linguagens de programação de propósito geral, um programa é escrito especificamente para cada sistema em estudo. Neste caso, existe grande flexibilidade por parte do programador quanto à criação do modelo matemático, criação de relatórios e tipos de experimentos possíveis de serem definidos. Entretanto, a maior desvantagem desta abordagem é o grau de dificuldade e o tempo necessário à construção dos programas.

Linguagens de simulação possibilitam o desenvolvimento de modelos através da construção de programas que utilizam funções previamente escritas, voltadas para simulação de sistemas. Desta forma, linguagens de simulação requerem um tempo de programação menor que as linguagens de programação.

De acordo com Law e Kelton (1991), simuladores ou pacotes de simulação permitem a simulação de sistemas através de pouca ou nenhuma programação. O modelo é construído de modo intuitivo, independente dos detalhes de implementação (VAN BEEK; ROODA, 2000). Pode-se utilizar rotinas e bibliotecas previamente compiladas e que podem ser selecionadas através de menus e objetos gráficos e posteriormente inseridas, após alguma parametrização, em um programa principal. Os simuladores possuem características tais como: interface gráfica, animação do modelo, ferramentas estatísticas de tratamento de dados e geração de relatórios. Desta forma, simuladores exigem um menor tempo de desenvolvimento do que as linguagens de simulação. Pacotes de simulação são mais utilizados para análises com alto nível de abstração, ou seja, que não incluam detalhes da lógica de controle dos sistemas.

Ferramentas de simulação, tais como os pacotes de simulação, devem ser adequadamente selecionados, considerando-se suas características e as do sistema a ser

estudado. Dentre os principais grupos de critérios que devem ser observados na escolha de um pacote de simulação, destacam-se os da Figura 14, segundo Nikoukaram et al. (1998).

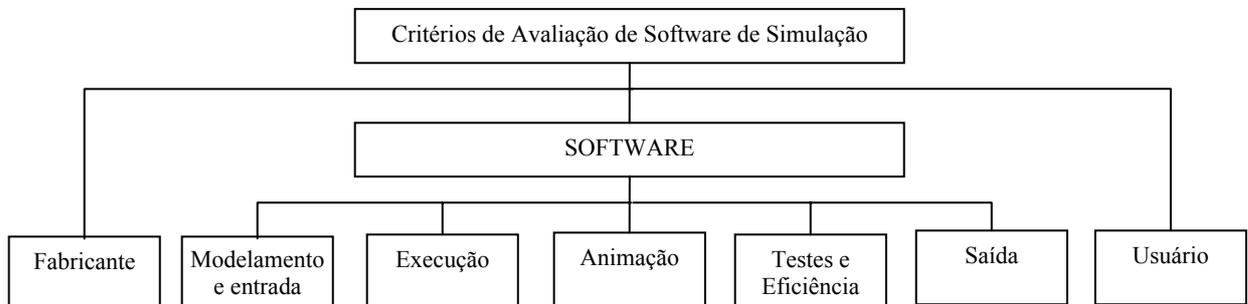


Figura 14 – Principais grupos de critérios para avaliação de *softwares* de simulação
Fonte: Nikoukaram et al. (1998).

Em linhas gerais, pacotes de simulação devem ser flexíveis, com entidades podendo ser definidas através de atributos gerais, ajustáveis às suas características. O simulador também deve permitir o modelamento de sistemas de forma amigável, através de ferramentas como depuradores e disponibilização de menus de ajuda sobre o uso da ferramenta. Sistemas mais complexos exigem boa performance na velocidade de execução do modelo. Em algumas áreas de aplicação, tal como a indústria do aço, é conveniente que a ferramenta tenha funcionalidades para a simulação de sistemas híbridos (contínuo-discretos) (LAW; KELTON, 1991).

2.2.8 Ferramentas de simulação em sistemas híbridos e contínuos

Um critério amplamente utilizado para a classificação de modelos e linguagens de modelagem baseia-se na relação entre mudanças de estado e o avanço do tempo (VAN BEEK; ROODA, 2000). Em modelos e linguagens Contínuos no Tempo (CT), um número infinito de mudanças de estado ocorre em um intervalo finito de tempo, e não existem mudanças de estado em pontos discretos no tempo. Em modelos e linguagens de Eventos Discretos (ED), as mudanças de estado ocorrem apenas em instantes discretos do tempo. Entre dois instantes de tempo adjacentes, os estados não sofrem alterações. Nos casos de modelos de Tempo Discreto (TD), os estados se alteram em pontos equidistantes do tempo. A

combinação dos conceitos de continuidade no tempo e de eventos discretos corresponde aos modelos e linguagens híbridos.

Linguagens de Evento Discreto Extendidas (ED+) são linguagens de evento discreto que possuem elementos de linguagem para a modelagem de sistemas contínuos. Segundo Van Beek e Rooda (2000), uma área de aplicação deste tipo de linguagem são sistemas industriais que funcionam por bateladas ou lotes, onde a programação de diferentes produtos produzidos e armazenados em diferentes tanques ou reservatórios é importante.

A linguagem SIMAN é um exemplo de linguagem de evento discreto estendida (DE+). A linguagem SIMAN e a ferramenta de visualização CINEMA foram combinadas, dando origem ao ambiente de simulação ARENA.

A classificação de linguagens de simulação em diferentes categorias não significa que existam categorias melhores. Conforme o tipo de aplicação, pode-se optar pela linguagem que melhor atenda aos objetivos e necessidades em questão.

2.2.9 O software Arena

O pacote de simulação conhecido como Arena reúne as vantagens das ferramentas de simulação de alto nível, com a flexibilidade de linguagens de programação de propósito geral. O Arena foi lançado pela empresa *Systems Modeling*, em 1993, quando a então existente linguagem de simulação SIMAN foi unificada ao *software* de animação CINEMA.

Conforme representado na figura 15, o ARENA agrupa em *Panels* e *Templates* vários módulos de rotinas e recursos gráficos utilizados na modelagem (KELTON et al., 2001). *Panels* agrupam módulos de um mesmo nível de programação. Os *templates* agrupam os *Panels* e possuem diferentes aplicações e estruturas de programação. Os modelos podem ser construídos através da combinação de diferentes módulos de *Panels* e *Templates*. O usuário também pode criar seus próprios módulos, conforme a necessidade das aplicações em estudo.

Além das funcionalidades padrões, (tais como recursos, filas, dentre outros), o Arena disponibiliza módulos direcionados aos aspectos específicos de sistemas de manufatura e de manuseio de materiais (BAPAT et al., 2003). A versão *Standard Edition* modela de modo eficiente sistemas híbridos (contínuo-discretos) através de facilidades pré-construídas de modelamento contínuo.

O Arena possui uma interface gráfica para os usuários que simplifica o processo de construção de modelos (PRADO, 2004). A ferramenta *Input Analyzer* automatiza o processo de definição da distribuição de probabilidade aplicável às variáveis de entrada do sistema, tais como tempo entre chegadas e tempo de atendimento. O *Output Analyzer* possui recursos que permitem analisar estatisticamente os dados coletados durante a simulação e comparar diferentes alternativas de projeto.

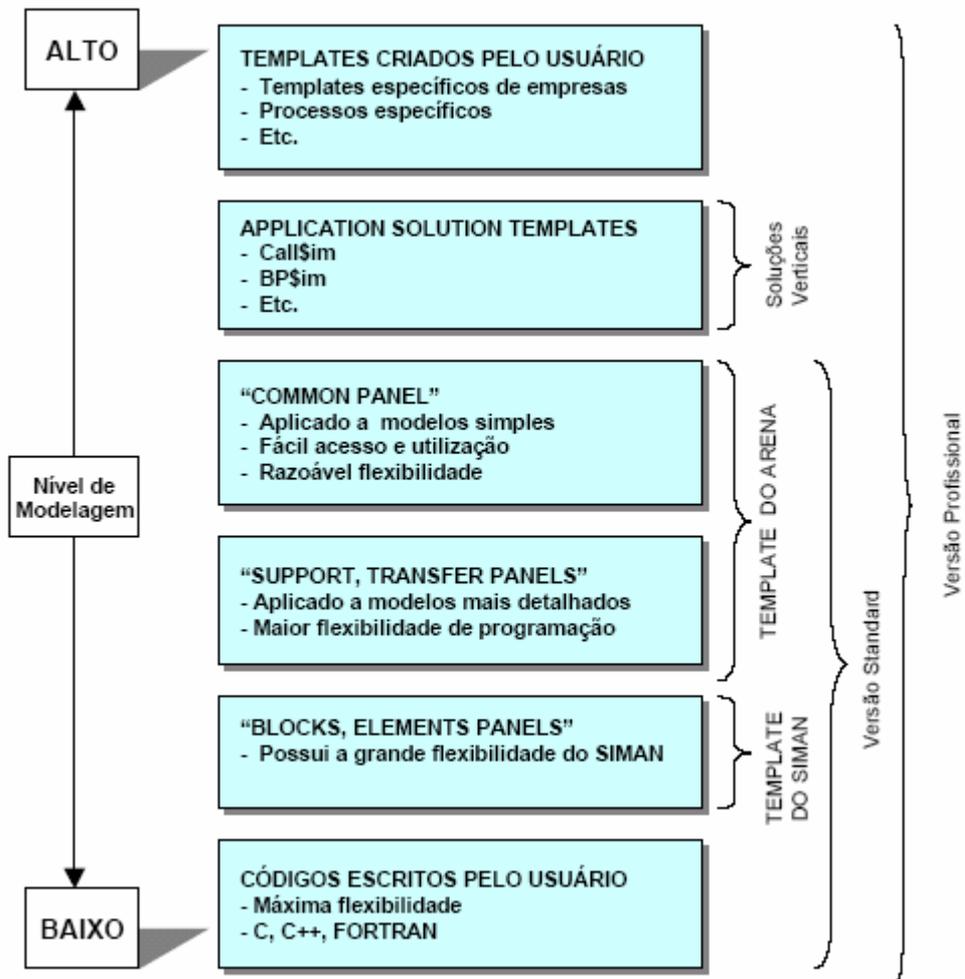


Figura 15 – Estrutura hierárquica do Arena

Fonte: Kelton et al. (2001)

2.2.9.1 Simulação de sistemas contínuos no Arena

Ao se analisar sistemas que envolvem a produção ou manuseio de grandes quantidades de materiais, a abordagem de modelagem contínua é, em geral, a mais

apropriada, de acordo com Kelton et al. (2001). Alguns sistemas podem ser modelados através de conceitos contínuos e discretos, conforme a sua natureza.

Quando um modelo contém um componente contínuo, o Arena aumenta o avanço discreto do tempo, controlado pelo calendário de eventos, com uma lógica capaz de disparar mudanças nas variáveis contínuas ao longo do tempo. Uma vez que o Arena não consegue avançar o tempo de maneira verdadeiramente contínua, mudanças em variáveis contínuas, tais como variáveis de nível, são aproximadas através de uma série de pequenos passos entre eventos discretos, cujo tamanho é definido no módulo contínuo do Arena. A cada uma destas atualizações de tempo contínuas, o Arena calcula novos valores para as variáveis contínuas, através da integração da taxa de variação destas variáveis (KELTON et al., 2001).

A interação entre variáveis contínuas e discretas de um modelo no Arena pode ser implementada através do módulo *Detect*. Segundo Kelton et al. (2001), este módulo define um nível em que, ao ser atingido, uma entidade é criada, na porção discreta do modelo. O instante de tempo em que a entidade será criada é estabelecido a partir da observação do momento em que uma variável contínua ultrapassa o nível anteriormente mencionado.

Em muitos sistemas, a taxa de variação das variáveis contínuas é constante ao longo do tempo ou se altera em pontos discretos do tempo. No entanto, existem sistemas mais complexos, nos quais a taxa de variação muda continuamente com o passar do tempo. Isto ocorre frequentemente em processos que envolvem temperatura e reações químicas. Tais sistemas são modelados utilizando-se equações diferenciais, ou seja, equações matemáticas que envolvem a derivada de uma ou mais variáveis (KELTON et al., 2001). Uma variável representada por x tem sua derivada representada por dx/dt , e define a taxa de variação da variável x com relação ao tempo.

Equações diferenciais podem ser resolvidas através de técnicas numéricas, que aproximam os valores das variáveis contínuas ao longo do tempo. O Arena se utiliza destas técnicas para calcular a variação de uma variável contínua em um dado instante de tempo. Dois métodos são disponibilizados pelo módulo contínuo do Arena para a integração numérica de sistemas contínuos. O método Euler se aplica bem a situações onde a taxa de variação da variável contínua permanece constante, conforme Kelton et al. (2001). Nestes casos, o passo de integração é constante. Em sistemas onde esta taxa se altera, tem-se o método de Runge-Kutta-Fehlberg, em que o tamanho do passo de integração é variável, conforme o comportamento da variável contínua. O objetivo é obter a melhor aproximação possível, sendo que quanto mais variável for o comportamento, menor o passo de integração.

Isto, no entanto, costuma demandar um tempo maior de processamento. De acordo com Bapat et al. (2003), o novo *template Flow Process* torna ainda mais fácil integrar operações que ocorrem em bateladas, associadas a fluidos e materiais em geral.

2.2.10 Aplicações do software Arena

As áreas de aplicação onde o software de simulação Arena tem sido utilizado com sucesso são bastante variadas. O Arena pode ser empregado tanto na tomada de decisões estratégicas, em planejamento de projetos, como no estabelecimento de melhorias operacionais. Seu uso é notadamente reconhecido em setores como atendimento a clientes, manufatura e processos industriais, logística, cadeia de suprimentos, dentre outros (BAPAT et al., 2003).

Observou-se, através de pesquisas bibliográficas, que o uso do Arena se dá, em grande parte, em sistemas de variação discreta no tempo. A seguir, são apresentados alguns dos trabalhos com esta característica nas áreas de logística, controle de estoques, telecomunicações e linha de produção.

Santoro e Moraes (2000) apresentam uma aplicação real abordando o emprego de modelos de simulação para a avaliação do projeto de uma linha de montagem de motores. No desenvolvimento dos modelos foi utilizado o *software* Arena. Para a avaliação da capacidade, foram considerados parâmetros relacionados à variabilidade de operações manuais e disponibilidade de equipamentos. Através da análise dos resultados chegou-se a conclusão que a variabilidade das operações manuais origina uma perda de capacidade de cerca de 6%. Concluiu-se que o tempo destas operações em cada estação de trabalho deveria ser limitado a 90% do tempo de ciclo da linha de montagem, para evitar perda de capacidade. O número de *pallets* utilizados neste processo também foi otimizado, permitindo redução de investimento.

Morais (2001) investiga o comportamento do terminal de produtos siderúrgicos, denominado Porto de Praia Mole, através do qual é escoada grande parte da produção de placas de aço da CST. Neste trabalho, são observados os tempos de permanência dos navios no porto, pois estes influenciam os custos operacionais dos navios e dos próprios terminais portuários. Os tempos de permanência se dividem em tempo de espera por atracação, tempo de navio atracado, operação de embarque ou desembarque. Quando a taxa de congestionamento do porto se eleva, os tempos de espera são maiores, ocorrendo a formação

de filas indesejadas de navios aguardando atendimento. O Terminal de Produtos Siderúrgicos do Porto de Praia Mole foi simulado no ARENA, com a finalidade de conhecer sua performance operacional. Através da comparação de diversos cenários, tais como a modernização de equipamentos, investimentos em infra-estrutura e alterações no regime de trabalho, os parâmetros operacionais do porto foram determinados e analisados em função de seus reflexos nos custos de operação.

Moreira (2001) estuda estratégias de reposição de estoques em supermercados através da simulação. Neste trabalho são avaliadas três modalidades de reposição em supermercados de pequeno e médio porte: reposições baseadas na média de venda do produto no período anterior, reposição feita através da forma clássica, a intervalos fixos e reposições desta mesma forma (intervalos fixos), porém em parceria com fornecedores, através de EDI (*Electronic Data Interchange* - Intercâmbio Eletrônico de Dados) e reposições diárias. Foram coletados os dados de demanda e as modalidades de reposição simuladas através do ARENA, considerando-se as vendas e as reposições. Os modelos de simulação demonstraram que, mesmo para pequenos e médios varejistas, o controle informatizado permite a manutenção de um menor nível de estoque, sem detrimento do nível de atendimento ao cliente.

Wolff (2003) simula, no Arena, uma central de atendimento. As experimentações consideram os intervalos de trabalho, estratégias de roteamento e o aumento do número de chegadas de chamadas por unidade de tempo. Concluiu-se que alterações nos intervalos de trabalho e o aumento do número de chegadas de chamadas afetam os períodos de maior movimentação da central. Após as análises do modelo simulado, este estudo sugere que centrais de atendimento utilizem a simulação como ferramenta para avaliação de melhorias no nível de serviço para um certo nível de recursos, especialmente nos períodos de maior movimentação. A padronização do atendimento também é aconselhada, de modo a diminuir o tempo médio e a variância do serviço dos atendentes.

O presente trabalho tem como objeto de estudo um sistema que difere dos apresentados anteriormente, pois seu estado varia continuamente ao longo do tempo. Em pesquisas bibliográficas, raros foram os trabalhos encontrados na área de siderurgia abordando a simulação de processos contínuos, especialmente sistemas de distribuição de utilidades (água, gases, produção e distribuição de energia elétrica).

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA

Para desenvolver o modelo computacional consonante aos objetivos propostos nesta dissertação, estabeleceram-se algumas etapas as quais apresentam, seqüencialmente, os procedimentos para a construção do modelo em epígrafe, a saber:

1ª Etapa - Aquisição de conhecimento sobre sistemas de produção, gerenciamento da capacidade produtiva e simulação de sistemas:

Nesta etapa, são feitos levantamentos bibliográficos e entrevistas com profissionais das áreas de produção. Tais entrevistas são apoiadas por questionários elaborados conforme o vocabulário técnico utilizado pelos operadores do sistema, o que também se aplica aos itens *b* e *c* a seguir;

2ª Etapa - Identificação e descrição do Sistema de Distribuição de Gás LDG:

São realizadas visitas à área operacional responsável por este sistema, ocasião em que os envolvidos no sistema são entrevistados. Também é elaborado o fluxograma do processo;

3ª Etapa - Identificação e descrição do gerenciamento da capacidade de produção do Sistema de Distribuição de Gás LDG:

À semelhança do item anterior, realizam-se visitas, entrevistas e fluxogramas relativos ao sistema em estudo;

4ª Etapa - Estudo da interação entre o sistema de distribuição de gás LDG, a simulação computacional e o gerenciamento da capacidade, baseando-se nas informações obtidas nos itens anteriores e utilizando-se dos conceitos de simulação computacional como ferramenta de auxílio a este estudo;

5ª Etapa - Modelagem e simulação do Sistema de Distribuição de Gás LDG, que consiste em:

- definição do problema: Uma vez compreendido o sistema em estudo, deve-se definir os objetivos da simulação, o motivo pelo qual o sistema está sendo simulado e a amplitude e profundidade que se quer da análise do sistema;
- identificação das variáveis envolvidas no sistema;
- planejamento do projeto: Esboço do sistema através de gráficos, como fluxogramas e mapofluxogramas, ou por meio de algoritmos (pseudocódigos). O objetivo desta etapa é definir os componentes do sistema e descrever suas variáveis e interações lógicas;
- coleta de dados: Recolhimento de fatos, informações e estatísticas fundamentais a partir de observações, experiências pessoais ou arquivos históricos. A partir destes dados, pode-se fazer um esboço do modelo, ajustando-se o modelo conceitual;
- formulação do modelo: Ajuste estatístico dos dados anteriormente coletados de forma a utilizar métodos randômicos segundo uma distribuição de probabilidades;
- tradução do modelo: Codificação do modelo na linguagem de simulação Arena;
- verificação e validação: Realização de execuções piloto para validar o modelo simulado do sistema de Distribuição de Gás LDG. Se necessário for, pode-se utilizar dados de sistemas semelhantes, sobre os quais se conheça as medidas de desempenho e com o qual o sistema em estudo possa ser comparado. A análise de sensibilidade deve ser utilizada para determinar os fatores de maior impacto sobre as medidas de desempenho. Técnicas de probabilidade e estatística são empregadas para a avaliação da aderência dos dados obtidos na simulação aos obtidos em sistemas reais, utilizados como referência;
- projeto experimental final: Projeto do conjunto de experimentos que produzirá a informação desejada. Deve ser definido como estes testes deverão ser realizados;
- experimentação: Execução das simulações para a geração dos dados desejados e para a realização das análises de sensibilidade;
- interpretação e análise estatística dos resultados: Traçar inferências sobre os resultados alcançados através da simulação;
- comparação de sistemas e identificação das melhores soluções: Identificação das diferenças entre as diversas alternativas de configuração do sistema em estudo;
- documentação: Verificação dos objetivos, hipóteses, parâmetros de entrada, técnicas e métodos adotados, resultados, conclusões e recomendações;
- apresentação e análise dos resultados.

Os resultados obtidos através das simulações realizadas foram analisados no LabMEQA (Laboratório de Métodos Quantitativos Aplicados) da UFPB, e no Laboratório de Tratamento de Minérios da UFMG, sendo que este último trabalha com simulação e otimização de processos.

CAPÍTULO 4 - MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE LDG UTILIZANDO SIMULAÇÃO

Este capítulo apresenta o funcionamento do Sistema de Distribuição de Gás LDG. O sistema é descrito de modo a facilitar o entendimento sobre sua operação. Em seguida, aborda-se a aplicação da técnica de simulação, voltada à criação de um modelo computacional para analisar o desempenho do processo em estudo.

4.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE GÁS LDG

A empresa onde se encontra o sistema em estudo é uma usina siderúrgica integrada que contempla em seu fluxo de produção todas as etapas do processo siderúrgico. Tais etapas compreendem o recebimento de matérias-primas, transformação das mesmas em ferro-gusa e posteriormente em aço, e as fases finais de conformação do aço em placas e bobinas. No anexo I, é apresentado o fluxograma geral do processo de produção do aço.

A política da qualidade desta empresa visa:

Desenvolver continuamente ações que conduzam à ampliação de sua liderança como fornecedor preferencial de semi-acabados de aço para o mercado mundial e à liderança como fornecedor preferencial de laminados planos de aço para o mercado regional, contribuindo para o aumento da competitividade de seus clientes, em harmonia com os interesses dos acionistas, empregados, fornecedores, financiadores e comunidades (CST, 2004a).

Dentre os princípios básicos seguidos pela empresa para que a política da qualidade seja de fato praticada, encontra-se a promoção da sustentabilidade dos negócios da empresa. A empresa tem como prioridades o desenvolvimento sustentável da sociedade e o respeito ao meio-ambiente. Seu Sistema de Gestão Ambiental busca estabelecer melhorias em seu processo, que diminuam os impactos ambientais. Desta forma, adota como prática gerencial o uso eficiente dos recursos naturais, a redução de emissões atmosféricas e lançamentos hídricos e a recirculação de resíduos industriais (CST, 2004a).

O presente capítulo apresenta uma visão geral do processo de distribuição do gás LDG (gás de aciaria), que é recuperado a partir da produção do aço e convertido em geração de energia elétrica nas centrais termoelétricas da CST.

4.1.1 Importância do reaproveitamento do gás LDG

Aliada a sua estratégia de comprometimento com o desenvolvimento sustentável, a CST utiliza-se de tecnologias limpas, contribuindo para a redução mundial de emissão de dióxido de carbono (CO₂) e, conseqüentemente, para a diminuição do efeito estufa na atmosfera (CST, 2004a).

A partir dos gases resultantes do funcionamento da Coqueria (COG - *Coke Oven Gas*), dos Altos-Fornos (BFG - *Blast Furnace Gas*) e da Aciaria (LDG – *Linz-Donawitz Gas*), a usina produz energia em suas centrais termoelétricas. Desta forma, evita-se a exploração de recursos naturais utilizados em hidrelétricas e termoelétricas.

O projeto "Otimização e Co-geração de Energia Elétrica", desenvolvido em 2004 pela CST, se insere entre seus esforços na busca pela excelência em eficiência energética. Este projeto inclui a otimização da operação de equipamentos elétricos e a implantação do sistema de recuperação do gás de Aciaria, também conhecido como LDG (*Linz-Donawitz Gas*). A recuperação do gás LDG permitiu a implantação da quarta central termoelétrica (CTE 4), contribuindo para um aumento na geração elétrica de 75 MW de potência e abrindo a perspectiva de redução das emissões de CO₂ em cerca de 330 mil toneladas em sete anos, contados a partir de 2004 (CST, 2004a).

Através do aumento no índice de aproveitamento dos gases industriais para a geração de energia elétrica, a CST garantiu sua auto-suficiência energética, melhoria das condições ambientais e redução de custos operacionais. A CST possui autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para comercialização de sua energia elétrica excedente no sistema energético nacional, o que proporciona uma receita adicional.

4.1.2 Objetivo do sistema de distribuição de LDG

O sistema de distribuição de gás LDG foi implantado na CST com o objetivo de manter o equilíbrio energético da usina após o aumento do volume de produção de aço de 4,5

Mt/ano para 5,0 Mt/ano, e do início da operação do laminador de tiras a quente (LTQ). Anteriormente, o gás LDG, gerado na aciaria, passava por um sistema de lavagem de gases e era eliminado através de chaminés.

A quarta central termoeletrica (CTE 4) foi projetada para ser o consumidor majoritário do gás LDG recuperado. Com uma capacidade instalada de 75 MW de potência, a CTE 4 elevou a geração elétrica da CST para 302 MW. Desta forma, foi possível garantir a auto-suficiência energética da usina, apesar da elevação do consumo causado pela expansão da produção e da entrada em operação do LTQ.

4.1.3 Recuperação do gás LDG na Aciaria

A etapa de produção do aço ocorre na área de Aciaria. É nos convertedores da aciaria que a carga metálica (composta por ferro gusa, sucata e minérios fundentes) passa pelo processo de injeção de oxigênio através de uma lança, conforme Figura 16. A partir desta injeção, também conhecida como sopro de oxigênio, ocorre a oxidação do carbono presente na carga metálica e a geração do gás LDG.

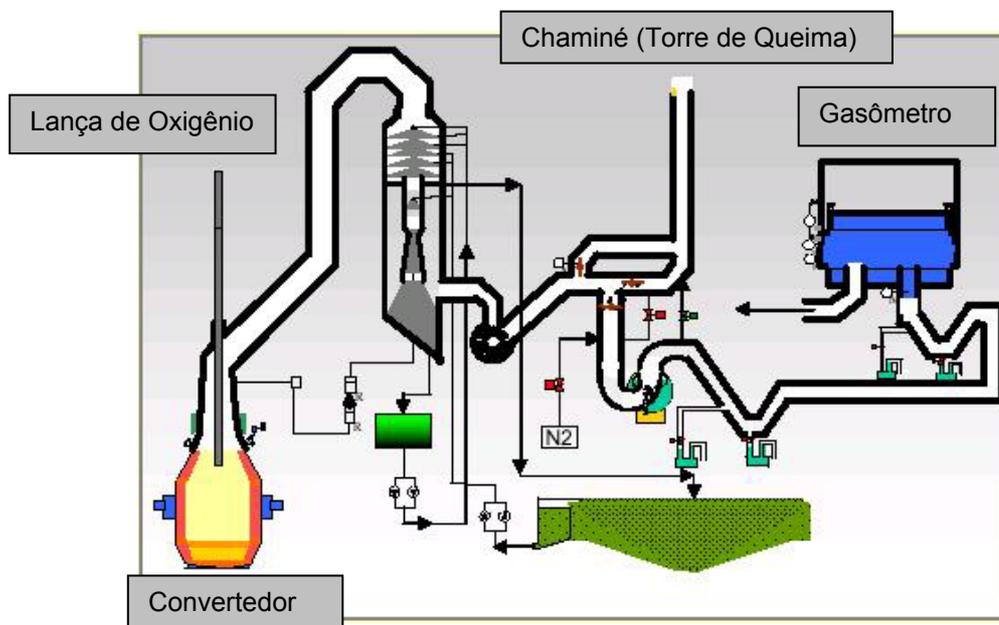


Figura 16 – Sistema de Recuperação do gás LDG na Aciaria
Fonte: CST, (2004a).

O gás gerado nos convertedores é succionado pelo ventilador induzido, também conhecido como IDF (*Induced Draft Fan*), passando pelo sistema de resfriamento, lavagem e separação de pó, como mostrado na Figura 17. A qualidade do gás é monitorada através de analisadores que indicam continuamente a composição química do gás.

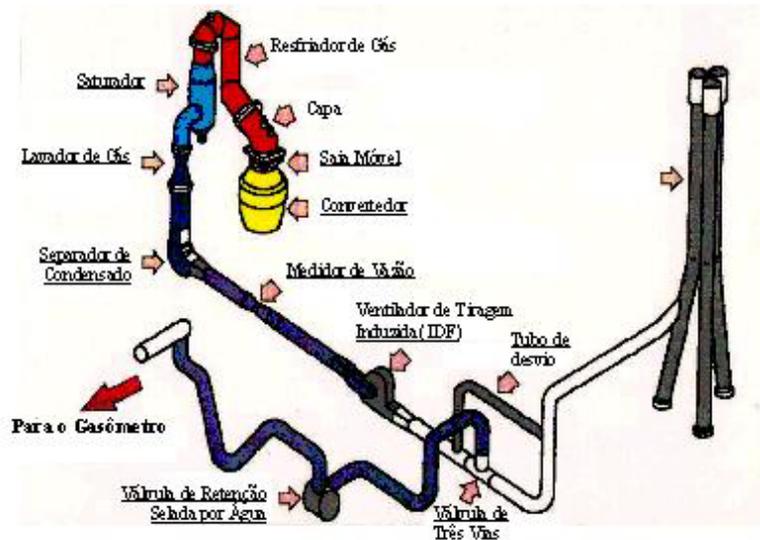


Figura 17 – Diagrama esquemático do Sistema de Recuperação do gás LDG na Aciaria
Fonte: CST, (2004a).

O gás LDG é composto por:

- monóxido de carbono - CO – 71,6 % ;
- dióxido de carbono – CO₂ 12,6;
- nitrogênio– N₂ – 14,6;
- outros componentes – 1,2.

O poder calorífico inferior de um gás mede a sua capacidade de geração de energia em Kcal por unidade normalizada de volume. Devido à alta concentração de CO em sua composição, o LDG possui elevado poder calorífico inferior (PCI). Esta característica possibilita a utilização deste gás para a geração de energia elétrica. O PCI do LDG é próximo de 2.000 Kcal/Nm³.

A Figura 18 apresenta as fases da etapa de sopro de uma corrida no convertedor. Antes da fase de sopro, tem-se a fase de carregamento do convertedor com carga metálica e, após o sopro, ocorre o vazamento total do aço produzido. Após o início do sopro e durante toda a sua duração, o gás LDG é produzido.

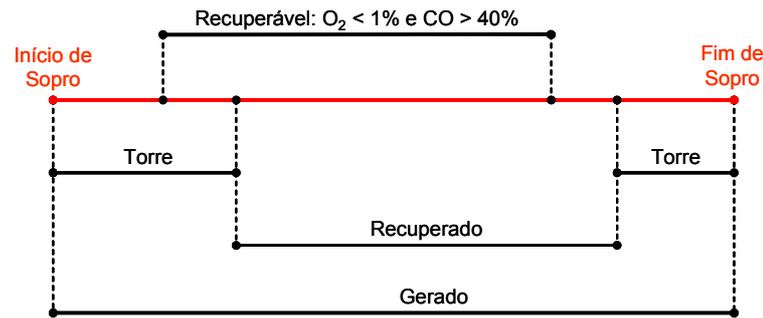


Figura 18 – Diagrama esquemático das fases do sopro em uma corrida na Aciaria
 Fonte: CST, (2004a).

A composição do LDG varia ao longo da etapa de sopro de uma corrida, conforme a Figura 19. Enquanto a concentração de oxigênio for superior a 1% e a de monóxido de carbono inferior a 40%, o gás é direcionado para a torre de queima. Caso contrário, o LDG atinge a qualidade requerida para consumo, sendo enviado através da válvula de três vias para o gasômetro. Na prática, a recuperação do gás ocorre entre o segundo e o décimo quinto minutos do sopro, que dura em média 16 minutos. Caso haja algum problema no sistema de recuperação, o gás é desviado para a torre de queima (CST, 2004b).

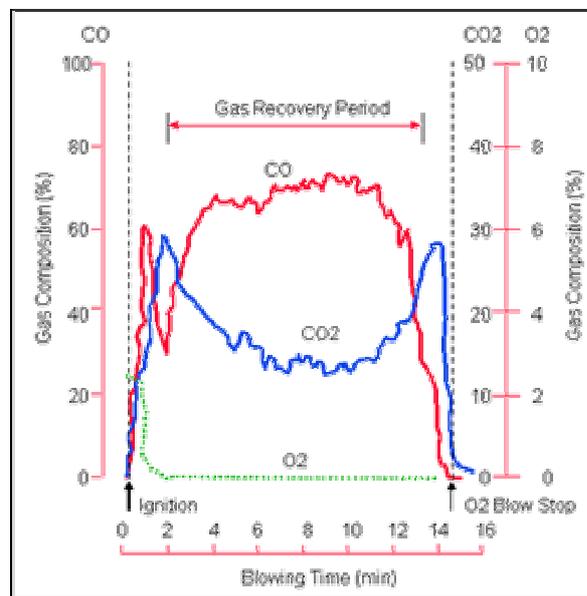


Figura 19 – Variação da composição química do LDG durante o período de sopro de O2
 Fonte: CST, (2004a).

É importante observar que, atualmente, existem dois convertedores na Aciaria. Os sopros de oxigênio ocorrem em períodos alternados em cada convertedor. Como o LDG é produzido a cada corrida dos convertedores, a produção do gás não é contínua ao longo de todo o tempo. A Figura 20 mostra o comportamento típico da geração de LDG nos dois

convertedores. Nesta figura, as linhas em preto e vermelho representam a vazão de LDG gerada nos instantes de recuperação deste gás na aciaria, nos convertedores um e dois respectivamente. Pode-se perceber também os instantes em que o gás é enviado para queima na torre, por não ter atingido a qualidade requerida para consumo. Esta queima também pode ocorrer por falta de espaço para o gás recuperado ser armazenado no gasômetro.

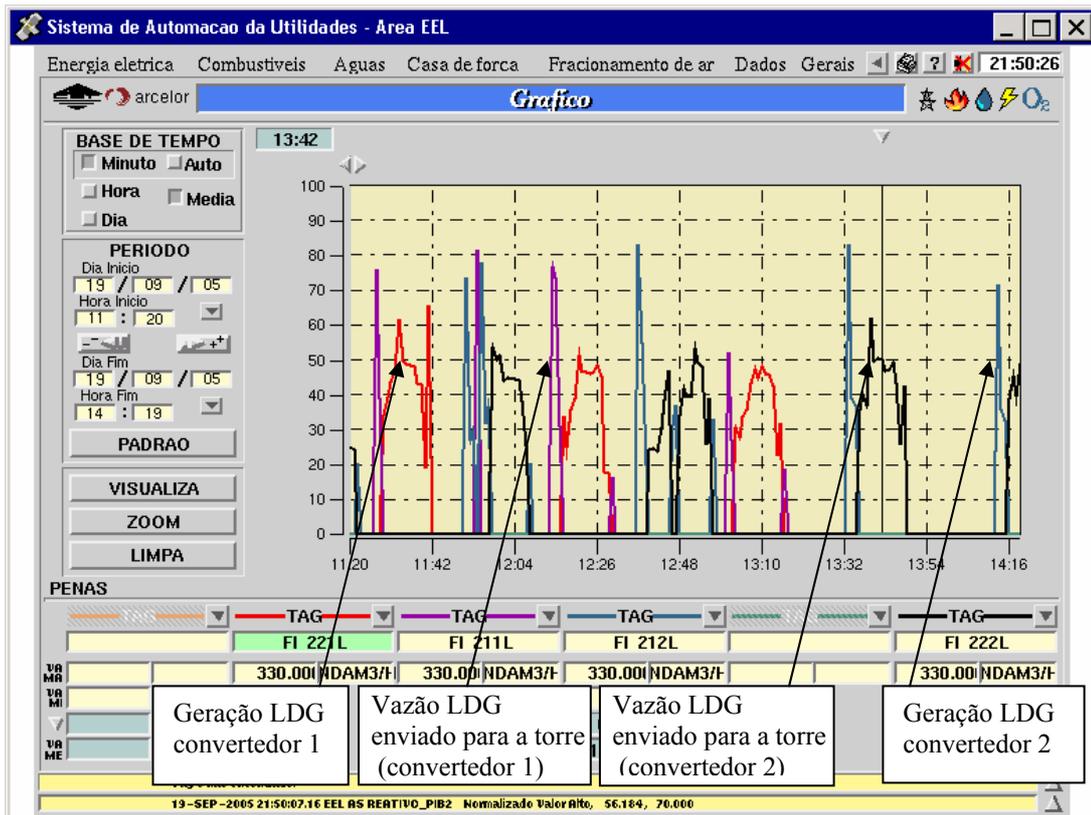


Figura 20 – Comportamento da geração de LDG na Aciaria
Fonte: CST, (2004a).

Em média, pode-se aproximar a recuperação do LDG por um gráfico como o apresentado na figura 21. Neste gráfico, é apresentada a previsão dos próximos instantes em que ocorrerá geração de LDG na Aciaria (após a linha tracejada em azul). Esta informação é disponibilizada pela Aciaria para a área consumidora, que controla o nível do gasômetro e o consumo do gás LDG.

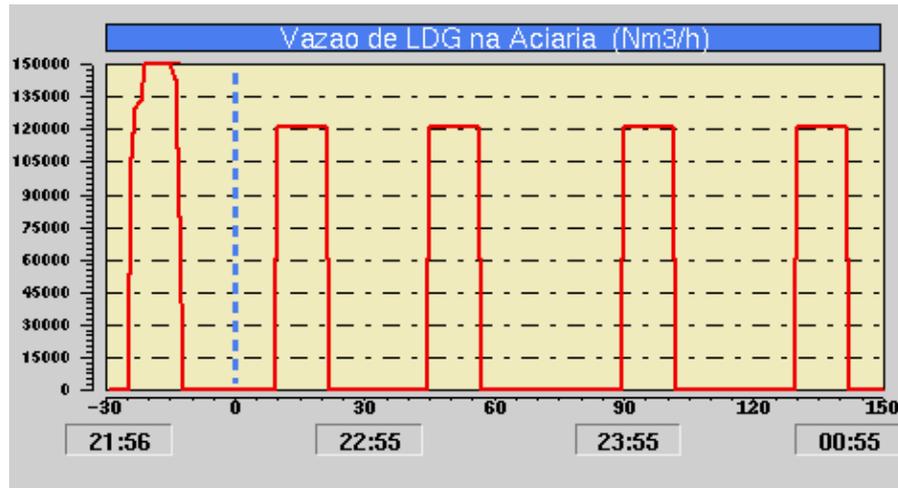


Figura 21 – Previsão do comportamento da geração de LDG

Fonte: CST, (2004a).

Na Figura 22 são apresentados os parâmetros considerados no projeto do sistema de recuperação do gás LDG (CST, 2004b).

Tamanho da corrida	315 t/corrída
Tempo de recuperação de LDG	12 a 13 minutos
Tempo <i>tap-to-tap</i> (intervalo entre corridas)	40 minutos
Vazão de sopro de oxigênio	66.000 Nm ³ /h
Vazão de LDG recuperado em média	122.000 Nm ³ /h (média)
Vazão de LDG recuperado	192.000 Nm ³ /h (máximo)
Fator de combustão	0,1
Corridas por dia na Aciaria	44 (máximo 54) fase atual 68 (máximo 80) fase 7,5 Mt/ano
Corridas por hora na Aciaria	Em média 3 corridas
LDG recuperado	90 Nm ³ /t de aço líquido
Poder calorífico inferior do LDG	2.000 kcal/Nm ³
Temperatura máxima do LDG na entrada do gasômetro	70° C
Umidade do gás	100% (saturado)
Pressão de trabalho do gasômetro	200 mmH ₂ O
Pressão de LDG para consumo	Entre 750 a 1100 mmH ₂ O
Consumo de LDG - Vazão média na saída do gasômetro = consumo de LDG na CTE 4 + Injeção no BFG	70.000 Nm ³ /h
Consumo do LDG pela CTE 4	Em média 40.000 Nm ³ /h
Consumo do LDG – injeção na tubulação de BFG	Em média 30.000 Nm ³ /h
Volume máximo gasômetro	75.000 Nm ³
Volume mínimo gasômetro	10.000 Nm ³

Figura 22 – Dados de projeto do sistema de recuperação de LDG

Fonte: CST, (2004a).

Dentre os parâmetros apresentados, destacam-se o tempo de duração da recuperação de LDG, a vazão média de geração deste gás e as vazões de envio de LDG através do *booster* e do consumo deste gás pela CTE 4 e pela da tubulação de BFG. Tais parâmetros são fundamentais, pois representam o comportamento da geração e consumo do gás. Além destes, os limites operacionais de capacidade do gasômetro máximo e mínimo, 75.000 Nm^3 e 10.000 Nm^3 respectivamente, também são fundamentais, pois determinam se poderá ou não ocorrer o envio de LDG para o gasômetro e para os consumidores.

4.1.4 Operação do sistema de distribuição de LDG

O LDG recuperado é armazenado no gasômetro de LDG, localizado na área de Utilidades, de onde é enviado para as centrais termoelétricas. O gasômetro, além de armazenar o gás, mantém constante a pressão nas tubulações de entrada e saída. Após o gasômetro, a pressão do LDG é elevada através de compressores (*boosters*), passando de $200 \text{ mmH}_2\text{O}$ para $1100 \text{ mmH}_2\text{O}$, o que permite a sua distribuição. O principal consumidor do LDG é a CTE 4, sendo que todas as centrais termoelétricas (CTE's 1, 2, 3 e 4) também o consomem, misturado ao gás de alto-forno (BFG), como se pode observar na figura 23. Cada CTE é constituída por um conjunto formado por caldeira, turbina e gerador.

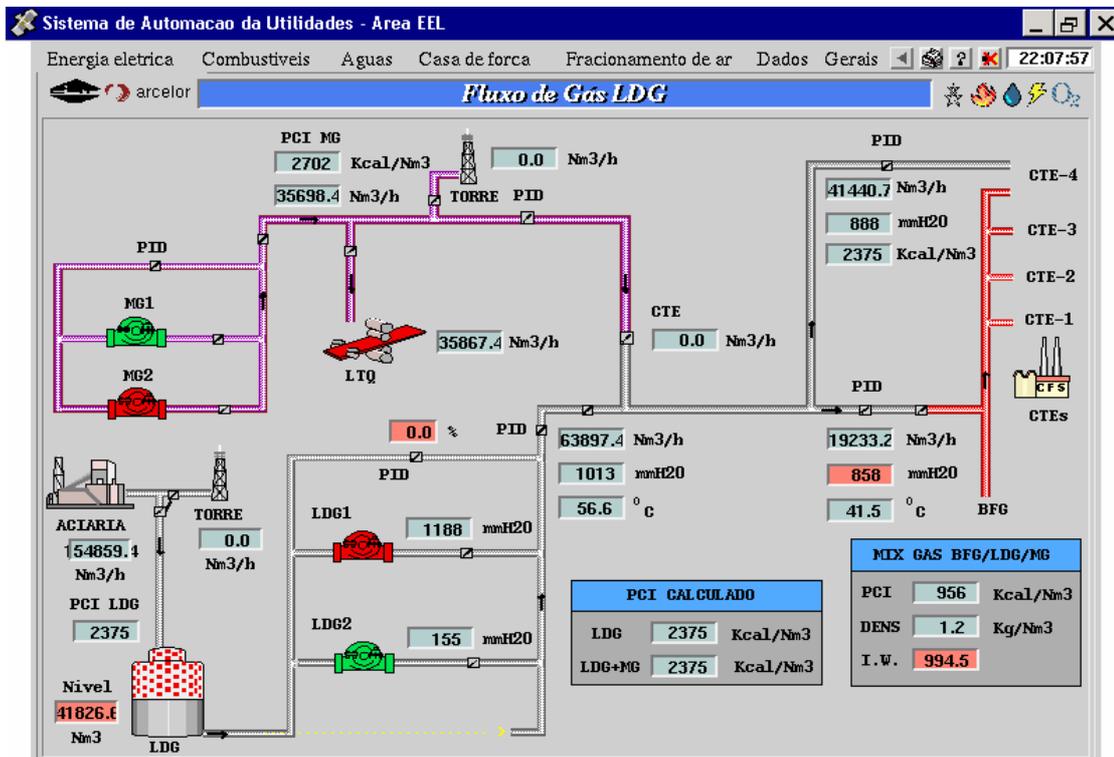


Figura 23 – Sinótico do Sistema de Distribuição de LDG
Fonte: CST, (2004a).

A Aciaria abastece o gasômetro em intervalos de tempo específicos, quando ocorre produção de aço. No entanto, o consumo do gás de aciaria pela CTE 4 deve se comportar preferencialmente de modo constante, uma vez que a caldeira não suporta variações bruscas no volume recebido de gás combustível. Vê-se, então, que se tem uma situação de consumo constante e fornecimento intermitente.

A vazão de geração por unidade de tempo em que ocorre recuperação do gás é superior à vazão máxima distribuída pelos compressores *booster* ao longo de todo o tempo. Desta forma, o gasômetro tem a importante função de absorver o que excede o consumo nos períodos de recuperação de LDG, funcionando como uma reserva para quando se tem apenas consumo do gás. Na Figura 24, pode-se observar o comportamento real do nível do gasômetro, que varia conforme a geração e o consumo do LDG.

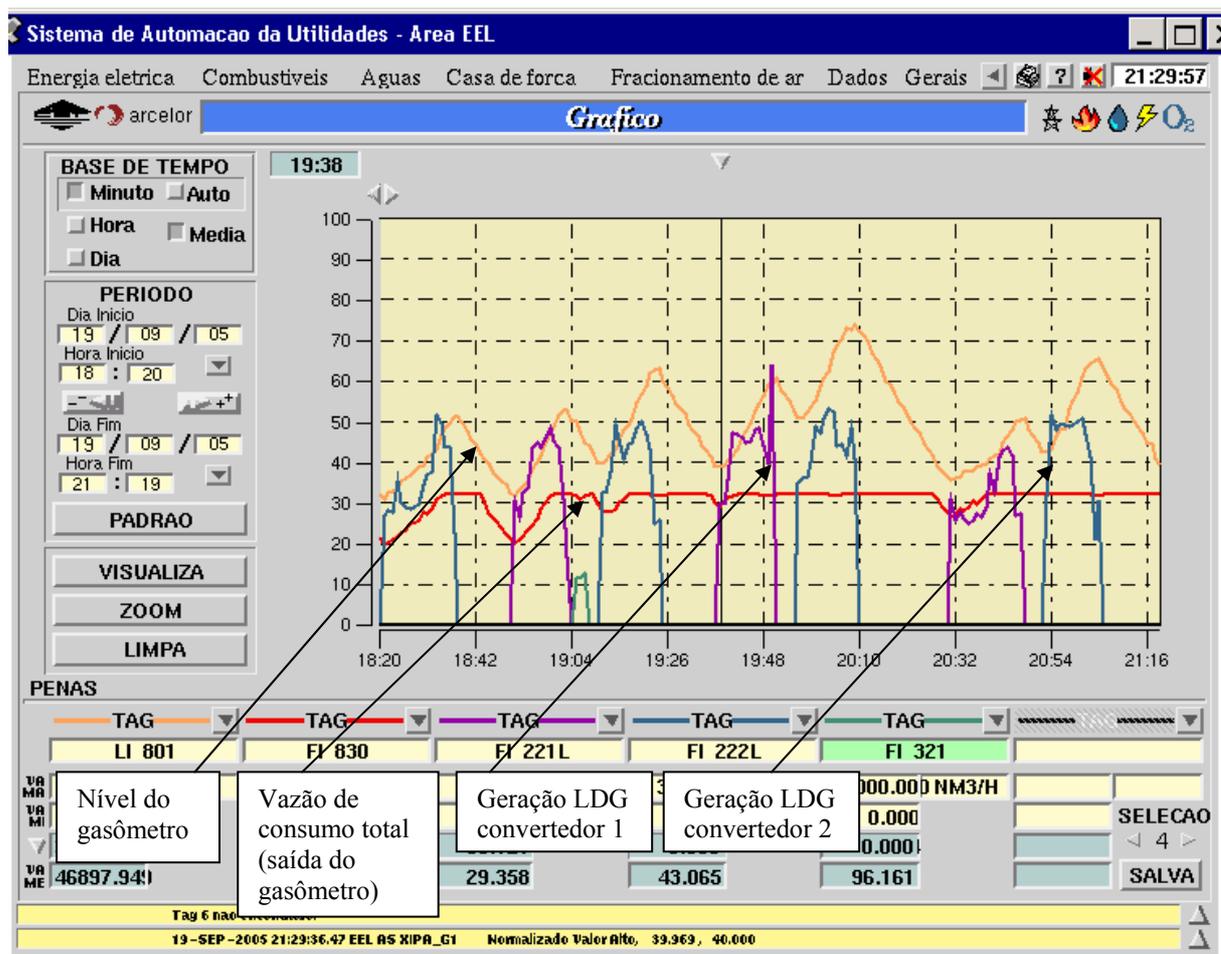


Figura 24 – Histórico das variáveis do Sistema de Distribuição de LDG

Fonte: CST, (2004a).

Percebe-se, através da Figura 24, que nos períodos em que ocorre geração de LDG, o nível de ocupação do gasômetro tende a aumentar, visto que a vazão de geração do

gás é superior a de seu consumo. Porém, nos instantes de ausência de geração, a ocupação do gasômetro é reduzida, pois se tem apenas o consumo de LDG.

O gasômetro, por sua vez, possui sua própria limitação. O volume máximo e mínimo de gás armazenável é de 75.000 Nm³ e 10.000 Nm³ respectivamente, assim definidos por medidas de segurança operacional. Desta forma, independentemente da situação de consumo da CTE 4, o gasômetro possui capacidade fixa. Daí a necessidade de se injetar os excessos e flutuações bruscas de geração de LDG na tubulação de BFG. A tubulação de BFG abastece as quatro centrais termoelétricas com gás de alto-forno e também absorve o LDG enviado pelos *boosters* que excede o consumo da quarta CTE. Com isto, consegue-se recuperar ao máximo o LDG produzido. Com esta solução, evita-se a necessidade de realização periódica de manobras para a inserção ou remoção de combustível na caldeira 4, em períodos curtos de tempo, conforme a variação da produção do LDG e os níveis mínimo e máximo de armazenamento do gasômetro. A realização periódica destas manobras representaria um fator de risco de desarme das CTE's e, conseqüentemente, de perda de geração de energia elétrica para a usina, com possibilidade de parada das áreas de produção (SIQUEIRA et al., 2004).

4.1.5 Estudo de caso: sistema de distribuição de LDG

O estudo de caso desta dissertação se baseia no Sistema de Distribuição de LDG previamente descrito. Como se pode constatar, trata-se de um sistema cujo valor das variáveis se altera continuamente no tempo e cujo comportamento apresenta-se dinâmico e complexo. A tomada de decisão referente ao aperfeiçoamento e evolução de sistemas desta natureza exige uma análise elaborada. Decisões baseadas apenas na experiência operacional podem negligenciar aspectos fundamentais ao desempenho do processo. Outro fator que dificulta a tomada de decisão sobre o processo em estudo é o fato de ser este um sistema que funciona ininterruptamente, exceto por motivo de falha ou parada programada. Desta forma, a realização de testes com o sistema se torna inviável.

O atual cenário da siderúrgica na qual funciona este sistema é de constantes expansões em todas as áreas de produção. Neste caso, o uso de ferramentas de auxílio à tomada de decisão se torna de grande valia. Scarpe (1990) analisou, através da simulação computacional, o desempenho operacional de um sistema de produção de aço devido à

possibilidade de evolução do sub-processo de lingotamento (conformação do aço em placas), de convencional para lingotamento contínuo. Franzese et. al (2005) utilizaram um modelo de simulação para a avaliação de cenários de produção e operação, devido à expansão de uma planta de produção de aço e de um sistema de correias transportadoras de matérias-primas.

A proposta deste trabalho é a construção de uma ferramenta computacional que permita a análise virtual da configuração atual e de futuros cenários do sistema de distribuição de gás LDG, respaldada por uma base estatística de dados. Desta forma, busca-se tornar mais ágil e segura a tomada de decisões, sem a necessidade de interferências no processo. Para a construção da ferramenta, será utilizada a versão estudante do pacote de simulação Arena.

4.2 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO

Neste item, é apresentado o desenvolvimento do estudo de caso, cujas principais etapas são a coleta e tratamento de dados, construção e validação do modelo de simulação.

4.2.1 Planejamento do estudo

Os passos adotados no desenvolvimento do trabalho basearam-se nos estudos de Law e Kelton (1991), tal como exposto no item 2.1.10 deste texto.

Decidiu-se pela utilização de um *software* de simulação de eventos discretos para a construção de um simulador capaz de analisar o desempenho do sistema de distribuição de LDG. A análise do desempenho foi feita a partir da avaliação do índice de aproveitamento de gás LDG, tanto na configuração atual quanto em possíveis alterações futuras, tais como variações nos níveis de geração e demanda de gás.

4.3 DEFINIÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

Após o planejamento do estudo, o processo de distribuição de LDG foi avaliado, o que incluiu longos períodos de observação da operação e comportamento do processo real,

entrevistas com especialistas e operadores do sistema e consulta a documentos relativos ao processo, tais como padrões de operação e especificações técnicas de engenharia. Este estudo propiciou a elaboração de um modelo conceitual do sistema, conforme apresentado no fluxograma simplificado da Figura 25.

Para a construção do modelo conceitual e computacional, foi utilizada a abordagem de se partir de configurações simples e, progressivamente, chegar a modelos mais completos. Contudo, procurou-se considerar nos modelos aquilo que era realmente pertinente ao escopo definido e essencial ao alcance dos objetivos deste trabalho. Modelos muito complexos podem acrescentar apenas esforço computacional, enquanto modelos muito simples podem não representar adequadamente o sistema (GAVIRA, 2003).

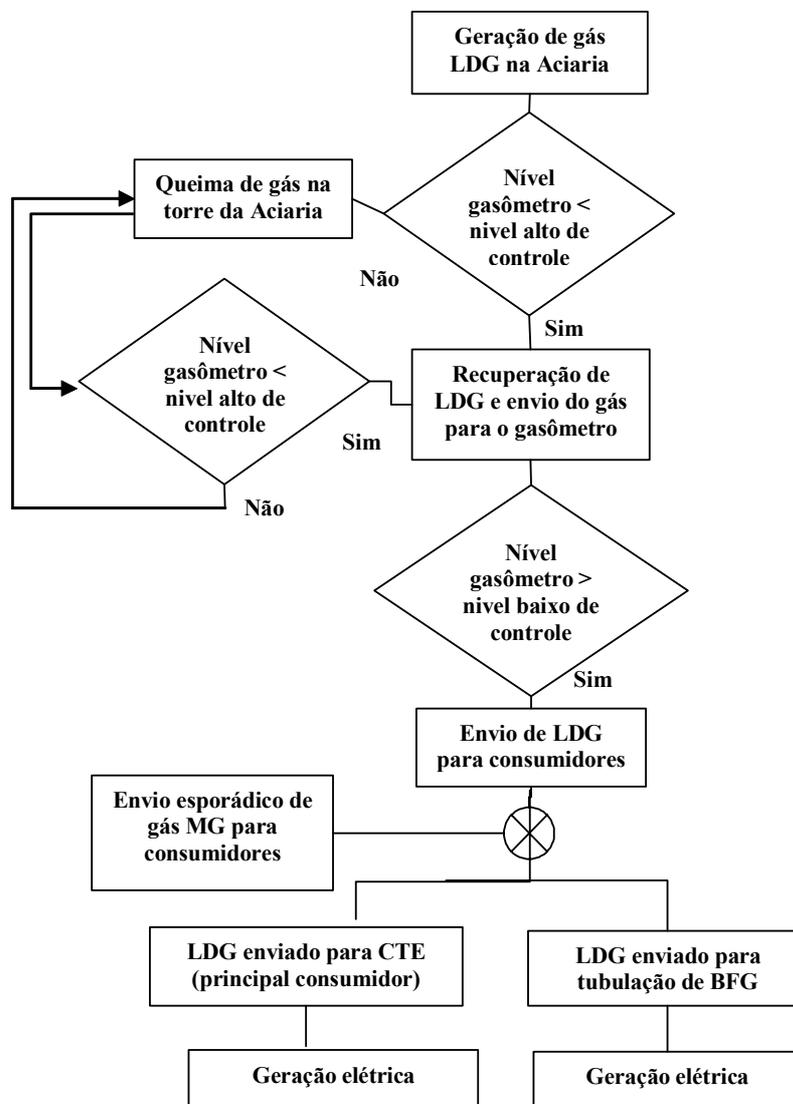


Figura 25 – Fluxograma do Sistema de recuperação e distribuição de LDG

Fonte: Garvin (2003, p.).

A validação do modelo conceitual foi feita através de uma avaliação detalhada, em conjunto com especialistas do sistema. O objetivo foi verificar as suposições feitas, de modo a garantir a veracidade do modelo. Esta etapa foi fundamental para a continuidade do projeto, uma vez que o sistema é regido por algumas expressões que são determinantes para o seu funcionamento. Tais expressões são embutidas nas malhas de controle do sistema, e devem ser representadas no modelo da forma mais fiel possível à realidade, de maneira a garantir a validade do mesmo.

A equação 3 constitui a principal regra de controle do sistema, que determina a vazão visada de envio de gás LDG do gasômetro para os consumidores. Com isto, o sistema de controle visa manter o nível de LDG no gasômetro de forma a minimizar a ocorrência de perdas de recuperação de gás por volume alto ou a falta de gás para envio contínuo para a CTE 4, principal consumidor do gás.

$$Q_{visada} = k_1 * k_2 * Q_{média} \quad (3)$$

$$k_1 = \text{fator de segurança}$$

$$k_2 = \text{fator de controle de nível do gasômetro}$$

$$k_2 = 1 + \text{desvio}(\text{nível visado do gasômetro; nível medido do gasômetro})$$

Além da equação de controle de vazão visada de envio de gás para os consumidores, foram considerados também os limites operacionais máximo e mínimo de capacidade do gasômetro, as vazões de operação do *booster* (equipamento de elevação da pressão do gás para envio aos consumidores) e a taxa máxima de absorção do gás LDG pela tubulação de gás BFG. Outro item de modelagem foi o fator de conversão da unidade de medição normalizada de vazão de gás (Nm³) para m³, uma vez que o nível do gasômetro é monitorado pelo volume ocupado em metros cúbicos (m³). Também foi detectada a necessidade de equacionar no modelo a variação máxima permitida para a taxa de envio de gás para os consumidores.

4.4 COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

A etapa de coleta e tratamento de dados começou logo após as definições iniciais do modelo conceitual. A coleta de dados se baseou nas informações dos sistemas de

automação dos processos de distribuição e geração do gás LDG. Os dados coletados nesta fase se referem aos anos de 2006 e 2007. Estes dados foram tratados e analisados estatisticamente com o auxílio da ferramenta Input Analyzer, do pacote Arena versão estudante.

Segundo Freitas (2001), para que o modelo possa se comportar de maneira semelhante ao sistema real, é fundamental que se modele o comportamento estocástico da maioria dos sistemas. Ainda segundo este autor, isto é obtido através da utilização das distribuições de probabilidades, empíricas ou teóricas, capazes de reproduzir eventos aleatórios. Desta forma, alguns procedimentos foram adotados para que os resultados obtidos fossem tão precisos quanto possíveis.

A frequência da coleta de dados foi de minuto a minuto, uma vez que esta era a menor frequência na qual os dados estavam disponíveis. Optou-se por fazer duas coletas, cada uma por um período de um mês, espaçadas por doze meses. Desta forma, foi possível observar a tendência de aumento de geração de gás. Na tabela 1 é evidenciado o aumento de produção e distribuição do gás. No entanto, o aumento da geração ocorre em proporção maior que o do consumo, o que fica comprovado pelo acréscimo da perda do gás. Esta tendência, conforme especialistas da Aciaria, tende a permanecer, devido aos projetos de expansão na área de produção de aço.

Tabela 1 – Parâmetros de geração e consumo de LDG nos meses de julho de 2006 e agosto de 2007

Parâmetros do Sistema de Distribuição	Julho/2006	Agosto/2007
Volume Médio de Geração de Gás por minuto (Nm³/min)	2351.50	2477.10
Volume Total de LDG consumido (Nm³)	35166681.91	40385398.16
Perda de LDG por corrida (Nm³)	4539.19	5323.29

Após a coleta, seguiu-se a eliminação de dados espúrios, tais como valores negativos. Estes dados provêm de possíveis erros, em instantes específicos e esporádicos, no mecanismo de aquisição e armazenamento de dados dos sistemas de automação, ocasionando a presença de valores fora da realidade do comportamento normal dos processos. Em seguida, passou-se à determinação das distribuições de probabilidade que melhor representassem o processo de geração do gás LDG. Para tanto, pode-se utilizar critérios visuais, experiência do modelador e considerações teóricas (Carvalho, 2003). Através do Input Analyzer, foram

identificadas as curvas que mais se assemelhavam ao perfil de volume e período de duração da recuperação de gás, bem como ao intervalo entre as ocorrências destas recuperações. Para isto, foram considerados os resultados dos testes de aderência das distribuições encontradas pelo *software*.

Nas Figuras 26, 27 e 28, observa-se o resultado obtido para os dados coletados em agosto de 2007. São apresentados os histogramas dos dados reais e as curvas de distribuição mais adequadas, assim como os resultados dos testes de aderência e o p-valor correspondente. Segundo Freitas (2001), para valores de p inferiores a 0,05, não se aconselha confiar nos resultados do ajuste obtido. De acordo com Morettin (2006), p-valores menores que 0,05 indicam que devemos rejeitar a hipótese nula de que a distribuição encontrada é representativa dos dados coletados. Para p-valores maiores que 0,10, pode-se dizer não somente que não se pode rejeitar a hipótese nula como também que a distribuição teórica proposta é confiável.

Na Figura 26 é apresentado o histograma referente ao comportamento do volume de geração de gás LDG produzido por corrida. Vê-se que a curva aproximada obtida é uma normal, sendo que o resultado obtido para o p-valor é maior do que 0.15 , ou seja, a distribuição teórica proposta é confiável.

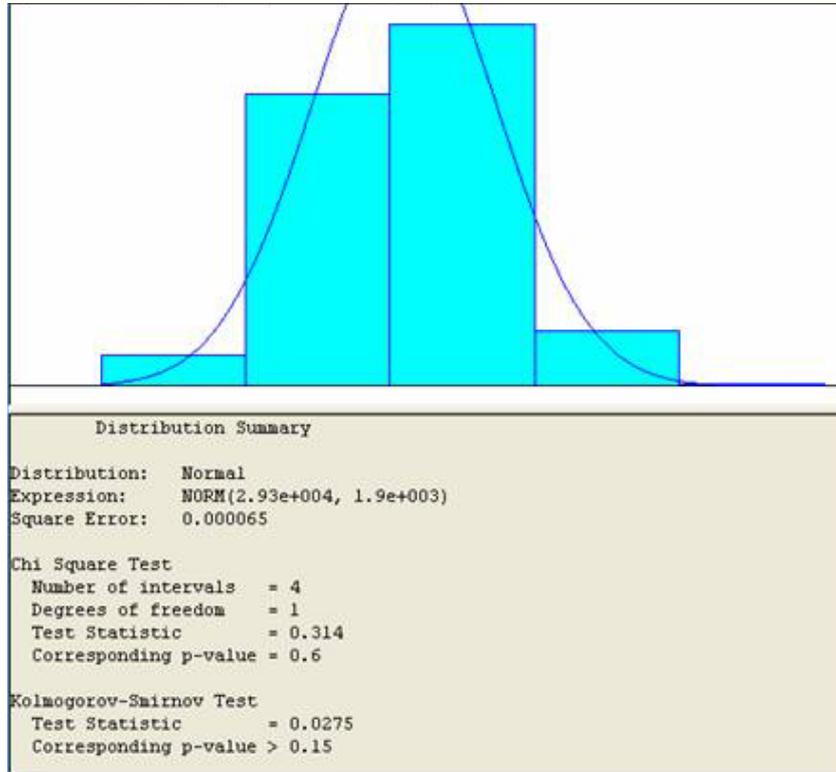


Figura 26 – Análise da distribuição de probabilidade para o volume de gás produzido por corrida

Na Figura 27 é apresentada a análise da distribuição de probabilidade encontrada para o comportamento do período de duração da geração de gás LDG a cada corrida ou evento de produção de aço. Para a curva aproximada obtida o p-valor correspondente é igual a 0.511, o que indica que a distribuição proposta é confiável.

Na Figura 28 é apresentado o histograma referente ao comportamento do tempo entre os períodos de geração de gás LDG ou períodos entre corridas. A análise da curva aproximada obtida apresenta um p-valor de 0.174 , sinalizando que a distribuição teórica proposta é confiável.

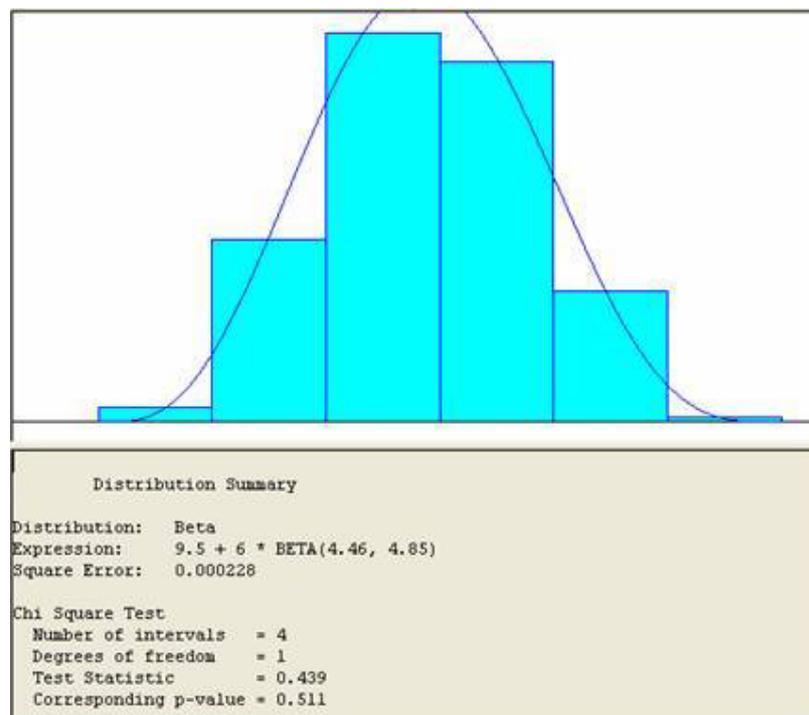


Figura 27 – Análise da distribuição de probabilidade do período de geração de gás por corrida

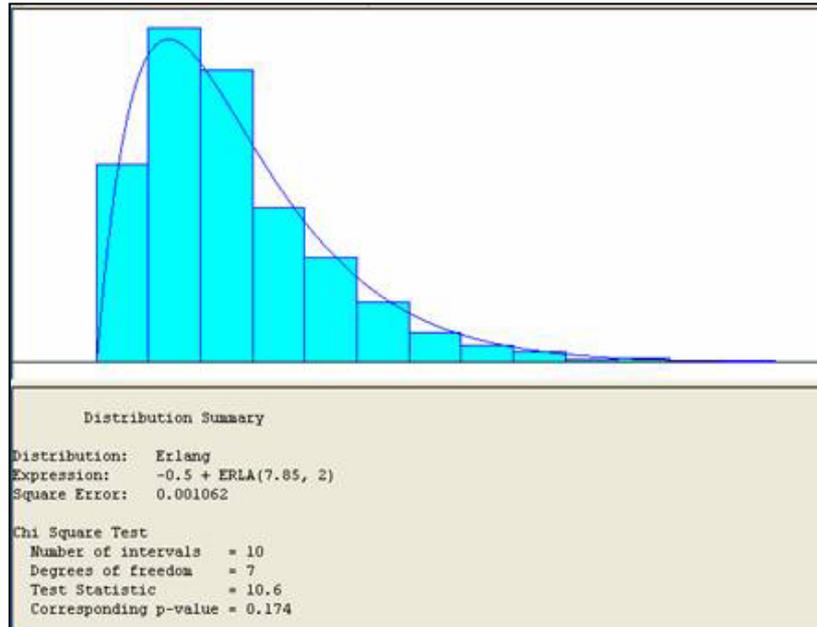


Figura 28 – Análise da distribuição de probabilidade para tempos entre corridas

Este mesmo procedimento foi adotado para os dados de julho de 2006, de onde se pode verificar, comparando-se com dados de agosto de 2007, uma tendência de crescimento no volume de geração de gás, com o passar do tempo. Para este período, no entanto, não houve boa aderência dos dados reais aos modelos teóricos conhecidos. De acordo com Freitas (2001), nestes casos, pode-se adotar uma distribuição empírica baseada nos dados amostrais. O histograma gerado, para esta situação, contempla as frequências originais e acumuladas. A figura 29 traz a distribuição empírica encontrada para o volume de geração de gás. Na Tabela 2 estão resumidas todas as distribuições encontradas para os dois períodos de observação.

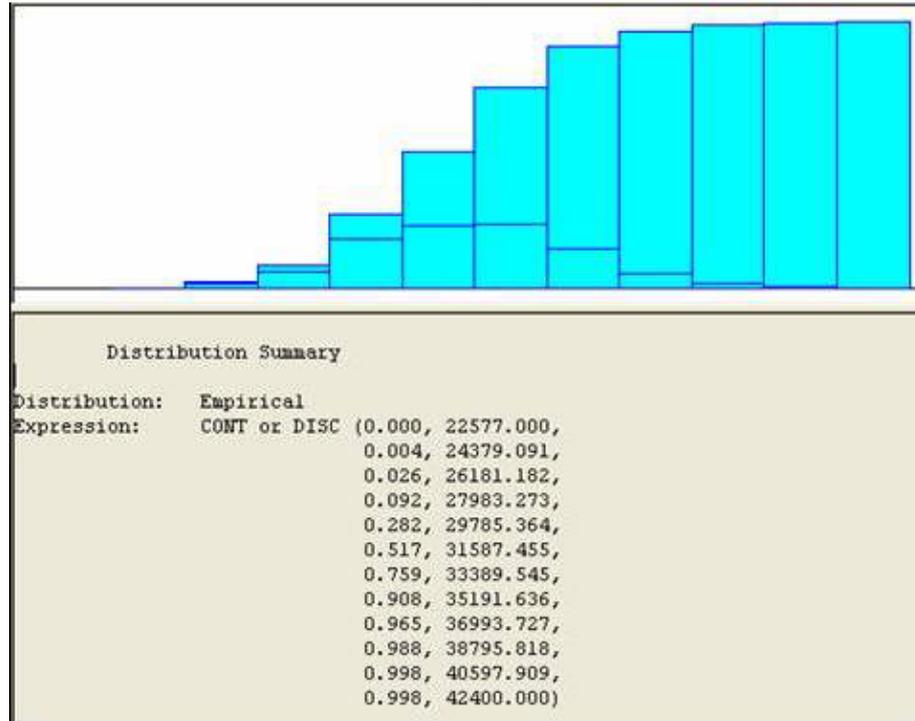


Figura 29 – Distribuição empírica do volume de gás produzido por corrida em julho de 2007

Tabela 2 – Distribuições de probabilidade dos parâmetros de geração de gás LDG.

Parâmetros de Geração	Julho/2006	Agosto/2007
Volume de Geração de Gás (Nm ³)	cont(0.00384,24100, 0.0169,25600, 0.0453,27200, 0.165,28700, 0.329,30200, 0.539,31700, 0.744, 33300, 0.879,34800, 0.951,36300, 0.975,37800, 0.991,39400, 0.997,40900, 1.0, 42400)	NORM(2.93e+004, 1.9e+003)
Tempo de Geração (min)	cont(0.0554,12, 0.356,13, 0.790,14, 1.0,15, 1.0,15.5)	9.5 + 6 * BETA(4.46, 4.85)
Período entre Gerações (min)	cont(0,0, 0.365,14.1, 0.795,26.2, 0.921,38.2, 0.954,50.3, 0.972,62.4, 0.986,74.5, 0.992,86.5, 0.995,98.6, 0.995,111., 0.997,123., 0.998,135., 0.998,147., 1.0,159.)	-0.5 + ERLA(7.85, 2)

4.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A partir da modelagem conceitual e da coleta e tratamento de dados, iniciou-se a fase de construção do modelo computacional. O objetivo desta fase é dar origem a um simulador capaz de analisar o desempenho do sistema de distribuição de LDG, seja em sua configuração atual ou em cenários alternativos de operação. Em linhas gerais, foram

construídas várias versões do modelo até que se chegasse à versão final, utilizada para as execuções de simulação.

A ferramenta criada é um simulador a eventos discretos, sendo que o processo simulado é, de fato, semi-contínuo. Semi-contínuo na etapa de geração do gás e contínuo na distribuição do gás. O processo semi-contínuo foi discretizado no tempo e modelado através de variáveis estocásticas (geração) e determinísticas (capacidade do sistema). Fioroni (2007) modelou o fluxo de materiais como grandes “porções”, tratadas como entidades discretas pelo modelo computacional. Segundo este autor, existe uma grande diferença entre o fluxo contínuo de material e a movimentação de grandes porções deste material, mas se todo o material deixa o ponto de partida na mesma taxa e chega ao seu destino ao mesmo tempo, o resultado final será exatamente o mesmo, nas duas abordagens.

É importante notar que, devido à característica semi-contínua do sistema estudado, não se observa a formação de filas na forma de estoque em processo, tal como observado também por Carvalho (2003) em simulações de transporte de minério de ferro. O que ocorre, na prática, são indicativos de transbordos e, conseqüentemente, a redução na taxa de geração de gás.

4.5.1 Identificação de sub-modelos

Para facilitar a concepção do modelo e sua tradução para uma ferramenta de simulação, o sistema foi decomposto em subsistemas, conforme mostra a figura 30. Cada subsistema compreende regras lógicas de controle de fluxo de LDG, estudadas na etapa da definição do modelo conceitual.

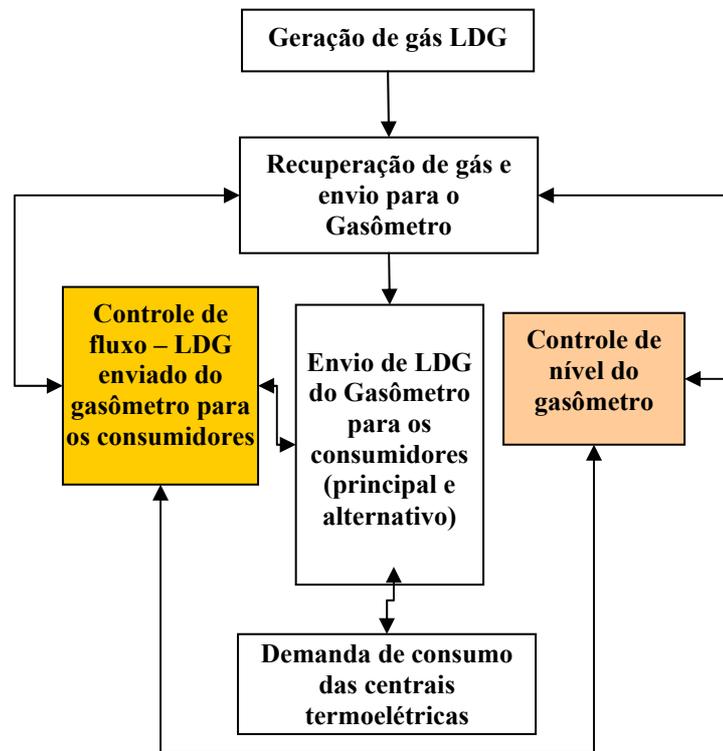


Figura 30 – Diagrama de blocos para identificação de sub-sistemas

Baseando-se no diagrama de blocos da figura 30, foram identificados os sub-modelos ou grupos de lógicas de controle a serem construídos:

- Lógica de geração e recuperação de LDG;
- Lógica de fluxo de distribuição de LDG;
- Lógica de demanda de LDG;
- Lógica auxiliar de cálculo de vazão média de LDG recuperado.

No apêndice A são apresentados os sub-modelos construídos.

4.5.2 Discretização do fluxo de gás LDG

Em linhas gerais, discretizar o fluxo de gás foi a principal decisão tomada durante a construção do simulador. A discretização de todo o fluxo foi feita no tempo, em intervalos de um minuto. Esta também foi a frequência de coleta de dados do sistema.

Para cada sub-modelo ou lógica de controle, foi definida a figura da entidade controladora, que é criada uma única vez, ativando a simulação, e que circula pelo sub-modelo, a cada minuto, durante todo o tempo de simulação. A entidade controladora se move pela lógica do modelo, sendo diretamente influenciada por esta mesma lógica. Isto ocorre através da modificação de alguns dos atributos das entidades, sensíveis às expressões do modelo. Paralelamente, as variáveis de estado do sistema são influenciadas pelas alterações sofridas pelas entidades.

Exemplificando o processo de discretização, inicia-se pela entidade controladora de geração e recuperação de gás. O atributo de volume gerado a cada minuto segue a curva probabilística de geração de gás definida para o modelo, conforme obtido na etapa de tratamento de dados. A variável de estado de nível do gasômetro é diretamente influenciada pelo atributo de volume da entidade de geração, que “transfere” este volume para o gasômetro, a cada minuto. A lógica de controle de geração, baseada nos parâmetros e regras de operação reais, define se de fato haverá esta recuperação de gás ou se o gás deverá ser queimado, por insuficiência de espaço livre no gasômetro. Na Figura 31 é mostrado um trecho da lógica de controle de geração de gás.

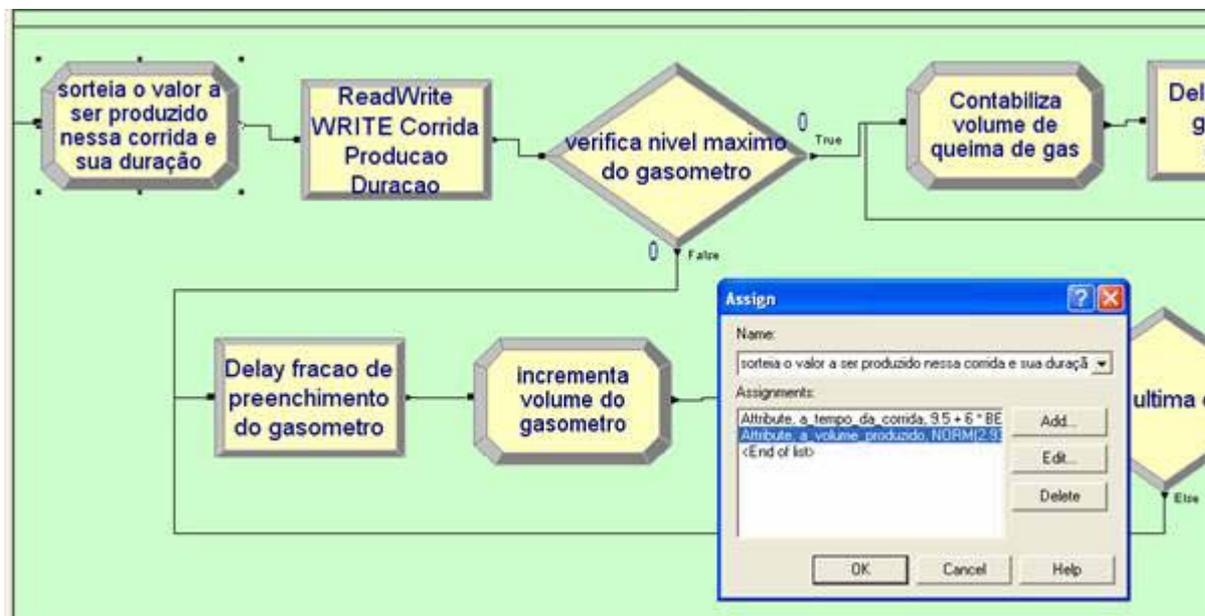


Figura 31 – Discretização do fluxo de geração de gás LDG durante as corridas de produção do aço

Para a discretização da distribuição de gás, a entidade controladora de distribuição tem seu atributo de volume ou vazão de gás alterado dinamicamente, conforme as circunstâncias de disponibilidade de gás no gasômetro, demanda dos consumidores e

expressões de controle que regem a operação de distribuição, tal como a função de cálculo de vazão visada de distribuição de gás. A entidade, através do atributo de vazão, retira “porções” de LDG do gasômetro e as “transfere” para os consumidores, gerando o fluxo de distribuição. Este fluxo, obviamente, altera o estado do sistema, esvaziando o *buffer* intermediário de armazenamento e incrementando o volume de gás enviado para as centrais termoelétricas. A Figura 32 apresenta uma parte da lógica de controle de distribuição de gás.

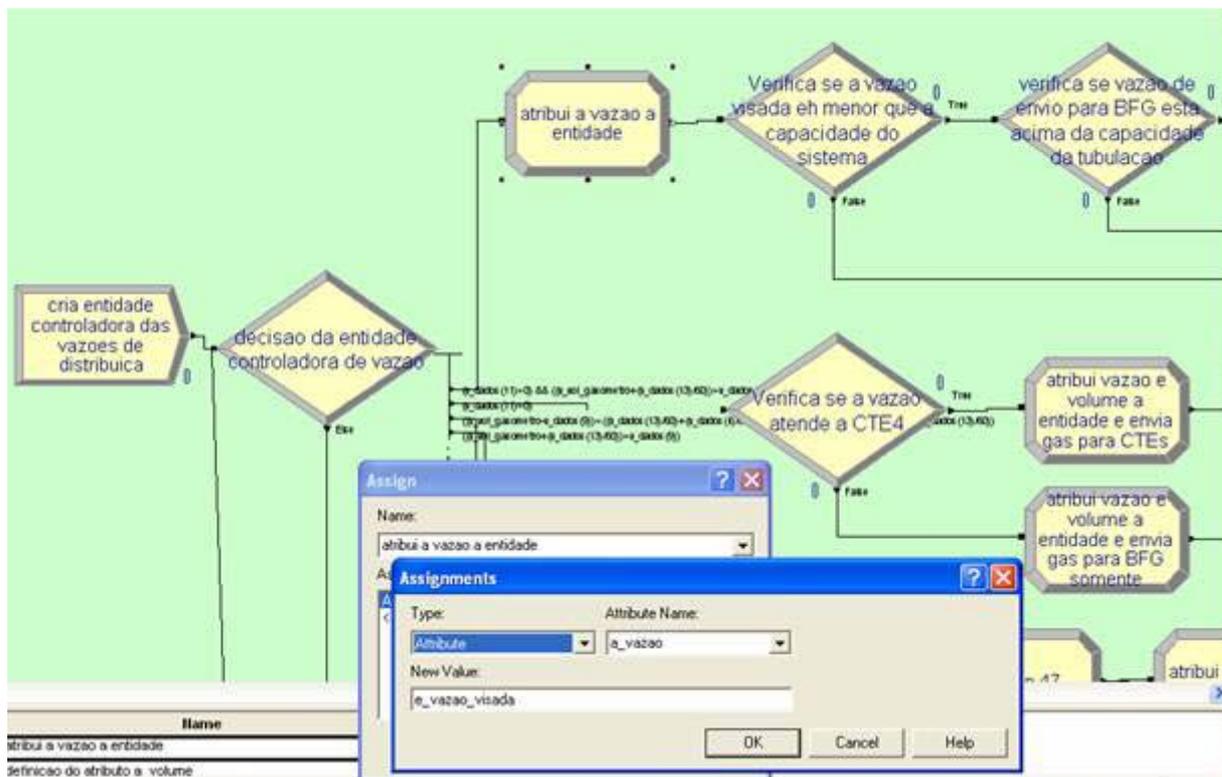


Figura 32 – Discretização do fluxo de distribuição de gás LDG

4.5.3 Variáveis e indicadores

A lógica do sistema foi construída considerando-se as restrições e procedimentos operacionais, os quais foram modelados através de blocos lógicos, lógica booleana e expressões do Arena. Tais expressões são constantemente atualizadas, tornando a lógica de controle sensível às variáveis de estado do processo, que é o que ocorre de fato no sistema real. Na tabela 3 são apresentadas as principais expressões do modelo.

Tabela 3 – Expressões que representam a lógica de controle do sistema

Expressões - lógica de controle do sistema	Definição	Objetivo
e_desvio_vol_visado_gasometro	cálculo do erro ou diferença entre o volume visado e o volume atual de gás LDG no gasômetro	Sinalizar para a lógica de vazão visada de envio de LDG para os consumidores sobre tendência de queda ou crescimento do nível de operação do gasômetro em relação ao nível visado pela lógica de controle.
e_media_vazao	cálculo da vazão média de LDG recuperado nos últimos 150 minutos	Sinalizar para a lógica de vazão visada de envio de LDG para os consumidores sobre tendência de ritmo de recuperação de gás na Aciaria..
e_variacao_max_permitida	cálculo da variação máxima permitida para a taxa de envio de LDG para a tubulação de BFG	Limitar a variação do fluxo de envio de LDG para o duto de BFG conforme a variação máxima permitida para a segurança operacional das centrais termoeletricas
e_vazao_visada	cálculo de vazão visada de envio de LDG para os consumidores, segundo parâmetros de controle do sistema (fator de segurança, nível visado do gasômetro, média recente de recuperação de LDG, vazão máxima de envio de gás pelo booster, variação máxima de envio para as CTEs, demanda atual do consumidor principal, vazão visada no minuto anterior).	Expressão central de controle, que influencia todo o sistema, calculando a vazão visada de LDG, que indica a taxa desejada de envio de LDG do gasômetro para os consumidores.

Os parâmetros operacionais do sistema foram modelados por um conjunto de variáveis, de maneira que, durante a validação e experimentação do modelo, fosse possível a alteração de tais parâmetros, conforme a configuração do sistema e cenário a ser simulado. Na Tabela 4, são apresentados os principais parâmetros e variáveis de estado do modelo.

Tabela 4 – Principais variáveis do sistema de distribuição de LDG

Variáveis	Definição	Objetivo
v_vol_gasometro	variável de volume ocupado no gasômetro de LDG	armazenar o valor corrente de ocupação do gasômetro
v_vol_vis_gasometro	parâmetro de controle de volume visado do gasômetro	armazenar o parâmetro operacional de controle de volume visado do gasômetro
v_vol_queima	variável de volume de queima de LDG gerado na Aciaria	acumular o volume de queima de gás LDG gerado na Aciaria devido a espaço insuficiente no gasômetro
v_vol_alto_gasometro	variável de limite alto de ocupação do gasômetro	armazenar o parâmetro operacional de controle de volume alto do gasômetro
v_vol_baixo_gasometro	variável de limite baixo de ocupação do gasômetro	armazenar o parâmetro operacional de controle de volume baixo do gasômetro
v_fator_seg_vz_vis	variável fator de segurança para cálculo de vazão visada	armazenar o parâmetro operacional de fator de segurança a ser utilizado na expressão de cálculo de vazão visada de envio de LDG para os consumidores
v_vz_vis_anterior	variável de vazão visada calculada no minuto anterior de simulação	armazenar o valor calculado, no minuto anterior, de vazão visada, a ser utilizada na expressão de cálculo de vazão visada de envio de LDG para os consumidores
v_vz_max_booster	variável de vazão máxima de envio de LDG através do booster.	armazenar o parâmetro operacional de vazão máxima de operação do booster de LDG
v_consumo_CTE4	variável de consumo de LDG pela CTE4	acumular o consumo de LDG pela CTE4, principal consumidor
v_vz_CTE4	variável de demanda de gás LDG pela CTE4	armazenar a demanda instantânea de LDG pela CTE4. Esta demanda é prioritária sobre o cálculo de vazão visada
v_consumo_BFG	variável de consumo de LDG pela injeção no duto de BFG	acumular o consumo de LDG pela injeção no duto de BFG
v_var_max_vz_BFG	variável de taxa máxima de variação da vazão de envio de LDG para o BFG	armazena o parâmetro operacional de taxa máxima de variação da vazão de envio de LDG para o BFG, evitando variações bruscas do PCI do gás consumido nas CTEs

Para indicador de desempenho, a ser utilizado na tomada de decisão dos cenários simulados, foi definida a variável de volume de queima de gás LDG. Através do montante de gás queimado devido à insuficiência de espaço no gasômetro, pode-se medir o desempenho do sistema, cujo principal objetivo é distribuir todo o gás recuperável gerado no processo de produção do aço.

4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Validar um modelo significa assegurar que os resultados obtidos pelo modelo são próximos aos observados no sistema real (JAIN, 1991). Para tanto, é necessário validar as premissas adotadas, valores e distribuições dos parâmetros de entrada e os valores de saída do modelo. A validação pode ser feita baseando-se na intuição de especialistas, na comparação com as medidas do sistema real ou em resultados teóricos. Segundo Jain (1991), a comparação com o sistema real é o método mais confiável e preferível para validar o modelo de simulação. Foi adotada como forma de validação do modelo construído a comparação dos resultados da simulação com os resultados históricos coletados.

De acordo com Robinson (2004), a duração da simulação de sistemas não-terminais deve ser determinada pelo usuário do modelo. Tais sistemas não possuem uma condição ou evento de parada. Para a escolha do período de simulação, optou-se por um longo período de simulação, para que fosse eliminada a influência do período transiente inicial (JAIN, 1991) e para que se obtivesse uma quantidade de dados de saída suficientes para a obtenção de resultados acurados (ROBINSON, 2004). Desta forma, assegura-se que as condições iniciais não afetarão os resultados.

A etapa de validação iniciou com a simulação do modelo utilizando-se dados históricos de produção de LDG no período de 01/07/2006 a 31/07/2006. O comportamento do nível do gasômetro obtido através da simulação foi comparado aos dados históricos deste período. Os dados de geração foram lidos a partir de arquivos texto e armazenados pelas entidades controladoras de geração, nos atributos de volume.

O mesmo procedimento adotado para o mês de julho de 2006 foi realizado para o período de 01/12/2006 a 31/12/2006, de modo a verificar que o modelo continuava válido, mesmo com um aumento do ritmo de geração de gás. Outro procedimento utilizado na validação foi simular o processo de distribuição de gás no Excel, baseando-se nas mesmas premissas e regras de operação consideradas na simulação no Arena.

Como se pode notar nas Figuras 33 e 34, o resultado do comportamento do nível do gasômetro simulado pelo Excel e Arena foi bem próximo, sendo que ambos os simuladores se comportaram de modo semelhante ao sistema real. A linha verde representa o nível real. A linha vermelha pontilhada representa o nível obtido no Arena, e a linha vermelha, o nível no Excel. A linha verde pontilhada é a diferença entre o nível do gasômetro simulado no Arena e o nível real. A diferença média encontrada foi de 4,9 %. A linha laranja representa a diferença

entre a simulação no Excel e no Arena, que ficou, na média, em 1,5 %. As demais linhas representam os instantes e volumes de recuperação de gás. O resultado pode ser considerado bastante satisfatório, devido à grande variabilidade apresentada pela variável de nível e ao longo período de simulação considerado, de 43200 minutos.

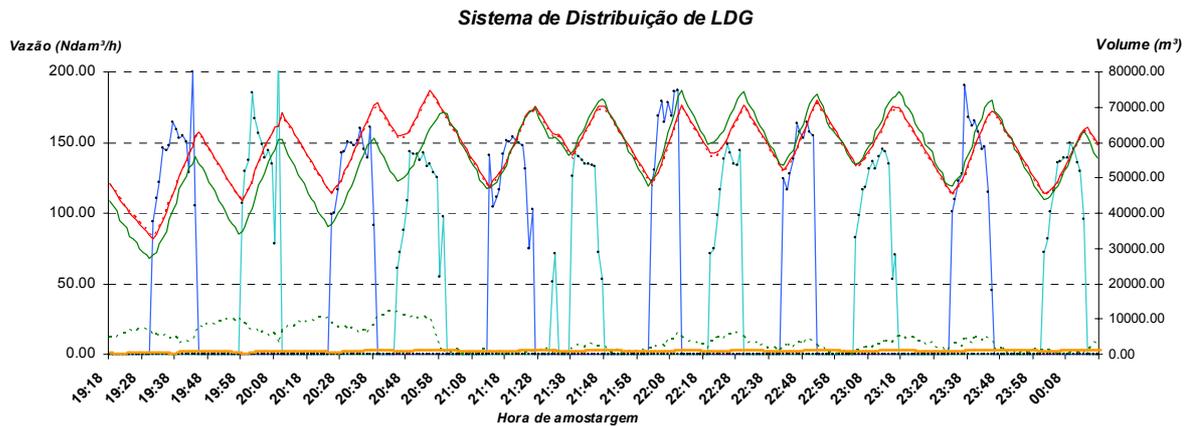


Figura 33 – Comportamento real e simulado, no Arena e Excel, do nível do gasômetro em julho de 2006

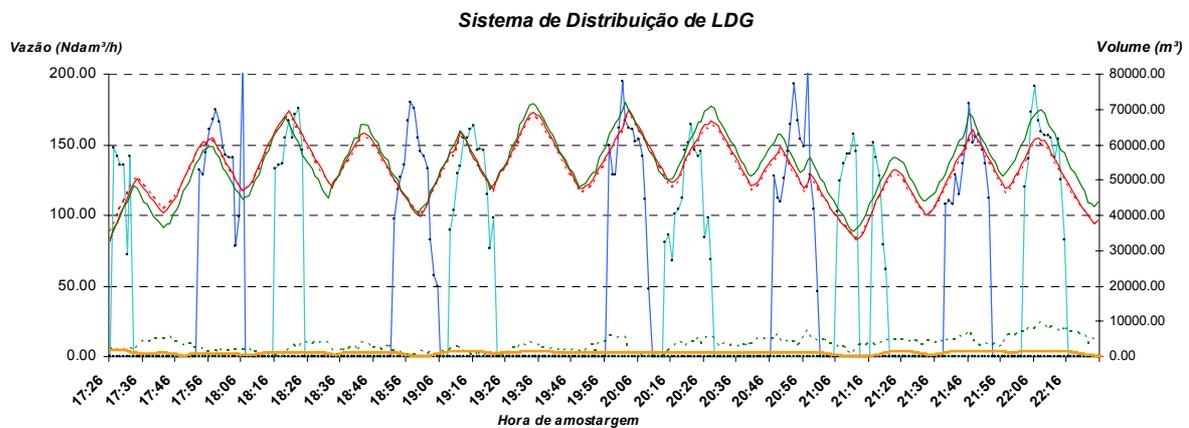


Figura 34 – Comportamento real e simulado, no Arena e Excel, do nível do gasômetro em dezembro de 2006

Para a confirmação da validação do modelo, foram construídos gráficos comparativos entre o volume real e o volume simulado no Excel e no Arena, de onde se obteve o coeficiente de correlação $R^2 = 0,9835$ e $R^2 = 0,9629$, respectivamente, o que mostra que os dados reais e simulados possuem uma forte correlação. Estes gráficos são mostrados nas Figuras 35 e 36 a seguir.

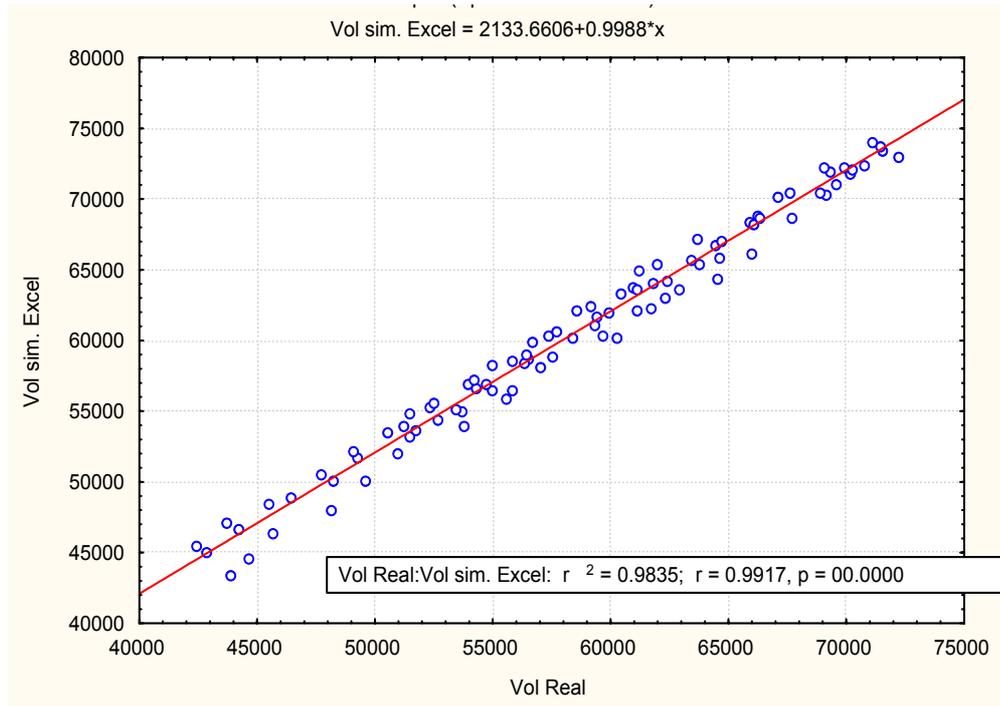


Figura 35 – Comportamento do volume ocupado do gasômetro real e simulado no Excel

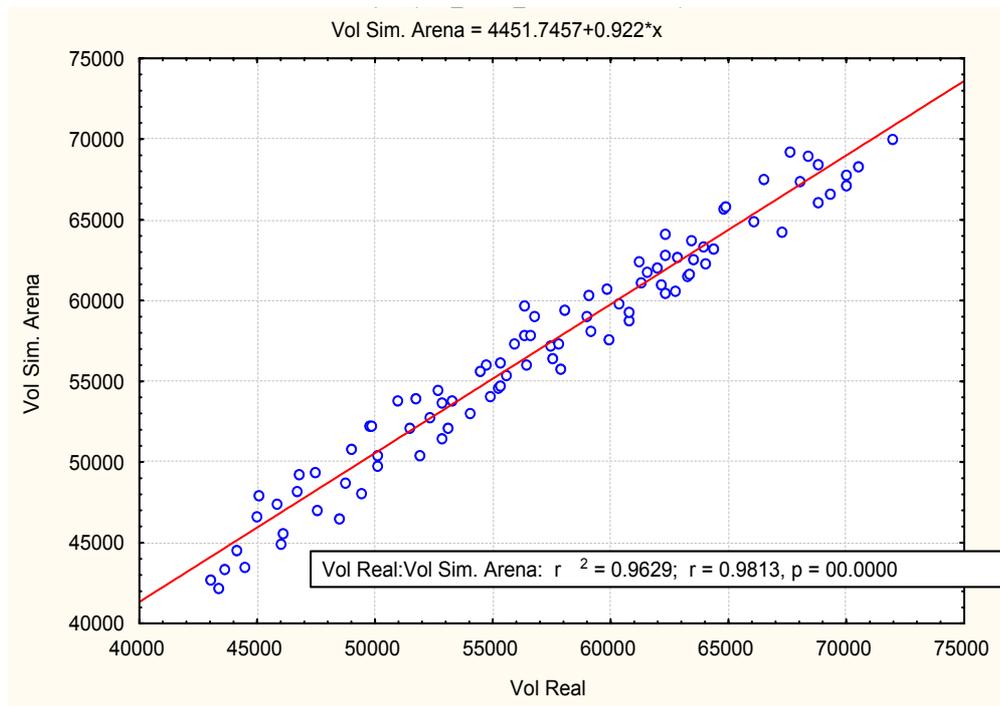


Figura 36 – Comportamento do volume ocupado do gasômetro real e simulado no Arena

Considerando-se a operação real do sistema, o comportamento do nível do gasômetro influencia diretamente no resultado da perda de gás, visto que a perda está relacionada aos instantes nos quais o gasômetro atinge o seu nível máximo. Esta realidade

também pôde ser verificada na etapa de validação, dado que, paralelamente à análise de nível do gasômetro apresentada, foram comparados os montantes de queima de LDG real e simulado para os períodos anteriormente considerados, tendo sido encontrada uma diferença média de 5,4%. O volume mensal de perda real era da ordem de 4.650.000 Nm³, sendo que a perda simulada atingiu cerca de 4.900.000 Nm³. Desta forma, pode-se considerar satisfatório o resultado simulado da variável volume de perda de gás LDG. Esta constatação é fundamental, visto que o índice de aproveitamento de gás é o indicador de desempenho definido para o sistema.

Após esta etapa, considerou-se o modelo desenvolvido validado para representar o sistema de distribuição de gás LDG, possibilitando a continuidade do estudo em direção ao cumprimento dos demais objetivos definidos.

CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISE DE CENÁRIOS

A simulação, de acordo com Carvalho (2003), é uma técnica de experimentação da realidade, onde experimentação é o processo de realização das replicações, no modelo computacional. A realização dos experimentos consiste na avaliação do comportamento do indicador de desempenho do sistema, no horizonte de estudo, para diferentes cenários.

Após a validação do modelo, avaliou-se a necessidade do estabelecimento de premissas para a realização dos experimentos a serem planejados, para que se mantivesse a consistência dos resultados com o propósito da pesquisa. Definiu-se como premissa que, para a demanda do principal consumidor, a quarta central termoelétrica, seriam considerados os dados de consumo, minuto a minuto, dos períodos a serem simulados, uma vez que este consumo é, por regra, prioritário sobre os demais e sobre o cálculo sugerido pelo sistema de controle. Isto significa dizer que, nos períodos em que o controle do sistema indicar que este deve consumir uma vazão abaixo da que estiver sendo demandada pela CTE 4, a demanda da CTE 4 é atendida prioritariamente. O que ocorre na prática é que, em situações como esta, o operador de distribuição de gases sugere à operação da CTE 4 a redução do consumo, a fim de se evitar uma parada no sistema.

5.1 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

De acordo com Freitas (2001), pela experimentação é possível determinar como o comportamento de um sistema pode ser influenciado pelos possíveis valores de uma ou mais variáveis, conhecidas, nestes casos, como fatores. Um experimento é um teste ou uma série de testes nos quais são realizadas alterações controladas sobre os fatores de um processo, de forma a avaliar o impacto destas alterações nas variáveis de desempenho ou resposta. Na terminologia de análise e projeto de experimentos, níveis são os valores que um fator pode assumir.

Devido à possibilidade de existência de muitos cenários, decorrentes das combinações de fatores e níveis, em geral, não se pode simular todos os cenários possíveis de modo a atingir o objetivo do estudo. A abordagem de projeto de experimentos identifica os fatores que possuem maiores chances de proporcionar melhorias no processo (ROBINSON,

2004). Para o sistema em estudo, foram definidos como fatores a capacidade do gasômetro e a demanda de gás LDG, uma vez que o indicador de desempenho é diretamente afetado por estes fatores. Partiu-se do cenário I, correspondente à configuração atual do sistema. Em seguida, foram simulados os cenários II e III, correspondendo a variações nos níveis de capacidade de armazenamento e demanda de gás LDG.

A experimentação combinada dos fatores capacidade e demanda poderia ser feita. Porém, esta combinação não tem significado prático para o sistema em estudo, visto que o aumento real do gasômetro é inviável. No entanto, este fator foi considerado para que se pudesse avaliar a adequação da capacidade atual do sistema em absorver o gás produzido.

5.2 PROJETO DE EXPERIMENTOS

O projeto de experimentos especifica a estratégia que determina o número de experimentos a serem realizados, bem como o número de replicações dos experimentos. Cada experimento representa uma combinação entre um fator e um de seus níveis. Segundo Robinson (2004), não existem cenários totalmente pré-definidos. O que ocorre é uma variação de um ou mais fatores, até que se atinja o objetivo ou o nível ótimo.

Existem várias estratégias para a execução de um projeto de experimentos. O projeto experimental adotado foi o projeto conhecido como um fator por vez. Nesta abordagem, como o próprio nome indica, varia-se um fator por vez, mantendo os demais fixos (FREITAS, 2001). Inicialmente, são observados os resultados obtidos nos experimentos baseados na configuração típica para todos os fatores. Em seguida, um dos fatores assume outro valor ou nível, enquanto os demais fatores permanecem inalterados. Após a simulação de todos os níveis definidos para este fator, ele se torna fixo e outro fator passa a ser variado. Esta estratégia também é conhecida como projeto experimental simples, e se encerra após a realização de todos os testes, considerando-se todos os fatores e seus níveis. A estratégia adotada desconsidera a interação entre os fatores, que é um elemento fundamental na experimentação, segundo Freitas (2001). Porém, como os fatores definidos neste estudo não têm interação, esta estratégia é uma opção válida e prática.

O projeto experimental simples adotado manteve, para o período de simulação, o mesmo período de um mês, em intervalos de minuto, da mesma forma que na fase de validação do modelo. Para um projeto experimental simples, é necessário um número n

mínimo de experimentos, conforme a equação 4, para que se consiga avaliar a influência dos fatores (k) na variável de desempenho.

$$n = 1 + \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \quad (4)$$

Optou-se por variar os dois fatores definidos (capacidade de armazenamento e demanda de gás) em pelo menos três níveis (n_i). Por meio da realização de 6 experimentos, conforme apresentado na Tabela 5, foi satisfeito o número mínimo de 5 experimentos para este projeto. O sinal ‘+’ indica que o fator participa do experimento, enquanto o sinal ‘-’ significa que tal fator não foi considerado.

Tabela 5 – Definição inicial dos experimentos do projeto

Experimento	Aumento de capacidade de armazenamento do gasômetro	Aumento da demanda de gás LDG
1	+	-
2	+	-
3	+	-
4	-	+
5	-	+
6	-	+

5.3 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

O cenário I corresponde à simulação do sistema em sua configuração original. O objetivo deste cenário é determinar o atual volume de perda de gás. Utilizando-se o modelo validado, a variável de volume de queima de gás foi avaliada considerando-se os ritmos de geração observados em julho de 2006 e agosto de 2007. Os resultados encontrados foram 6.464.914 Nm³ e 7.269.228 Nm³, respectivamente.

O resultado apresentado no cenário I aponta para uma análise da adequação da capacidade do gasômetro como *buffer* intermediário entre produção e consumo do processo de distribuição de LDG. O cenário II simulado visou à avaliação do comportamento do

sistema em relação ao volume de queima, através da variação da capacidade do gasômetro. A capacidade do gasômetro é o primeiro fator de experimentação. Na Tabela 6 são apresentados os níveis de variação para este fator, bem como sua influência sobre a perda de gás.

Tabela 6 – Resultados dos experimentos realizados no cenário II

Experimento	Aumento de capacidade de armazenamento do gasômetro (%)	Redução da perda de gás LDG (%)
1	0.00	0.00
2	12.5	19.16
3	25.00	29.30
4	50.00	43.19
5	75.00	50.78
6	100.00	53.42
7	150.00	59.00
8	200.00	61.65
9	300.00	66.52

Na Figura 37, os resultados experimentais referentes à taxa de redução de perda de LDG, para diferentes níveis do fator de experimentação, são descritos a partir do modelo de distribuição modificado de Harris (1968). Através da figura 38, observa-se a forte correlação entre este modelo e os dados experimentais obtidos nas simulações ($R^2 = 0,99$). Durante a realização dos experimentos, decidiu-se pela simulação de 8 níveis para a capacidade do gasômetro, e não apenas 3, como previa o plano inicial.

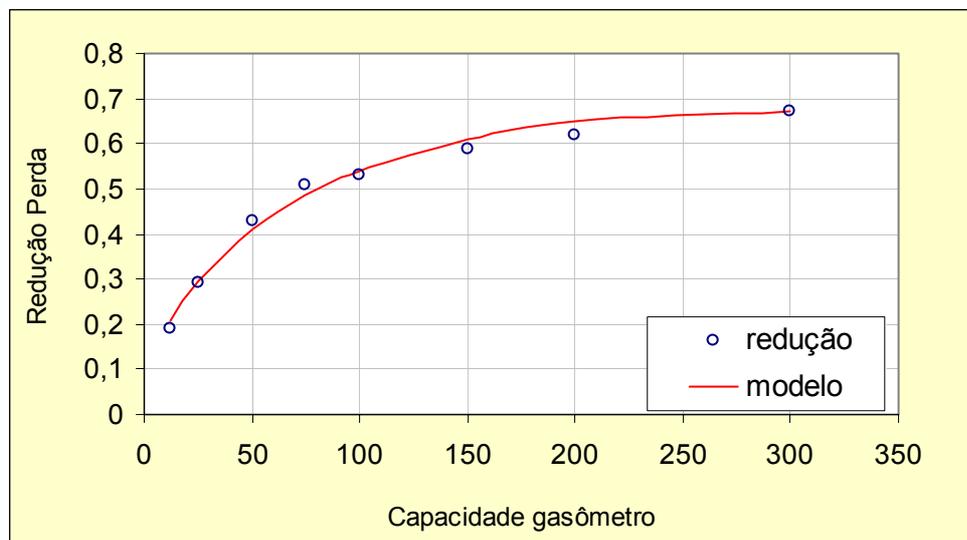


Figura 37 - Influência do aumento da capacidade do gasômetro sobre a redução da perda de gás LDG

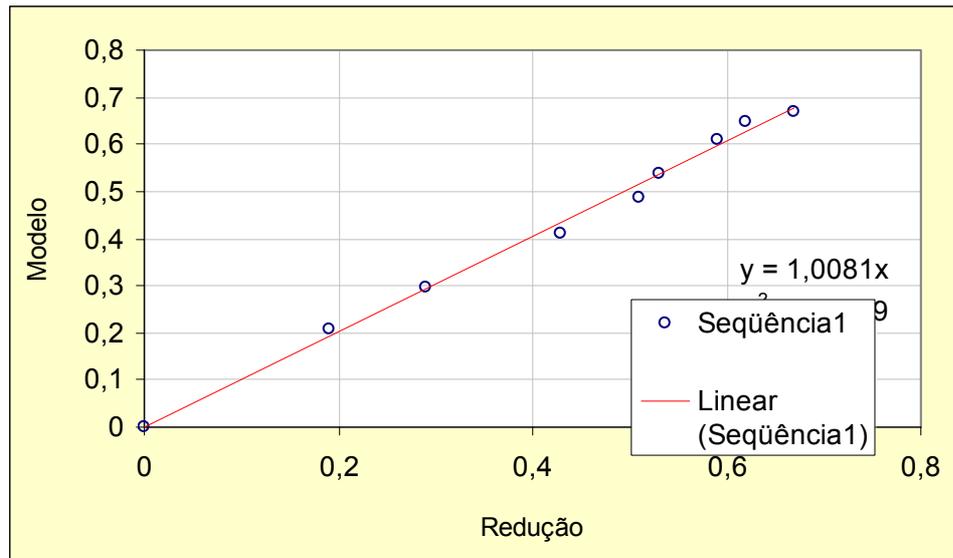


Figura 38 – Correlação entre o modelo de distribuição modificado de Harris e os resultados experimentais do cenário II

Considerando-se o modelo de Harris (1968) modificado, conforme equação 5, tem-se:

$$R_{perda} = R_{perda}^{\max} \left[1 - \left(\frac{\%VG}{\%VG_{\max}} \right)^s \right]^m \quad (5)$$

onde: R_{perda} = redução da perda de gás LDG

R_{perda}^{\max} = redução máx obtida, ou seja,

redução para o maior aumento do volume do gasômetro($\%VG_{\max}$)

s, m = parâmetros de distribuição do modelo

O cenário III avaliou o comportamento do sistema pelo mesmo indicador de desempenho, através da variação da demanda de gás pelos consumidores. A avaliação deste segundo fator foi motivada pelo indicativo de volume de gás desperdiçado, observado através do cenário I. O Gráfico no formato de dente de serra, conforme mostra a figura 39, que atinge com frequência o nível máximo permitido para a operação do gasômetro, também indica esta tendência de perda de gás, tal como em análise semelhante feita por Ono (2007) em sua modelagem e planejamento da cadeia de suprimentos de petróleo.

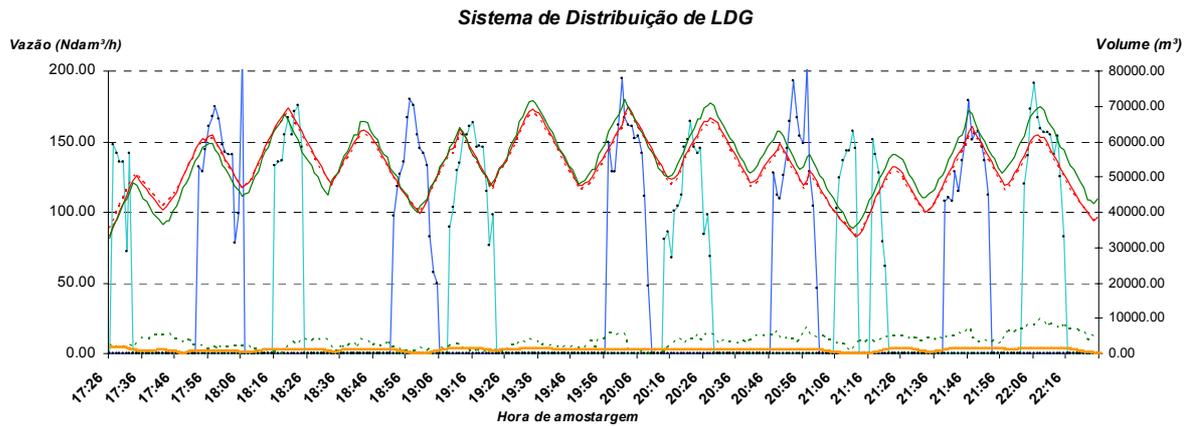


Figura 39 – Comportamento real e simulado do nível de estoque intermediário de LDG

Considerando-se o volume de gás não aproveitado pela configuração atual do sistema, optou-se por simular o aumento de demanda através da adição de um novo consumidor no sistema. Com base em perfis de consumo de fornos consumidores de gases de composição semelhante ao LDG, em operação na mesma usina, foram planejados experimentos nos quais a demanda de gás do novo consumidor fosse variada de 12.000 a 22.000 Nm³/h. Também para o segundo fator, demanda de gás, decidiu-se simular 4 níveis de variação, em vez de apenas 3. A Tabela 7 apresenta os níveis crescentes considerados para o fator demanda e sua influência sobre a redução da perda de gás.

Tabela 7 – Níveis considerados para o fator de demanda e sua influência sobre a perda de gás

Experimento	Aumento da demanda por gás LDG (Nm³)	Redução da perda de gás LDG (%)
1	0.00	0.00
2	12000.00	44.00
3	14000.00	48.00
4	15000.00	54.00
5	22000.00	66.00

Na Figura 40, os resultados experimentais referentes à taxa de redução de perda de LDG, para diferentes níveis do fator de experimentação do cenário III, são descritos a partir do modelo de distribuição modificado de Harris (1968). Através da figura 41, observa-se a forte correlação entre este modelo e os dados experimentais obtidos nas simulações ($R^2=0,99$).

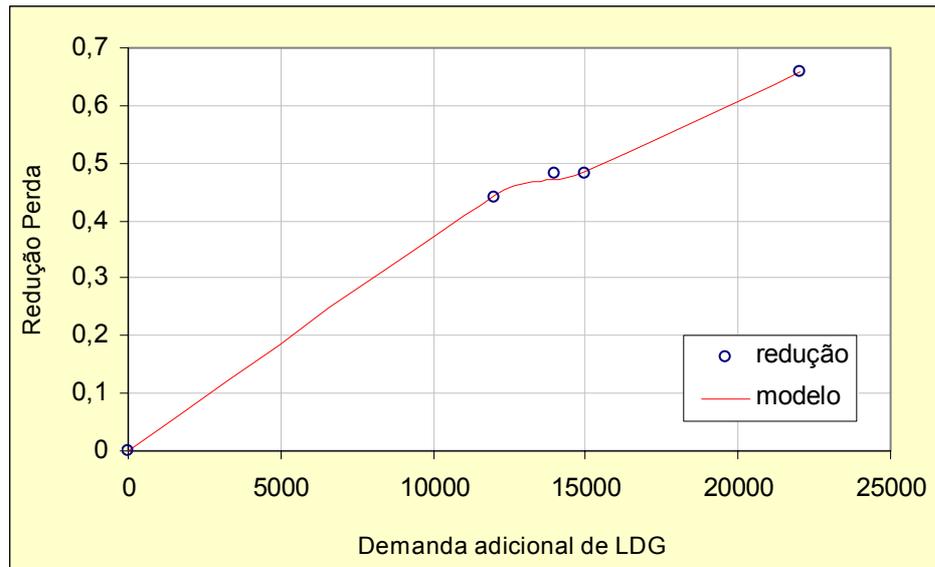


Figura 40 – Influência do aumento da demanda de LDG sobre a redução da perda de gás

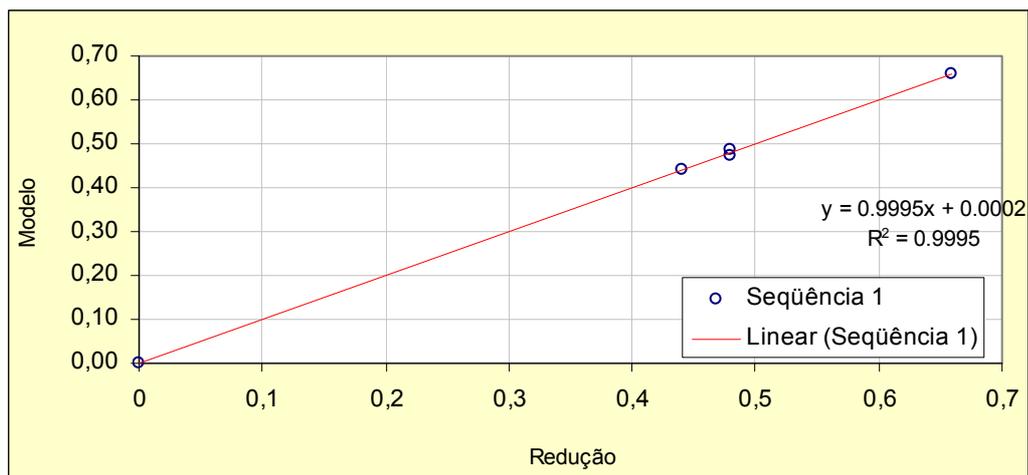


Figura 41 – Correlação entre modelo de distribuição modificado de Harris e os resultados experimentais do cenário III

Considerando-se o modelo de Harris (1968) modificado tem-se, conforme equação

6:

$$R_{perda} = R_{perda}^{\max} \left[1 - \left(\frac{\%AD}{\%AD_{\max}} \right)^s \right]^m \quad (6)$$

onde: R_{perda} = redução da perda de gás LDG

R_{perda}^{\max} = redução máx obtida, ou seja,

maior aumento da demanda ($\%AD_{\max}$)

s, m = parâmetros de distribuição do modelo

5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na etapa de análise de resultados, é destacado o comportamento do indicador de desempenho nos três cenários simulados.

Analisando-se o volume de perda de gás no cenário I, observa-se que o volume desperdiçado é considerável. De acordo com dados do sistema de recuperação, a queima de gás recuperável durante a produção do mês de julho de 2006 corresponde, em média, a 3 dos 13 minutos médios de recuperação de gás LDG. A perda do gás aumenta em 12% quando se considera o mês de agosto de 2007. Estes resultados justificam a necessidade de um estudo sobre alternativas de operação do sistema de modo a aumentar o índice de aproveitamento de LDG.

O comportamento do gráfico do cenário II, mostrado na figura 35, apresenta uma forte tendência de redução do volume de queima de gás à medida que a capacidade do gasômetro aumenta. Isto se deve ao fato do gasômetro ir se tornando cada vez mais capaz de absorver a taxa de geração de gás ($120.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$), visto que esta taxa, nos períodos de geração, é superior a taxa de consumo ou demanda total dos consumidores, que é de no máximo, $70.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$. Pela coleta de dados e informações fornecidas por especialistas no processo, tinha-se um indicativo de que o gasômetro fosse o gargalo, para os níveis atuais de demanda. Através da experimentação do cenário II, esta expectativa foi confirmada. A escolha dos níveis de aumento de capacidade foi arbitrária, partindo de incrementos menores (12,5% e 25%), até aumentos de 50%.

Vale ressaltar que a expansão de capacidade do gasômetro é um cenário hipotético, uma vez que o gasômetro não pode ser facilmente expandido, por razões práticas e econômicas. De qualquer modo, este cenário é útil na determinação de capacidades mais adequadas para o gasômetro.

No cenário III, foi possível verificar, através dos experimentos, que a adição de mais um consumidor de gás é possível. A perda de gás, conforme observado na tabela 7, foi reduzida cada vez mais, na medida em que se aumentavam os níveis de demanda do novo consumidor. Os níveis de demanda simulados são possibilidades reais e estão sendo considerados em estudos de expansão do processo de distribuição de LDG. É importante ressaltar que, no último nível de variação de demanda, obteve-se 66% de redução no volume de perda de gás, valor bem próximo ao alcançado na simulação do oitavo experimento de aumento de capacidade do gasômetro, que foi de 67%.

Continuando a análise dos cenários anteriormente considerados, as reduções de perda foram mais significativas nos primeiros níveis de acréscimo de capacidade ou demanda de gás. Uma análise mais detalhada das variáveis indica que isto ocorre devido a alguns períodos de tempo durante os quais o principal consumidor reduz sua demanda por motivos operacionais. Uma vez que a geração de gás continua em ritmo normal, pois a produção de aço resulta no principal produto da empresa, o gasômetro atinge seu nível superior de operação. Nestas condições, é difícil evitar a perda de gás, mesmo com capacidades ou demandas maiores.

Após a análise das informações geradas nas simulações da etapa de validação e dos cenários I, II e III, e com base no ritmo de geração crescente de LDG, quando da avaliação das produções de 2006 e 2007, pode-se concluir que a capacidade do gasômetro é insuficiente para absorver o ritmo atual e futuro de produção, considerando-se a atual demanda de gás LDG. Pode-se também concluir que a adição de mais um consumidor é viável e recomendada, haja vista a redução considerável de perda de gás decorrente deste cenário.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa tratou da simulação do Sistema de Distribuição de Gás LDG para as Centrais Termoelétricas de uma Usina Siderúrgica. Tendo em vista os objetivos estabelecidos, são apresentadas as conclusões a seguir.

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Se fosse possível aumentar a capacidade do gasômetro em 150%, haveria uma redução do volume de queima de gás da ordem de 60 %. De modo semelhante, a implantação de um consumidor de demanda equivalente a 22.000 Nm³/h reduziria a perda em 66%. Esta redução permitiria que, ao final de cada mês, o aproveitamento de gás correspondente, em Nm³, fosse convertido em energia elétrica, na ordem de MW de potência. Esta energia poderia ser utilizada internamente, nos processos industriais, ou, em períodos de excedente de geração, comercializada no sistema nacional de energia elétrica. Em ambos os casos, ganhos financeiros consideráveis podem ser proporcionados.

Ao se analisar os resultados em cada cenário, observa-se índices semelhantes de redução de perda de gás, considerando-se o aumento de capacidade do gasômetro e a inclusão de um novo consumidor. No entanto, adicionar um novo consumidor é uma opção realista e economicamente viável. Esta alternativa também melhora a flexibilidade do sistema em situações nas quais o principal consumidor falha ou precisa de uma parada para manutenção.

Além das vantagens econômicas anteriormente expostas, existem vantagens ambientais importantes, advindas da redução da queima de gases. A empresa em estudo aderiu a iniciativas conhecidas por ‘mecanismos de desenvolvimento limpo’, como é o caso do processo de reutilização do gás LDG, dentre outros. Por conseqüência, a empresa passa a ser detentora de créditos de carbono, na medida em que reduz as emissões de gases poluidores. Soma-se a isto o fato positivo da redução dos efeitos nocivos causados ao meio-ambiente.

Análises tais como as anteriores mostram que, através da construção do simulador, desenvolvido no decorrer deste trabalho, foi possível definir um modelo computacional baseado em simulação para avaliar o desempenho do sistema de distribuição

de gás LDG, conforme definido no objetivo principal deste trabalho. O modelo também se mostrou útil para a tomada de decisão sobre futuras expansões, sendo capaz de avaliar impactos sobre o sistema estudado devido ao aumento de demanda e capacidade. Isto torna a ferramenta bastante aplicável aos estudos de engenharia, visto que a usina tem passado por constantes expansões.

Dentre os objetivos específicos cumpridos neste estudo, pode-se constatar que a simulação a eventos discretos é aplicável a sistemas semi-contínuos, contanto que se faça a discretização adequada ao processo, tal como no presente trabalho.

Por todas as razões anteriormente expostas, conclui-se que este estudo contribui para o processo de distribuição de gás LDG, possibilitando prever, em um curto espaço de tempo, o comportamento do sistema mediante mudanças nos parâmetros operacionais e futuras expansões. Esta contribuição é também de interesse para a sociedade em geral, uma vez que auxilia na melhoria do desempenho de um processo no que se refere à redução de emissões atmosféricas.

Este estudo também acrescenta conhecimento sobre a simulação de processos contínuos em usinas siderúrgicas, onde este tipo de processo ocorre com frequência. Em especial, a pesquisa apresenta certo ineditismo, visto que são poucas as ocorrências de trabalhos acadêmicos envolvendo simulação de processos da área de utilidades da siderurgia.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Processos semelhantes ao de distribuição de LDG poderiam ser analisados através da abordagem de eventos contínuos, considerando-se inclusive a construção de *templates* adequados, tal como realizado nos estudos de Ramos (2003).

Recomenda-se a aplicação da técnica de simulação na análise de desempenho de outros processos do setor de utilidades de usinas siderúrgicas, tais como o setor de tratamento e distribuição de água, geração e distribuição de energia elétrica. A melhoria de desempenho destes processos pode trazer benefícios econômicos e ambientais.

Outra oportunidade de estudo é a construção de uma ferramenta, baseada em simulação, para a previsão do balanço energético de empresas do setor siderúrgico. Esta ferramenta pode se tornar especialmente útil, devido à característica complexa deste tipo de previsão.

REFERÊNCIAS

BANKS, J. et al. The Future of the Simulation Industry. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog03.htm>>. Acesso em: 01 mai. 2005.

BAPAT, Vivek. et al. The Arena Product Family: Enterprise Modeling Solutions. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog03.htm>>. Acesso em: 03 out. 2005.

BARTON, J. et al. Simulation: Past, Present and Future. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2003, New Orleans. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog03.htm>>. Acesso em: 01 mai. 2005.

BRUNNER, Daniel T.; SCHRIBER, Thomas J. Inside Discrete-Event Simulation Software: How it Works and Why it Matters. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington DC. **Anais eletrônicos ...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog04.htm>>. Acesso em: 8 out. 2005.

CARSON II, John S. Introduction to Modeling and Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington DC. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog04.htm>>. Acesso em: 21 abr. 2005.

CARVALHO, Duílio D. T. **Metodologia de Análise do Desempenho da Usina de Concentração da Samarco Mineração S.A. Baseada em Simulação das Operações**. 2003. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

CASTRO NETO, Laherce R. **Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro**. 2006. 191f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CST. **Sistema de Controle de Despacho de LDG**: Especificação Técnica. Serra, 2004.

CST. **Sistema de LDG**: Recuperação, Controle do Gasômetro, Booster e Distribuição para a CTE 1, 2, 3 e 4., Padrão de Operação. Serra, 2004.

FIORONI, Marcelo M. et al. Simulation of Continuous Behavior Using Discrete Tools: Ore Conveyor Transport. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2007, Washington DC. **Anais eletrônicos** ... Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog07.htm>>. Acesso em: 13 jul. 2007.

FRANZESE, Luiz A. G. et al. Simulation Based Decision for SteelMaking Operations Challenges. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, Washington D.C. **Anais Eletrônicos**... Disponível em: <<http://www.wintersim.org>>. Acesso em: 16 jul. 2006.

FREITAS FILHO, Paulo José de. **Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: Com Aplicações em Arena**. Florianópolis: Visual Books, 2001.

FURTADO, João S.; FURTADO, Marcelo C. **Gestão de Operações: A Engenharia de Produção a serviço da modernização da empresa**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

GAVIRA, Muriel de O. **Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento**. 2003. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

GORDON, Geoffrey. **System Simulation**. 1 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1969.

HARRIS, C. C. **The Application of Size Distribution Equations to Mult-event Comminution Processes**. Trans. AIME/SME, 241, 343-358, 1968.

JAIN, R. **The Art of Computer System Performance Analysis: Techniques for Experimental Design Measurements Simulation and Modeling**. New York: John Wiley & Sons, 1991.

KELTON, W. David et al. **Simulation With Arena**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

KUO, Stephen S. et al. Modeling Continuous Flow with Discrete-Event Simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2001, Arlington. **Anais Eletrônicos**... Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog01.htm>>. Acesso em: 27 mai. 2005.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. **Simulation Modelling and Analysis**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

MORAIS, Marcos A. C. **Análise da Operacionalidade do Terminal de Produtos Siderúrgicos do Porto de Praia Mole**. 2001. 77p. Monografia (Especialização Logística em Transportes). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2001.

MOREIRA, Cynara M. **Estratégias de Reposição de Estoques em Supermercados: Avaliação por Meio de Simulação.** 2001. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MORETTIN, Pedro A.; Bussab, Wilton O. **Estatística Básica.** 5 ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

NANCE, Richard E.; OVERSTREET, C. Michael. Characterizations and Relationships of World Views. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington DC. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog04.htm>>. Acesso em: 8 out. 2005.

NIKOUKARAN, Jalal et al. Criteria for Simulation Software Avaliation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998, Orlando. **Anais eletrônicos ...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog98.htm>>. Acesso em: 03 out. 2005.

ONO, Ricardo T. **Modelagem Sistêmica e Planejamento Logístico da Cadeia de Suprimentos de Petróleo.** 2007. 198f. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

PINTO JUNIOR, Orlando P. F. **Simulação e Otimização:** Desenvolvimento de uma Ferramenta de Análise de Decisão para Suprimento de Refinarias de Petróleo através de uma Rede de Oleodutos. 2001. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

PRADO, Darci. **Usando o Arena em Simulação.** 2 ed. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 2004.

PRITCHETT, Amy R. et al. Hybrid-System Simulation for National Airspace System Safety Analysis. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. **Anais eletrônicos ...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog00.htm>>. Acesso em: 29 mai. 2005.

RAMOS NETO, Augusto N. **Desenvolvimento de um Template no Programa Arena para a Simulação das Operações de Carregamento e Transporte em Minas a Céu Aberto.** 2003. 113f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

ROBINSON, S. **Simulation: The Practice of Model Development and Use.** England: John Wiley & Sons, 2004.

SANTORO, Miguel; MORAES, Luiz Henrique. Simulação de uma Linha de Montagem de Motores. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 7, n. 3, p. 338-351, dez. 2000.

SARGENT, Robert G. Validation and Verification of Simulation Models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2004, Washington DC. Anais eletrônicos ... Disponível em: <<http://www.wintersim.org/prog04.htm>>. Acesso em: 8 out. 2005.

SCARPE, Alencar A. **Análise do Desempenho Operacional de um Sistema de Produção de Aço com Lingotamento Convencional e Contínuo**. 1990. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.

SIQUEIRA, Junio G. H. de et al. Modelo Energético da CST para a fase de 7,5 Mt/ano. In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 15.; ENCONTRO DE PRODUTORES E CONSUMIDORES DE GASES INDUSTRIAIS, 9., 2004, Florianópolis. **Anais ...**. Florianópolis: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004. 1 CD-ROM.

STRACK, Jair. **GPSS: Modelagem e Simulação de Sistemas**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1984.

VAN BEEK, D. A.; ROODA, J. E. Languages and Applications In Hybrid Modelling and Simulation: Positioning of Chi. **Control Engineering Practice**, Eindhoven, v. 8, n.1, p. 81-91, 2000.

VERGARA, Sylvia C. **Projetos e Relatórios de Pesquisa em Administração**. São Paulo: Atlas, 2000.

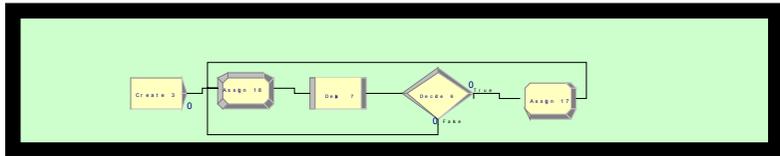
WOLFF, Juvenille F. **Simulação de uma Central de Atendimento: Uma Aplicação**. 2003. 81p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

APÊNDICE A - Sub-modelos construídos na simulação no Arena

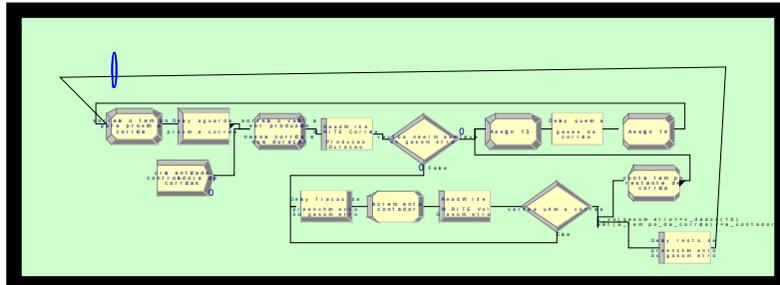
July 1, 2006

00:00:00

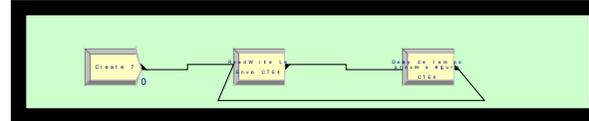
Lógica de Calculo de vazao media



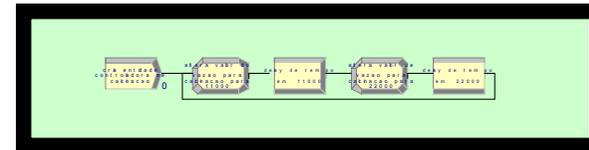
Lógica de Corridas



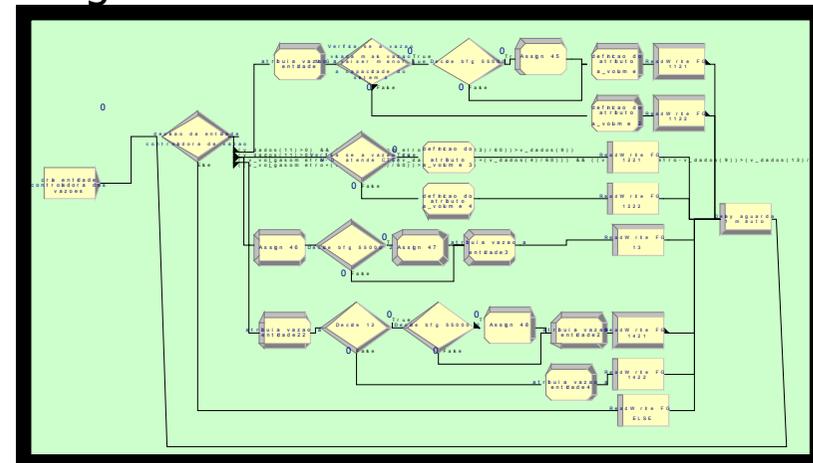
Lógica de controle de vazao CTE4



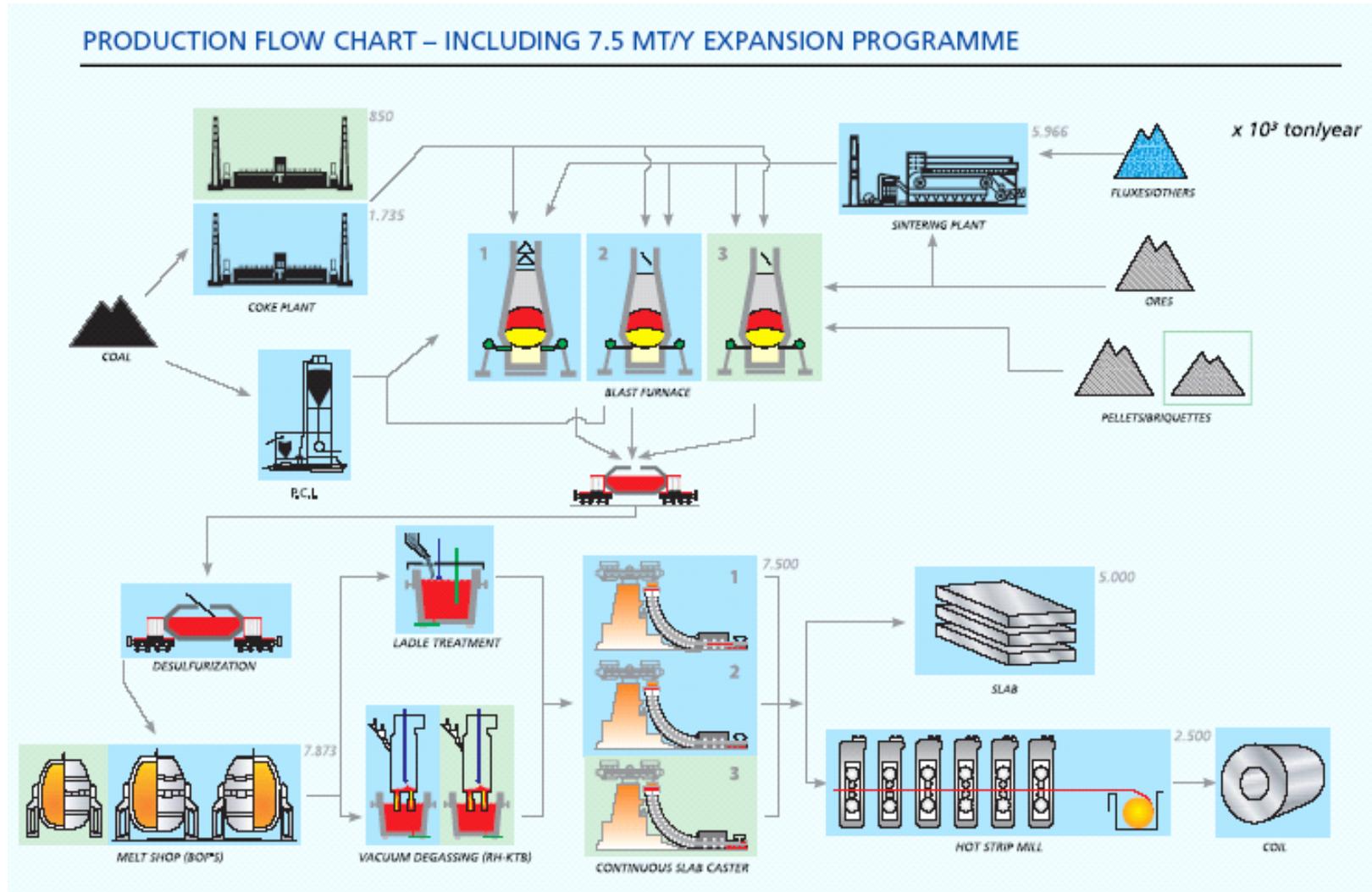
Lógica de controle Forno Adicional



Lógica de Fluxo de Gases



ANEXO A - Fluxograma Geral do Processo de Produção do Aço



Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)