USP

Campus de São Carlos

Especificação de Experimentos, Modelos e Interfaces Padrões Para o Apoio ao Planejamento da Produção no Setor Sucroalcooleiro, Via Simulação

MAMORU CARLOS YAMADA

Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço 26 / 11 / 04

Ass.:

ESPECIFICAÇÃO DE EXPERIMENTOS, MODELOS E INTERFACES PADRÕES PARA O APOIO AO PLANEJAMENTO DA PRODUÇÃO NO SETOR SUCROALCOOLEIRO, VIA SIMULAÇÃO

MAMORU CARLOS YAMADA

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

DEDALUS - Acervo - EESC

31100050063

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

São Carlos - SP

2004

Class. TESE EESC
Cutt. 6335
Tombo T291/04
Sysno 1411230

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

Y19e

Yamada, Mamoru Carlos
Especificação de experimentos, modelos e interfaces padrões para o apoio ao planejamento da produção no setor sucroalcooleiro, via simulação / Mamoru Carlos Yamada. -- São Carlos, 2004.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Simulação. 2. modelagem. 3. Indústria sucroalcooleira. 4. Planejamento da produção. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MAMORU CARLOS YAMADA**

Tese defendida e julgada em 26-08-2004 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO.

Prof. Titular **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **RENATO GOULART JASINEVICIUS**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Dra. **CREUSA SAYURI TAHARA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **ORIDES MORANDIN JUNIOR**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

Prof. Associado **ANTONIO BATOCCHIO**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Masanori e Shizuye,
meus maiores mestres.

À minha esposa Maria,
minha maior alegria.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Arthur José Vieira Porto, pela amizade, apoio e dedicada orientação durante a elaboração deste trabalho.

À minha família, pelo apoio e compreensão irrestritos em todos os momentos.

À minha esposa Maria, pelo carinho, amor, compreensão e paciência.

Aos amigos Beth, Sayuri, Mariella, Chin, Andréa, Rafael, João e Tiberti, pela grande amizade, pelo incentivo e pelas valiosas contribuições.

Aos amigos de ontem, de hoje e de sempre: Edílson, Orides, Lobão, Zé Luiz, Jandira, Anna Cristina, Tanaka, Valério, Vila, Mario, Kiko, Marcelo, Maeda, Ana Rita, Ravelli, Dennis, Sérgio, Silvia, Simone, Lincoln, Patrícia, Victor, Douglas, Renato, Luciana, pelo ótimo ambiente de trabalho e as boas discussões.

Aos graduandos Viviane, Juliano e Fabio, pelas contribuições nos modelos desenvolvidos neste trabalho.

À Diretoria, gerência e funcionários da Usina Santa Adélia SA e da Usina São Martinho SA, pela valiosa e atenciosa colaboração no fornecimento de dados.

À Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de estudo concedida.

A todos os colegas, professores e funcionários do Laboratório de Simulação e do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC/USP, pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS I

LISTA DE TABELAS VI

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS VIII

LISTA DE DEFINIÇÕES IX

RESUMO XI

ABSTRACT XII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Importância da indústria sucroalcooleira 1

1.2. Motivação / justificativa 4

1.3. Objetivos do estudo 5

1.4. Estrutura do trabalho 5

2. PROCESSO PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO 7

2.1. Cadeias produtivas do açúcar e do álcool 7

2.2. Planejamento da produção 10

2.3. Planejamento da produção na agroindústria 12

2.4. Planejamento da produção e atividades de tomada de decisão na indústria sucroalcooleira 14

2.5. Estágio atual da simulação na indústria sucroalcooleira 17

3. CONCEITOS BÁSICOS DE SIMULAÇÃO 20

3.1. Simulação de sistemas 20

3.2. Sistemas 20

3.3. Componentes de um sistema 22
3.3.1. Entidades e atributos 22
3.3.2. Recursos e filas de recursos 23
3.3.3. Variáveis 23
3.3.4. Eventos 24
3.3.5. Atividades e atrasos 24
3.4. Modelos 25
3.5. Classificação dos modelos de simulação 26
3.6. Especificação de um modelo de simulação 30
3.6.1. Alcance 30
3.6.2. Nível de detalhe 31
3.6.3. Grau de exatidão 31
3.6.4. Tipo de experimentação 31
3.7. Interfaces de um modelo de simulação 32
3.7.1. Entrada de dados 32
3.7.2. Saída de resultados 32
3.8. Passos para aplicação da simulação 33
4. PROJETO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO CUSTOMIZADO PARA O SETOR SUCROALCOOLEIRO 39
4.1. A proposta do ambiente de simulação 39
4.2. Implementação do ambiente de simulação 45
4.3. Processo de interação usuário / ambiente 48
4.4. Benefícios da utilização do ambiente de simulação 53
5. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS, MODELOS E INTERFACES PADRÕES 54
5.1. Etapa 1: Estudo e modelagem conceitual dos sistemas envolvidos 54
5.1.1. Plantio 56
5.1.2. Colheita 57
5.1.3. Recepção de matéria-prima 61
5.1.4. Extração 64
5.1.5. Tratamento de caldo 66

5.1.6. Fabricação de açúcar 67
5.1.7. Fabricação de álcool 70
5.1.8. Geração de vapor 73
5.2. Etapa 2: Análise da adequação da simulação aos objetivos dos modelos conceituais 75
5.3. Etapa 3: Caracterização das ferramentas de simulação 77
5.4. Etapa 4: Seleção do software de simulação 78
5.4.1. Análise preliminar 78
5.4.2. Análise detalhada dos critérios e dos simuladores 79
5.4.3. Escolha do software de simulação 80
5.5. Etapa 5: Definição dos experimentos, modelos e interfaces padrões 80
5.5.1. Definição do enfoque de modelagem 80
5.5.2. Definição do nível de detalhe 82
5.5.3. Identificação de elementos padrões 83
5.5.4. Identificação dos modelos padrões 86
5.6. Etapa 6: Implementação e teste dos modelos e interfaces padrões 99
5.6.1. Exemplo do 1º nível: Usina 100
5.6.2. Exemplo do 2º nível: Agrícola 125
5.6.3. Exemplo do 3º nível: Extração 138
6. CONCLUSÕES 150
6.1. Comentários e conclusões 150
6.2. Sugestões para futuros trabalhos 153
ANEXO A – ANÁLISE DOS SOFTWARES DE SIMULAÇÃO 154
ANEXO B – QUESTIONÁRIO DE CONSULTA ÀS USINAS 160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 166
OBRAS CONSULTADAS 172

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Diagrama do processo de modernização do sistema agrícola e agroindustrial (YAMADA, 1999) 3

FIGURA 2 – Arquétipo simplificado das cadeias produtivas do açúcar e do álcool (SAITO, 2000) 9

FIGURA 3 – Divisão do processo produtivo sucroalcooleiro (Adaptado de YAMADA, 1999) 10

FIGURA 4 – Diagrama do processo de planejamento da produção em uma indústria sucroalcooleira 15

FIGURA 5 – Definição de sistema 21

FIGURA 6 – Exemplo da relação entre eventos, atividades e variáveis 25

FIGURA 7 – Especificação de modelo, dados de entrada e medidas de desempenho 27

FIGURA 8 – Proposta de sistematização dos estudos de simulação (LOBÃO & PORTO, 1997) 34

FIGURA 9 – Ambiente de simulação com os 10 modelos padrões 41

FIGURA 10 – Exemplo de interface de interação do ambiente com o usuário para a entrada de dados 42

FIGURA 11 – Exemplo de interface para entrada de dados de uma análise de sensibilidade 43

FIGURA 12 – Exemplo de interface para entrada de dados de uma análise de desempenho 44

FIGURA 13 – Ambiente de programação do VBA® integrado ao Arena® 46

FIGURA 14 – Exemplo de programação no VBA, com procedimentos específicos para o Arena® 47

FIGURA 15 – Tela inicial do modelo padrão Usina 48

FIGURA 16 – Tela para seleção do tipo de análise 49

FIGURA 17 – Interface para entrada de dados para a análise de desempenho 50

FIGURA 18 – Entrada aleatória de dados segundo uma distribuição estatística triangular . 50

FIGURA 19 – Interface para gravação de resultados e finalização da análise 51

FIGURA 20 – Possibilidades de estratégias de análise no ambiente de simulação 52

FIGURA 21 – Metodologia de desenvolvimento do trabalho de pesquisa 55

FIGURA 22 – Modelo conceitual do sistema de plantio 56

FIGURA 23 – Modelo conceitual do sistema de colheita 58

FIGURA 24 – Curvas de maturação da cana-de-açúcar (DELGADO & CESAR, 1990)..... 59

FIGURA 25 – Modelo conceitual do sistema de recepção de matéria-prima 62

FIGURA 26 – Modelo conceitual do sistema de extração 64

FIGURA 27 – Modelo conceitual do sistema de tratamento de caldo 67

FIGURA 28 – Modelo conceitual dos sistemas de evaporação e cristalização 68

FIGURA 29 – Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 2 massas (COPERSUCAR, 1999). 69

FIGURA 30 – Diagrama simplificado do sistema de fabricação de açúcar com 3 massas (Adaptado de YAMADA, 1999) 70

FIGURA 31 – Modelo conceitual do sistema de fabricação de álcool 71

FIGURA 32 – Modelo conceitual do sistema de geração e distribuição de vapor 74

FIGURA 33 – Critérios de avaliação de software de simulação (Adaptado de NIKOUKARAN et. al., 1998) 78

FIGURA 34 – Esquema simplificado da estrutura hierárquica de desenvolvimento dos modelos padrões 81

FIGURA 35 – Primeiro nível hierárquico da modelagem do sistema produtivo sucroalcooleiro 87

FIGURA 36 – Segundo nível hierárquico – setor agrícola 88

FIGURA 37 – Segundo nível hierárquico – setor industrial 88

FIGURA 38 – Terceiro nível hierárquico – corte / carregamento 89

FIGURA 39 – Terceiro nível hierárquico – recepção de matéria-prima 91

FIGURA 40 – Terceiro nível hierárquico – extração 93

FIGURA 41 – Terceiro nível hierárquico – tratamento de caldo 95

FIGURA 42 – Terceiro nível hierárquico – fabricação de açúcar 96

FIGURA 43 – Terceiro nível hierárquico – fabricação de álcool 97

FIGURA 44 – Terceiro nível hierárquico – geração de vapor 98

FIGURA 45 – Área de trabalho, com os atalhos para os modelos padrões 100

FIGURA 46 – Ambiente de simulação com o modelo Usina 101

FIGURA 47 – Tela de seleção do tipo de análise 102

FIGURA 48 – Análise de desempenho "manual" 103

FIGURA 49 – Tela de configuração dos parâmetros para o modelo Usina 104

FIGURA 50 – Configuração do modelo Usina para a 1ª análise de desempenho 105

FIGURA 51 – Janela de instrução para a finalização da simulação 106

FIGURA 52– Tela do modelo Usina com os resultados da última replicação 106

FIGURA 53 – Janela para o salvamento dos resultados da simulação em arquivo Excel® 107

FIGURA 54 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 107

FIGURA 55 – Dados de entrada da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 109

FIGURA 56 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 110

FIGURA 57 – Dados de entrada da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 110

FIGURA 58 – Resultados da 3ª análise de desempenho "manual' do modelo Usina 111

FIGURA 59 – Dados de entrada da 3ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 112

FIGURA 60 – Seleção da análise de desempenho "arquivo" 115

FIGURA 61 – Definição do horizonte de tempo de simulação na análise de desempenho "arquivo" 115

FIGURA 62 – Dados de entrada para a 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina 116

FIGURA 63 – Janela de instrução para gravação de resultados 117

FIGURA 64 – Resultados da 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina 118

FIGURA 65 – Resultados da 2ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina 119

FIGURA 66 – Seleção da análise de sensibilidade 120

FIGURA 67 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo Usina 121

FIGURA 68 – Janela para gravação de resultados 122

FIGURA 69 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Usina..... 122

FIGURA 70 – Análise quantitativa dos efeitos significativos principais da análise de sensibilidade do modelo Usina 123

FIGURA 71 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Usina.. 124

FIGURA 72 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Usina..... 124

FIGURA 73 – Modelo padrão Agrícola 125

FIGURA 74 – Configuração de dados gerais do modelo Agrícola 126

FIGURA 75 – Configuração dos sistemas de carregamento e transporte do modelo Agrícola 127

FIGURA 76 – Configuração dos tempos de carregamento do modelo padrão Agrícola 127

FIGURA 77 – Configuração dos tempos de transporte e descarregamento do modelo Agrícola 128

FIGURA 78 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 129

FIGURA 79 – Dados de entrada para a 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 130

FIGURA 80 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 131

FIGURA 81 – Dados de entrada para a 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 132

FIGURA 82 – Resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo padrão Agrícola 134

FIGURA 83 – Dados de entrada para a análise de desempenho "arquivo" do modelo padrão Agrícola 134

FIGURA 84 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo padrão Agrícola 136

FIGURA 85 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Agrícola..... 137

FIGURA 86 – Análise quantitativa dos efeitos significativos na análise de sensibilidade do modelo Agrícola 137

FIGURA 87 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Agrícola 138

FIGURA 88 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Agrícola..... 138

FIGURA 89 – Modelo padrão Extração 139

FIGURA 90 – Configuração inicial do modelo Extração..... 140

FIGURA 91 – Configuração para opção de moagem do modelo Extração 140

FIGURA 92 – Configuração para opção de separação de caldos do modelo Extração..... 141

FIGURA 93 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração... 141

FIGURA 94 – Dados de entrada da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração 142

FIGURA 95 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração... 143

FIGURA 96 – Dados de entrada da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração 143

FIGURA 97 – Resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Extração 145

FIGURA 98 – Dados de entrada da análise de desempenho "arquivo"do modelo Extração 145

FIGURA 99 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo Extração 147

FIGURA 100 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Extração.. 148

FIGURA 101 – Análise quantitativa dos efeitos significativos da análise de sensibilidade do modelo Extração 148

FIGURA 102 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Extração 149

FIGURA 103 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Extração 149

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Adequação da simulação aos objetivos dos modelos conceituais do processo produtivo sucroalcooleiro 76

TABELA 2 – Elementos padrões do corte / carregamento 84

TABELA 3 – Elementos padrões da recepção de matéria-prima 85

TABELA 4 – Elementos padrões da extração 85

TABELA 5 – Elementos padrões do tratamento de caldo 85

TABELA 6 – Elementos padrões da fabricação de açúcar 86

TABELA 7 – Elementos padrões da fabricação de álcool 86

TABELA 8 – Elementos padrões da geração de vapor 86

TABELA 9 – Análise dos resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 108

TABELA 10 – Análise dos resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 111

TABELA 11 – Análise dos resultados da 3ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina 112

TABELA 12 – Erros de ajuste nas distribuições estatísticas das análises de desempenho "manual" do modelo Usina 113

TABELA 13 – Análise dos resultados para a 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina 118

TABELA 14 – Análise dos resultados para a 2ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina 120

TABELA 15 – Análise dos resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 130

TABELA 16 – Análise dos resultados da segunda análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola 133

TABELA 17 – Análise de resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Agrícola 135

TABELA 18 – Análise de resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração 142

TABELA 19 – Análise de resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração 144

TABELA 20 – Análise de resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Extração 146

TABELA 21 – Critérios para seleção de software de simulação – modelo 154

TABELA 22 – Critérios para seleção de software de simulação – entrada 155

TABELA 23 – Critérios para seleção de software de simulação – saída 155

TABELA 24 – Critérios para seleção de software de simulação – execução 156

TABELA 25 – Critérios para seleção de software de simulação – animação 157

TABELA 26 – Critérios para seleção de software de simulação – testabilidade 158

TABELA 27 – Critérios para seleção de software de simulação – eficiência 158

TABELA 28 – Critérios para seleção de software de simulação – usuário 159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COPERSUCAR - Cooperativa de Produtores de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo

LISTA DE DEFINIÇÕES[1]

Açúcares redutores	Substâncias redutoras de cana-de-açúcar e seus produtos, constituídas principalmente por glicose e frutose, que tem a propriedade de reduzir o cobre em solução cúprica (Licor de Fehling) e calculadas como açúcar invertido.
Brix	Porcentagem em massa de sólidos solúveis contida em uma solução de sacarose quimicamente pura.
Caldo primário	Caldo não diluído, extraído na primeira unidade de esmagamento do conjunto de moendas.
Caldo misto	Caldo obtido no processo de extração e enviado para a fabricação.
Caldo secundário	Caldo diluído com água, extraído nas unidades de esmagamento do conjunto de moendas, com exceção da primeira.
Caldo sulfitado	Caldo que contém certa quantidade de anidrido sulfuroso integrado ao caldo misto, após passagem pela coluna de sulfitação.
Caldo clarificado	Caldo resultante do processo de clarificação.
Caldo filtrado	Caldo obtido nos filtros como resultado da filtração do lodo.
Embebição	Processo no qual a água ou caldo é aplicado ao bagaço em benefício da extração.
Fibra	Matéria seca e insolúvel em água contida na cana-de-açúcar.
Grau Gay-Lussac	Porcentagem em volume de álcool presente numa mistura hidroalcoólica.
Lodo	Fração pesada obtida da decantação do caldo, constituída de material insolúvel sedimentado.

---

[1] Fonte: COPERSUCAR (2001a). *Manual de métodos analíticos* - Controle químico da fermentação (CD ROM). Piracicaba, SP.
COPERSUCAR (2001b). *Manual de controle químico da fabricação de açúcar* (CD ROM). Piracicaba, SP.

Magma	Mistura de açúcar com xarope, caldo clarificado, água ou mel, para ser usada como pé de cozimento.
Massa cozida	Produto resultante da concentração de xarope ou mel constituído de cristais de açúcar envoltos no mel-mãe.
Mel	Solução resultante da centrifugação da massa cozida.
Mel final ou melaço	Mel obtido da massa cozida final e do qual não se retira mais açúcar.
Mosto	Líquido açucarado capaz de sofrer fermentação.
Peso normal	Massa de sacarose quimicamente pura que, dissolvida em 100 ml de água, a 20°C, e colocada em tubo polarimétrico de 200 mm de comprimento, provoca um desvio de 100°S no sacarímetro. Na escala internacional de açúcar, o peso normal é de 26,000 g.
Pol	Porcentagem em massa de sacarose aparente, contida em uma solução açucarada de peso normal, determinada pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração da luz polarizada.
Pureza	Relação entre a porcentagem em massa de sacarose e a de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada.
Torta	Resíduo obtido da filtração do lodo dos decantadores.
Vinho	Líquido obtido após fermentação do mosto e separação de levedura.
Xarope	Material resultante da evaporação parcial do caldo clarificado de consistência aproximada de 65°Brix.

RESUMO

YAMADA, M. C. (2004). Especificação de experimentos, modelos e interfaces padrões para o apoio ao planejamento da produção no setor sucroalcooleiro, via simulação. São Carlos, 2003. Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho propõe a especificação e a criação de experimentos, modelos e interfaces padrões para o apoio ao processo de planejamento da produção de um sistema produtivo sucroalcooleiro, via simulação. Os modelos abrangem os setores agrícola e industrial das usinas sucroalcooleiras, da colheita da matéria-prima até a fabricação do açúcar e do álcool. A modelagem do sistema, utilizando softwares comerciais de simulação com flexibilidade de recursos para customização, visa a geração de um ambiente de simulação para análises de desempenho e de sensibilidade. Os modelos padrões que compõem este ambiente de simulação permitem que sejam realizadas simulações em 3 diferentes escopos, desde a usina, passando pelos setores agrícola e industrial, e chegando ao nível dos processos de corte / carregamento, recepção de matéria-prima, extração, tratamento de caldo, fabricação de açúcar, fabricação de álcool e geração de vapor. A interação do usuário com o ambiente, por meio de interfaces amigáveis, tem como função fornecer ao planejador uma opção de ferramenta de trabalho simples e de fácil aplicação, que possibilita a obtenção de informações úteis sobre o comportamento e das inter-relações entre as principais variáveis que influenciam o desempenho do sistema, permitindo a escolha das opções mais adequadas na busca de melhorias.

Palavras-chave: simulação; modelagem; indústria sucroalcooleira; planejamento da produção.

ABSTRACT

YAMADA, M. C. (2004). *Specification of standard experiments, models and interfaces for supporting to the production planning in the sugar cane industry, through simulation.* São Carlos, 2003. Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work proposes the specification and generation of standard experiments, models and interfaces for supporting to the process of production planning in the sugar cane industry, through simulation. Models embrace the agricultural and industrial sections of sugar cane plants, since the cane harvesting until the sugar and alcohol production. The system modelling, using commercial simulation softwares with flexibility of customization resources, seeks the generation of a simulation environment for performance and sensibility analyses. Standard models that compose this simulation environment allow simulations to be accomplished in 3 different scopes, from the plant, passing by the agricultural and industrial sections, and arriving at the level of the processes: cutting / loading, raw material reception, extraction, juice treatment, sugar production, alcohol production and stream generation. The user's interaction with the simulation environment through friendly interfaces, has the function of supplying the planner with an ease-to-use tool option, that makes possible the obtaining of useful information about the behavior and the interrelations among the principal variables that influence the system performance, allowing the choice of the most appropriate options in the search of improvements.

Keywords: simulation; modeling; sugar cane industry; production planning.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Importância da indústria sucroalcooleira

Os sistemas produtivos, nas últimas décadas, vêm sofrendo grandes alterações em suas características de processo, em função de diversas mudanças no mercado: aumento da competitividade, necessidade de uma maior variedade de produtos fabricados e a predominância de produtos individualizados. Atualmente, as empresas têm que reagir rapidamente, mantendo baixos níveis de custos de produção, a fim de poder competir em um mercado cada vez mais dinâmico.

Na agroindústria o cenário não é diferente. A abertura do mercado e a rápida evolução da ciência têm pressionado os produtos agrícolas e as suas respectivas cadeias produtivas por maior competitividade e desenvolvimento tecnológico (PORTUGAL, 1998). Deste modo, a necessidade da implantação de alternativas de técnicas, equipamentos e recursos que beneficiem o planejamento e controle do processo produtivo, faz-se presente devido às pressões de mercado, onde a busca por incrementos na produtividade e na melhoria da qualidade dos produtos foi adotada por várias agroindústrias como uma estratégia para manterem-se competitivas.

O setor sucroalcooleiro constitui-se, atualmente, no principal negócio agroindustrial nacional, movimentando cerca de 36 bilhões de reais por ano, com faturamentos diretos e indiretos, o que corresponde a 3,5% do PIB brasileiro (UM MERCADO ..., 2004). O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e o principal país do mundo a implantar, em larga escala, um combustível renovável (etanol), alternativo ao petróleo (UM MERCADO ..., 2004). Na safra 2003/2004, as exportações de açúcar atingiram 14,5 milhões de toneladas, fazendo com que o Brasil assumisse a liderança no comércio internacional deste produto (CONHEÇA ..., 2004).

O setor pode ser dividido em duas regiões (WAACK et al., 1998): Norte/Nordeste, voltada para a produção de açúcar para exportação; e Centro/Sul, também voltada para a produção de álcool como alternativa energética. Com a liberação de mercado e o crescente

aumento da eficácia produtiva, o Centro/Sul ultrapassou o Norte/Nordeste nas exportações de açúcar, configurando um cenário de conflito entre as regiões.

A busca por novas estratégias de crescimento na indústria sucroalcooleira tornou-se mais clara a partir do final da década de 80, com a crise do Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), onde diversas usinas e destilarias promoveram a diversificação de suas atividades econômicas por meio do processamento e comercialização dos subprodutos (VIAN, 1997), além da implantação de novas tecnologias agrícolas e industriais, com efeito no aumento da produtividade (EID, 1996).

Contrastando com o panorama de modernização em curso, muitos dos conjuntos de conhecimentos do campo da ciência e da tecnologia ainda aguardam novas soluções para viabilizar a sua incorporação ao desenvolvimento do sistema produtivo das usinas sucroalcooleiras (figura 1), face ao conflito gerado entre as pressões exercidas por fatores externos, que demandam um poder de competitividade cada vez mais crescente, e as limitações internas das indústrias sucroalcooleiras nos aspectos de capacidade produtiva, efetividade de produção e estágio tecnológico, entre outros (YAMADA, 1999).

A agroindústria sucroalcooleira constitui-se numa atividade econômica que se caracteriza pela combinação de atividades do setor primário (plantio, colheita) com atividades do setor secundário (extração, concentração, destilação), interligadas por um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar. Assim, o planejamento da produção em indústrias sucroalcooleiras pode ser entendido como a tentativa de se prever o comportamento de um sistema híbrido constituído por uma combinação de processos contínuos e discretos.

Outro aspecto importante do processo produtivo sucroalcooleiro é a sazonalidade no período de produção: na época de safra, a usina trabalha com sua maior capacidade e na entressafra faz sua manutenção e gerencia seu estoque (SAITO, 2000). Assim, torna-se inviável a tentativa de experiências muito inovadoras durante o período produtivo. Neste contexto, diversos estudos investigam alternativas de planejamento por meio da utilização de ferramentas de simulação (CAMARGO et al., 1990; MILAN, 1992; UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1992; LOPES, 1995; HIGGINS et al., 1998; MUCHOW et al., 1998; BRAGA, 1999; HAHN & RIBEIRO, 1999; KEATING et al., 1999; LISSON et al., 2000; SAITO, 2000; IANONNI & MORABITO, 2002) como apoio na busca de uma melhor compreensão do sistema sucroalcooleiro, sendo possível analisar opções de planejamento sem intervir no sistema produtivo real.

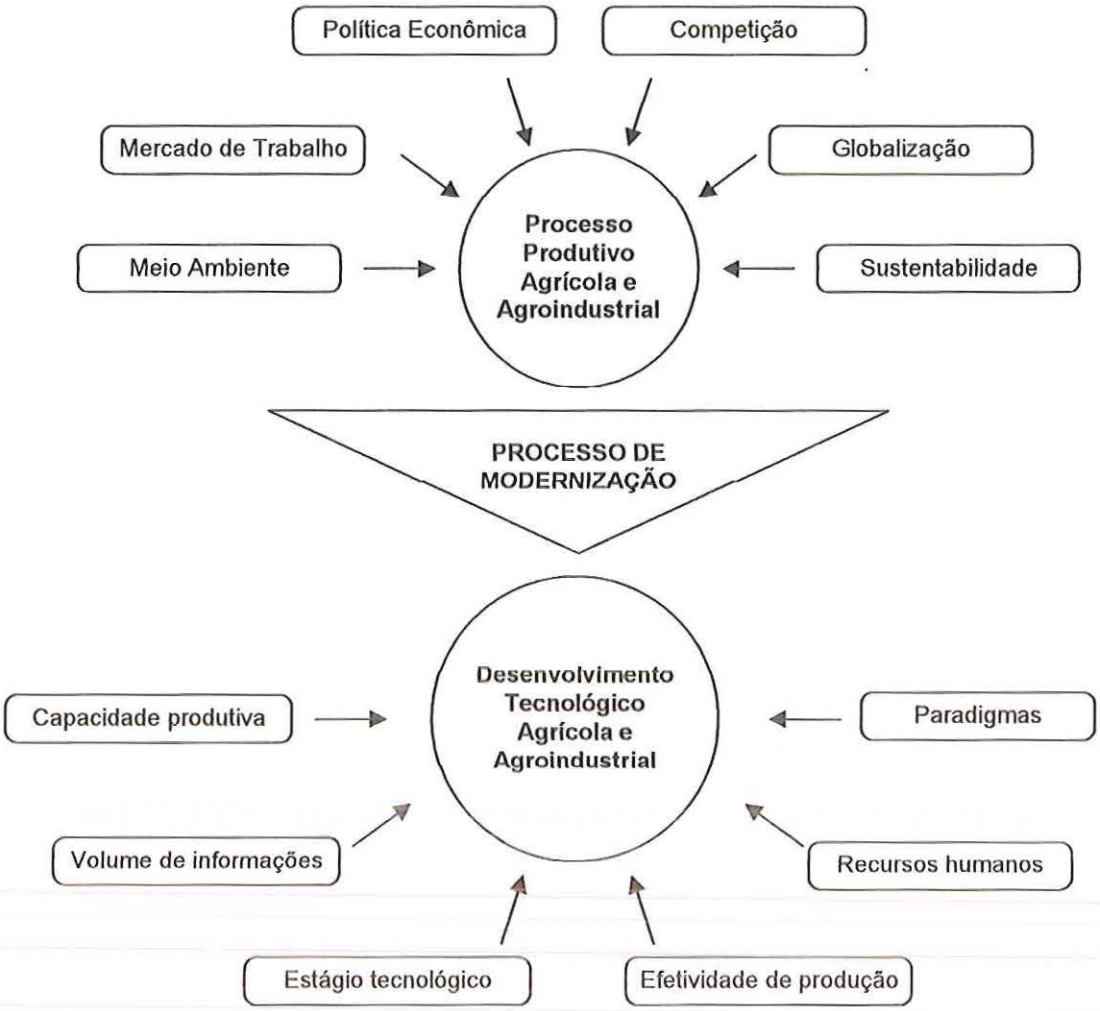

FIGURA 1 – Diagrama do processo de modernização do sistema agrícola e agroindustrial (YAMADA, 1999)

Um aspecto relevante a ser observado é que os estudos normalmente se concentram em determinada etapa do sistema, tais como balanço de massa e energia ou logística de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. Processos, operações, recursos e outros fatores externos ao estudo e que aparentemente têm pouca ou nenhuma influência são considerados de forma simplificada ou mesmo ignorados, limitando-se a abrangência e o alcance do estudo e as possibilidades de aquisição de conhecimento sobre os processos envolvidos e suas inter-relações.

Este trabalho procurou contribuir no sentido de ampliar a abrangência dos estudos citados, com a geração de um ambiente de simulação customizado que permita, dentro de uma visão integrada dos setores agrícola e industrial das usinas sucroalcooleiras, a

simulação e análise de opções de planejamento da produção que resultem em melhor desempenho.

Devido à complexidade do sistema em estudo e ao grande volume de dados e informações a serem coletados, foi necessário enfocar o desenvolvimento do ambiente na análise da produção dos produtos principais: açúcar, álcool e bagaço. Assim, aspectos relacionados ao balanço energético (ciclo de vapor e de água) não foram incluídos. Estes podem fazer parte de uma futura ampliação do estudo.

Na execução do estudo utilizou-se o simulador comercial Arena®, que é baseado nos conceitos de simulação de eventos discretos (LAW & KELTON, 1991; BANKS, 1998; PRITSKER, 1998), e que forneceu as condições para a geração dos modelos e interfaces padrões para as aplicações específicas do ambiente de simulação do processo produtivo sucroalcooleiro.

1.2. Motivação / justificativa

O trabalho teve como motivação um conjunto de aspectos relativos aos recursos tecnológicos e humanos que convergiram para o local de desenvolvimento da pesquisa, o Laboratório de Simulação de Sistemas Discretos, do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. A convergência destes fatores, que estão comentados a seguir, se coloca como uma grande oportunidade para o desenvolvimento da presente pesquisa.

O estado de São Paulo é o principal centro sucroalcooleiro do Brasil, sendo responsável por, respectivamente, 58,9%, 62,0% e 60,6%, da cana-de-açúcar, do açúcar e do álcool produzidos no país (UNICA, 2004).

A cidade de São Carlos, dentro do estado, está posicionada estrategicamente em relação ao setor sucroalcooleiro, pois se encontra a pouco mais de 100 quilômetros de distância das cidades de Ribeirão Preto e Piracicaba, que são as principais regiões sucroalcooleiras do país.

Além da posição geográfica estratégica, São Carlos conta com duas Universidades Públicas de alta competência tecnológica e humana, que possuem diversos trabalhos na área sucroalcooleira.

Outro aspecto motivador para o desenvolvimento do trabalho é a estrutura adequada de equipamentos e de recursos humanos que possui o Laboratório de Simulação de Sistemas Discretos, que atendem os requisitos necessários para as etapas que envolveram os estudos de simulação.

Finalmente, o autor possui experiência profissional na área sucroalcooleira, onde trabalhou por cerca de 4 anos, tendo adquirido conhecimentos sobre o processo produtivo que é o objeto da pesquisa.

1.3. Objetivos do estudo

O presente estudo teve como objetivo contribuir tecnologicamente com a especificação de experimentos, modelos e interfaces padrões para a utilização da simulação como ferramenta de apoio ao processo de planejamento da produção. Esta especificação deve possibilitar:

- a geração de um ambiente de simulação para análises de desempenho e de sensibilidade nos diversos setores e processos do setor sucroalcooleiro, fornecendo ao planejador uma opção de ferramenta de trabalho simples e de fácil aplicação, para análises em diferentes escopos, desde a colheita da matéria-prima no campo até a obtenção de açúcar e de álcool na usina, sem a necessidade de grandes conhecimentos sobre simulação e linguagens de programação;
- o fornecimento de informações sobre o comportamento dos diversos parâmetros envolvidos, permitindo ao profissional do setor de planejamento analisar e escolher as opções mais adequadas na busca do melhor desempenho do sistema;
- a geração de modelos que caracterizem, de forma integrada, o funcionamento do sistema produtivo sucroalcooleiro.

1.4. Estrutura do trabalho

Esta tese está estruturada em 5 capítulos.

O capítulo 2 o processo produtivo sucroalcooleiro é apresentado, enfatizando-se as atividades produtivas e de tomada de decisão que compõem o planejamento da produção na indústria sucroalcooleira, além do panorama atual do setor em relação às tecnologias aplicadas e à utilização da simulação nas suas atividades agrícolas e industriais.

No capítulo 3, são apresentados conceitos básicos sobre simulação de sistemas, descrevendo aspectos e informações importantes para o presente trabalho.

A proposta do ambiente de simulação é detalhada no capítulo 4. São abordados os aspectos da implementação e da forma de interação do usuário com o ambiente.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento dos experimentos, modelos e interfaces padrões é apresentada no capítulo 5, onde são descritos os passos desenvolvidos.

O capítulo 6 apresenta comentários e conclusões sobre o trabalho, além de sugestões para a ampliação e/ou desdobramento deste trabalho, assim como de novos projetos baseados neste trabalho.

2. PROCESSO PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO

2.1. Cadeias produtivas do açúcar e do álcool

A crescente competitividade no setor agroindustrial brasileiro tem forçado os produtores agrícolas e de alimentos a analisar alternativas para redução de custos de produção e de distribuição, em que os investimentos devem ultrapassar os limites da produção, e englobar a cadeia produtiva agroindustrial como um todo.

Uma cadeia produtiva é representada por agentes ligados por elos. Os agentes são produtores de matérias-primas e produtos processados industrialmente, intermediários comerciais do atacado e de varejo e o consumidor final (ALVES, 1997). Os elos representam os fluxos físicos de materiais e de informações para movimentação destes materiais, bem como para efetivação das transações comerciais. Desta forma, a lógica de encadeamento das operações técnicas, logísticas e comerciais deve situar-se sempre de jusante (consumidor final) a montante (zonas de produção), colocando o consumidor final como principal indutor de mudança no sistema (BATALHA, 1997). Assim, a cadeia produtiva agroindustrial apresenta três macrossegmentos (ALVES, 1997; BATALHA, 1997):

- Comercialização: representam as empresas pertencentes aos canais de distribuição compostos por centrais de fornecimento, intermediários comerciais, cooperativas e empresas em contato direto com o consumidor final.
- Industrialização: representam empresas que se ocupam com o processamento de matéria-prima advinda da produção primária, resultando em insumos para outras indústrias ou produtos finais destinados ao consumidor.
- Produção de matérias-primas: refere-se a empresas de produção de matéria-prima, que são fornecedoras às indústrias de processamento e/ou beneficiamento, agroindústrias, centrais de fornecimento e consumidor final, por meio ou não de intermediação comercial.

Segundo BATALHA (1997), dentro de uma cadeia produtiva agroindustrial típica podem ser visualizados no mínimo quatro mercados com diferentes características:

mercado entre os produtores de insumos e os produtores rurais, mercado entre produtores rurais e agroindústria, mercado entre agroindústria e distribuidores e, finalmente, mercado entre distribuidores e consumidores finais. O estudo das características destes mercados representa uma ferramenta poderosa para compreender a dinâmica de funcionamento da cadeia produtiva agroindustrial.

Uma característica importante de uma cadeia produtiva agroindustrial é o enfoque sistêmico, que considera que todo sistema evolui no espaço e no tempo em função de mudanças internas e externas ao sistema. A análise de cadeias produtivas deve, portanto, estudar o equilíbrio existente no sistema em determinada situação para identificar as condições que podem alterar este equilíbrio e, a partir deste estudo, elaborar predições sobre o futuro da cadeia em questão.

Dentre as diversas utilizações do conceito de cadeia produtiva, este trabalho utiliza a cadeia produtiva como o conjunto de operações técnicas responsáveis pela transformação da matéria-prima em produto acabado ou semi-acabado (BATALHA, 1997). Assim, o sistema produtivo associado a uma cadeia produtiva agroindustrial tem como unidade de análise, de construção do sistema e de definição da sua "arquitetura", as várias operações que definem o conjunto das atividades nas quais a empresa está inserida. O posicionamento da empresa dentro do sistema é facilmente identificável por meio da observação das operações pelas quais a empresa é responsável no conjunto das atividades necessárias à elaboração do produto final.

Complementando este tipo de análise, pode-se considerar uma cadeia produtiva não somente como uma ferramenta de descrição técnica, mas também como ferramenta de análise econômica. Dentro deste contexto, PARENT[2] apud BATALHA (1997) define uma cadeia produtiva como sendo "a soma de todas as operações de produção e de comercialização que foram necessárias para passar de uma ou várias matérias-primas de base a um produto final, isto é, até que o produto chegue às mãos de seu usuário (seja ele um particular ou uma organização)".Por outro lado, MORVAN[3] apud BATALHA (1997) propõe que uma análise das cadeias produtivas seja baseada em três fatores: a tecnologia, os mercados e os produtos, em que a superposição destes elementos definiria uma cadeia produtiva dentro de uma visão estática. A visão dinâmica seria representada pela consideração simultânea destes aspectos ao longo do tempo. Assim, uma modificação em qualquer destes fatores poderia afetar diretamente os outros dois e, desta forma, relançar a dinâmica interna de funcionamento da cadeia produtiva.

---

[2] PARENT, J. (1979). Filière de produits, stades de production et branches d'activité. *Revue d'Economie Industrielle*, n. 7, p. 89 apud BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial*. São Paulo, Atlas, p. 39.
[3] MORVAN, Y. (1988). *Foundements d'economie industrielle*. Paris, Economica apud BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial*. São Paulo, Atlas, p. 40.

As cadeias agroindustriais do açúcar e do álcool podem ser representadas por um arquétipo simplificado com três elos, conforme a figura 2 (SAITO, 2000):

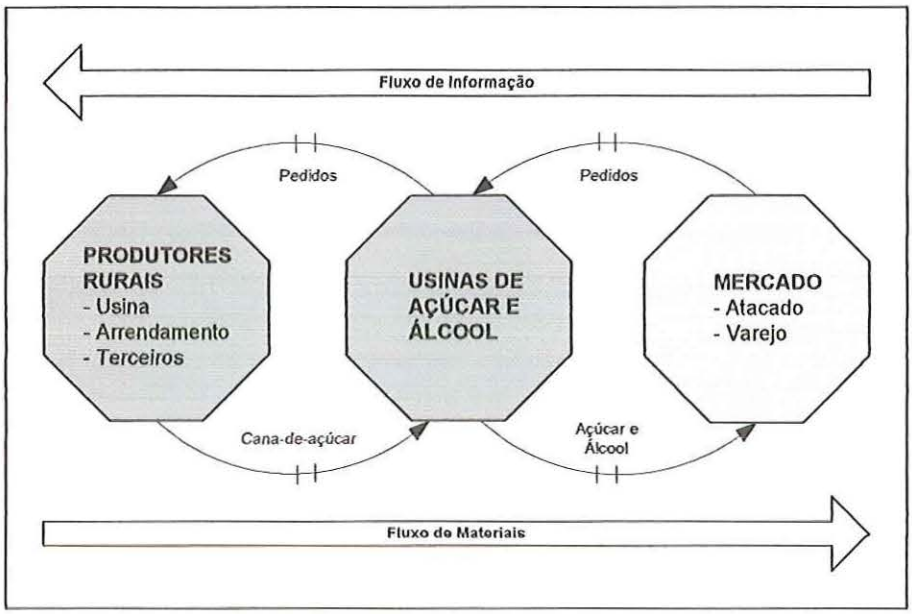

FIGURA 2 – Arquétipo simplificado das cadeias produtivas do açúcar e do álcool (SAITO, 2000)

- Insumo, representado por produtores rurais (usina, terceiros e arrendados), cujo principal componente é a própria cana-de-açúcar;
- Usinas, representadas por usinas de açúcar e álcool;
- Mercado, cujos agentes são representados por empresas de atacado e varejo.

Neste trabalho, a divisão acima foi adaptada para uma divisão prática utilizada nas empresas sucroalcooleiras. Assim, o processo produtivo sucroalcooleiro pode ser descrito como uma seqüência de operações unitárias: agrícolas (elo Insumo e Interface Insumo/Usinas) e industriais (elo Usinas), representadas no diagrama da figura 3 (YAMADA, 1999).

Como o enfoque deste trabalho é a produção de açúcar, álcool e bagaço, a figura 3 apresenta o fluxo da matéria-prima até a obtenção dos produtos finais, além do fluxo de vapor. Outros elementos importantes, como o fluxo de água, não foram representados de modo a permitir uma melhor visualização dos processos.

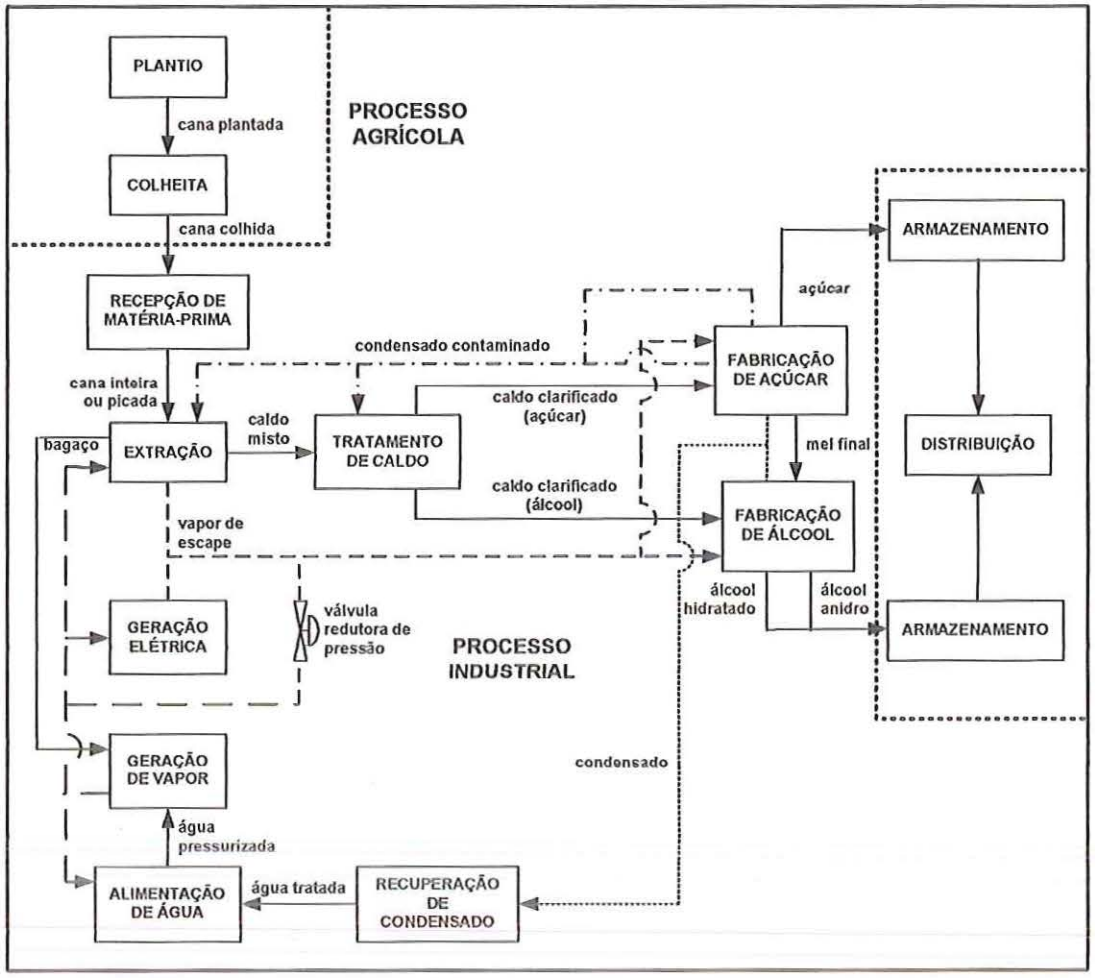

FIGURA 3 – Divisão do processo produtivo sucroalcooleiro (Adaptado de YAMADA, 1999)

Descrições mais detalhadas das operações e equipamentos podem ser encontradas em MEADE & CHEN (1977), HUGOT (1977), COPERSUCAR (1987a, 1987b e 1993), DELGADO & CESAR (1990) e YAMADA (1999).

2.2. Planejamento da produção

O processo de desenvolvimento do planejamento da produção nas organizações tem se mostrado muito dinâmico, onde muitas variáveis interagem umas com as outras, numa relação não raramente complexa. A análise e ponderação sobre tais variáveis e suas inter-relações levam a uma definição de parâmetros a serem implementados e/ou controlados de tal forma a satisfazer as previsões de produção.

A efetiva implantação do planejamento da produção proposto gera um conjunto de informações sobre o funcionamento real do sistema, bem como o comportamento e a influência das variáveis analisadas neste sistema. Este processo fornece subsídios para a

identificação e a conseqüente correção de falhas e/ou inadequações que possam ter ocorrido durante o período do planejamento.

Este processo interativo pode tornar-se trabalhoso e ineficiente, à medida que aumenta a complexidade do sistema, pois, em muitas vezes, não permite uma clara identificação da influência conjunta das variáveis, bem como tendências que as mesmas possam apresentar ao longo do tempo.

O conceito de planejamento e controle em sistemas produtivos é abordado por diversos autores.

Segundo BURBIDGE (1981), "controle da produção é a função da administração que planeja, dirige e controla o suprimento de materiais e as atividades de processo de uma empresa, de modo que produtos específicos sejam produzidos por métodos específicos para atender um programa de vendas aprovado, sendo essas atividades realizadas de tal maneira que a mão-de-obra, os equipamentos e o capital disponíveis sejam empregados com o máximo aproveitamento".

Para GERELLE & STARK (1988), o papel do planejamento e controle da produção é efetivamente planejar e controlar os recursos atuais da fábrica (materiais, ferramentas, instalações, máquinas e pessoas) para satisfazer os requisitos de produção, assegurando que materiais e recursos adequados estejam disponíveis para satisfazer a demanda e que a informação esteja disponível para prever estas necessidades, bem como que o sistema opere de forma ótima.

Segundo CHIAVENATO (1990), o planejamento e controle da produção é um conjunto de funções integradas que visam orientar o processo produtivo, avaliando, monitorando e corrigindo continuamente o seu desempenho, em função dos objetivos da empresa e dos recursos empresariais disponíveis, procurando compatibilizar a eficácia (alcance dos objetivos) e a eficiência (utilização rentável dos recursos disponíveis). Nesse sentido, o planejamento e controle da produção procura considerar e integrar máquinas, pessoas, matéria-prima, materiais em vias e processos produtivos em um todo sistêmico e harmonioso, sofrendo a influência de alguns fatores importantes, tais como: previsão de demanda, capacidade de produção, disponibilidade de matérias-primas e recursos financeiros.

Segundo SLACK et al. (1997), o propósito do planejamento e controle é garantir que a produção ocorra eficazmente e produza produtos e serviços como deve, o que requer que os recursos produtivos estejam disponíveis na quantidade adequada, no momento adequado e no nível de qualidade adequado, buscando-se, desta forma, atingir os objetivos competitivos e estratégicos de qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e custo. As atividades de planejamento e controle proporcionam os sistemas, procedimentos e decisões que conectam recursos, capazes de fornecer bens e serviços, com a demanda para a qual

foram projetados para satisfazer, considerando-se as limitações de custos, de capacidade, de tempo e de qualidade.

Para o mesmo autor, um planejamento é uma formalização de o que se pretende que aconteça em determinado momento no futuro. Logo, ele está sujeito a variáveis (consumidores, fornecedores, equipamentos, etc) que o influenciam, gerando a necessidade de um controle, que é o conjunto de ações que visam o direcionamento do plano. O controle inclui o monitoramento do que aconteceu na realidade, a comparação com o que fora planejado e as ações para providenciar as mudanças necessárias de realinhamento do plano.

Uma das mais objetivas e completas definições de planejamento, adotada neste trabalho, é dada por ACKOFF (1979): "O planejamento é um processo sistemático que envolve a contínua avaliação de alternativas e a tomada de um conjunto de decisões inter-relacionadas, antes que a ação se faça, em um momento que se acredita que uma futura situação desejável provavelmente não ocorrerá, a menos que alguma coisa seja feita e que, sendo tomada a providência adequada, a probabilidade de um resultado favorável pode ser aumentada". Dentro desta visão, apresenta-se uma divisão do planejamento em:

- Fins: especificação dos objetivos e metas.
- Meios: seleção de políticas, programas, procedimentos e práticas pelas quais os objetivos e metas devem ser alcançados.
- Recursos: determinação dos tipos e quantidades dos recursos necessários, como devem ser gerados ou obtidos e como devem ser alocados às atividades.
- Instrumentos: definição dos procedimentos decisórios e o modo de organizá-los para que o plano possa ser realizado.
- Controle: definição de procedimentos para prevenir ou detectar erros ou falhas para evitá-los permanentemente.

2.3. Planejamento da produção na agroindústria[4]

Para mercados consolidados, em geral, a oferta excede à demanda. Neste caso, a o mercado consumidor torna-se mais exigente, pressionando as empresas a buscarem: redução de custos, manutenção de alto padrão de qualidade e confiabilidade, redução de prazos de entrega, aumento na flexibilidade de produção e de mix de produtos, e melhorias das técnicas de fabricação e controle.

[4] Adaptado de STAHLBERG FILHO, P. (1997). Planejamento e controle da produção. In: BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial*. São Paulo, Atlas, Cap. 6, p. 263-348.

No caso específico de alguns setores da agroindústria, particularmente a indústria agroalimentar, deve-se associar a estes fatores a característica de perecibilidade de matéria-prima, perecibilidade do produto, sazonalidade de oferta de matéria-prima, sazonalidade de consumo e outros fatores que tomam a gestão da produção destas empresas uma matéria ainda mais complexa e com um número de variáveis a ser considerado ainda maior.

Nas agroindústrias, geralmente, a matéria-prima representa uma parcela importante da estrutura de custos dos produtos, o que exige um controle rigoroso do fluxo de abastecimento. Alguns problemas relacionados a esta questão são:

- instabilidades climáticas;
- variabilidade na qualidade;
- disponibilidade;
- perecibilidade;
- altos custos de manutenção de estoques;
- logística de fornecimento, em função da distância e diversificação geográfica das suas fontes.

Em relação aos produtos acabados, um desafio é a formação de estoques para atender aos picos de consumo. Em grande parte dos casos, a armazenagem de produtos deve ter condições climáticas controladas devido à perecibilidade, o que onera substancialmente os custos fixos de energia e manutenção, fazendo com que os problemas de estoques intermediários tenham uma importância vital para as agroindústrias.

Uma outra característica que afeta de maneira importante as agroindústrias é aquela ligada à qualidade dos produtos, que pode comprometer diretamente a saúde do consumidor. Assim, o poder público tende a exercer um controle rigoroso da qualidade final deste produto por meio de rigorosas normas de produção e comercialização.

Por outro lado, o número relativamente baixo de matérias-primas de base utilizadas por grande parte das agroindústrias, aliado, em boa parte, a processos contínuos ou semicontínuos de produção, facilita, em termos, a tarefa de seqüenciamento e de controle do fluxo de produção internamente à empresa.

Desta forma, uma análise de toda a cadeia agroindustrial deve procurar integrar o processo de planejamento da produção rural ou agrícola e ainda os distribuidores, englobando a logística de chegada de matéria-prima e de distribuição dos produtos agroindustriais.

2.4. Planejamento da produção e atividades de tomada de decisão na indústria sucroalcooleira

A agroindústria sucroalcooleira constitui-se numa atividade econômica que utiliza a cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de açúcar e álcool. Caracteriza-se pela combinação de atividades do setor primário (plantio, colheita) com atividades do setor secundário (extração, concentração, fermentação, destilação), interligadas por um sistema de carregamento e transporte de cana. A auto-suficiência energética durante o período produtivo, através da geração de energia com a queima do bagaço, é outra característica típica deste tipo de organização.

Assim, o planejamento da produção em indústrias sucroalcooleiras pode ser entendido como a tentativa de se prever o comportamento de um sistema híbrido constituído por uma combinação de processos contínuos e discretos, envolvendo a análise integrada do comportamento e dos inter-relacionamentos de todos os seus componentes, da área agrícola à industrial, como mostrado na figura 4.

A partir de sua programação são geradas previsões de parâmetros globais importantes: produção de açúcar, álcool, bagaço e vinhaça; geração de vapor e energia elétrica; consumo de água, bagaço e outros insumos; além da alocação de recursos e equipamentos, tais como mão-de-obra, caminhões, tratores, etc.

Uma questão fundamental que direciona o planejamento da produção em indústria sucroalcooleira é a definição das metas de produção de açúcar e de álcool.

No caso brasileiro, algumas questões mostram-se relevantes para a definição destas metas. A demanda pelo álcool como combustível está intimamente ligada à definição da política energética nacional (SAITO, 2000).

Em relação ao açúcar, a maior parte da demanda vem do mercado interno, porém o Brasil é o maior exportador do mundo, com o menor custo de produção (SAITO, 2000), o que pode ocasionar oportunidades para aumento da demanda. Por outro lado, esta competitividade não garante um ritmo de crescimento e/ou estabilidade no mercado externo em função das políticas protecionistas dos demais países produtores.

Outra oportunidade para incrementos na demanda é a diversificação de produtos finais derivados da cana-de-açúcar (açúcar líquido, açúcar refinado, álcool refinado, etc), bem como das suas aplicações (bagaço, vinhaça, melaço, levedura seca, etc). Outro produto final que apresenta oportunidade de diversificação é o bagaço, seja no seu excedente de produção ou na forma de energia elétrica para cogeração. Em função dessas metas, chega-se a uma demanda estimada de matéria-prima.

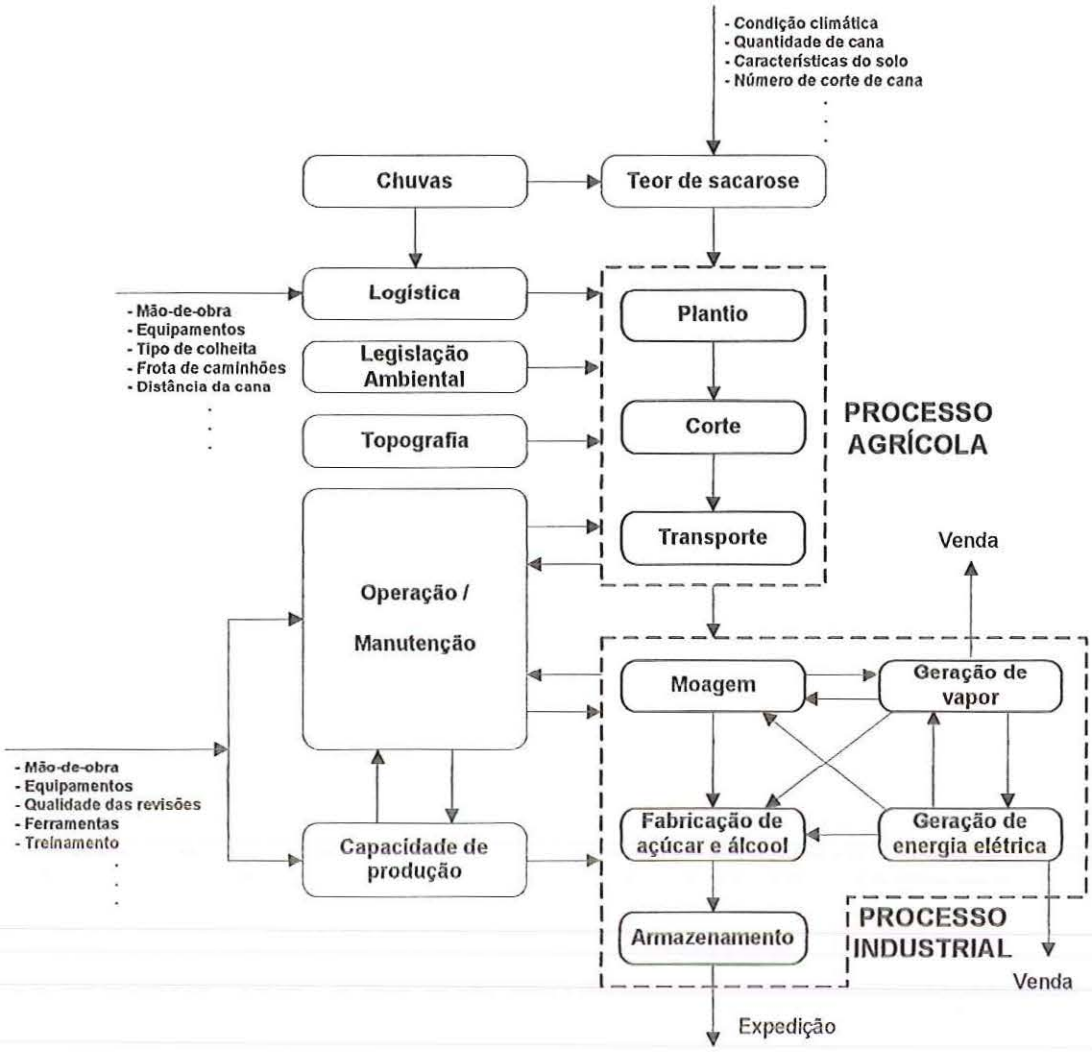

FIGURA 4 – Diagrama do processo de planejamento da produção em uma indústria sucroalcooleira

Com as metas de produção definidas, inicia-se o processo de verificação da capacidade para atender a demanda e as formas de execução. Duas definições importantes são: a quantidade de área disponível para colheita; e a produtividade desejada nelas. Para se alcançar as metas de produção, a aquisição de novas áreas pode ser necessária, além do desenvolvimento de novas variedades de cana mais produtivas, de acordo com os ambientes de produção que compõem as áreas disponíveis.

Verificada a viabilidade de atendimento da demanda por parte do setor agrícola, deve ser analisada, neste ponto, a capacidade industrial de processamento que suporte atender a oferta de matéria-prima. Um parâmetro fundamental a ser definido é a capacidade de moagem diária que, em geral, é definida em função dos dados históricos e de melhorias implantadas no setor de extração, e considera as possíveis perdas por paradas, que são

reunidas em 3 grupos: chuvas, que impedem o fornecimento de matéria-prima; paradas programadas, para manutenção e limpeza de equipamentos; e paradas não-programadas, que engloba as paradas não descritas nos dois grupos anteriores (quebra de equipamento essencial, falha operacional, baixa produção de vapor, etc).

Com a definição da capacidade de moagem diária, chega-se à definição do período produtivo, ou seja, as datas de início e término de safra. A sazonalidade da oferta de matéria-prima para este tipo de sistema produtivo faz com que o período produtivo se concentre em torno do período em que as condições climáticas sejam as mais favoráveis para que a cana-de-açúcar atinja seu melhor estágio de maturação, que se traduz em altos teores de sacarose. Para o estado de São Paulo, este período localiza-se entre agosto e setembro. Para os meses anteriores, a queda nos teores de sacarose é bem mais acentuada do que nos meses posteriores.

Historicamente, o período que se inicia no mês de dezembro é caracterizado por um aumento significativo do índice pluviométrico. As freqüentes chuvas atrapalham sensivelmente o fornecimento de matéria-prima, causando paradas constantes no processo industrial e dificultando as operações, em função das diversas interrupções e partidas dos equipamentos, comprometendo inclusive a produtividade e a qualidade final do açúcar e do álcool. Assim, procura-se definir o término da safra para antes de dezembro. Desta forma, considerando-se a demanda estimada de matéria-prima, chega-se à data de início. Para cumprir as suas metas de produção, algumas usinas, em função do alto volume de matéria-prima que têm para processar, têm que optar por: utilizar o período característico de chuvas; ou iniciar a safra numa época em que os teores de sacarose estão relativamente baixos. Além disso, deve considerar um período suficiente para a realização efetiva da manutenção de entressafra dos equipamentos.

A capacidade de moagem diária também define o ritmo de produção, tanto no fornecimento de matéria-prima quanto no processamento industrial.

No caso do fornecimento de matéria-prima, ela determina qual deve ser a taxa de fornecimento para a usina. Para atender tal taxa, devem ser definidos o número de frentes de colheita e as suas respectivas capacidades de fornecimento, em função da alocação dos recursos logísticos disponíveis para o corte, carregamento e transporte. Nesta etapa, podem ser analisados investimentos em aumento de frentes de colheita e/ou em novos equipamentos para atender a taxa de fornecimento exigida.

Para o processamento industrial, a capacidade de moagem diária define a capacidade industrial necessária de processamento. A vazão de caldo gerada deve ser processada rapidamente, em função da sua perecibilidade. Assim, os recursos industriais nas diversas etapas da fabricação do açúcar e do álcool devem suportar o processamento

dessa vazão, num fluxo constante e regular, procurando minimizar os tempos de espera entre as operações.

Finalmente, a capacidade de processamento industrial fornece a taxa de fabricação de produtos finais. Com isso, o sistema logístico de distribuição, principalmente o do açúcar, deve ser sincronizado com a capacidade de armazenamento, procurando-se um compromisso entre um bom fluxo de distribuição e um aproveitamento racional dos recursos de armazenamento e transporte.

Durante o processo de planejamento da produção, em geral, a análise das diversas opções de planejamento envolve a manipulação de uma quantidade razoável de dados que, pela ausência de procedimentos sistematizados, fornecem soluções para planejamentos com um baixo nível de confiança.

Os dados históricos normalmente recebem tratamento estatístico insuficiente, limitando-se, na maioria das vezes, a estimativas determinísticas dos principais parâmetros que não levam em consideração alterações de diversas naturezas (tecnológicas, gerenciais, econômicas, etc) que são introduzidas no sistema produtivo de um ano para outro e também flutuações que ocorrem ao longo de um período produtivo.

Portanto, a cada safra gera-se um número de informações elevado sobre os diversos parâmetros de produção, sem que se tenha uma visão clara de seus comportamentos e suas inter-relações. Com isso, o planejador praticamente reconstrói o planejamento a cada ano, com um aproveitamento deficiente e incorreto dos dados históricos e dos planejamentos anteriores pela ausência de uma metodologia ou ferramenta eficaz de manutenção e recuperação destas informações. Ele define parâmetros e projeta previsões de produção baseando-se, muitas vezes, na própria experiência pessoal, o que não garante, necessariamente, a obtenção do máximo desempenho do sistema.

2.5. Estágio atual da simulação na indústria sucroalcooleira

A indústria sucroalcooleira é caracterizada pela sazonalidade no período de produção: na época de safra, a usina trabalha com sua maior capacidade e na entressafra faz sua manutenção e gerencia seu estoque (SAITO, 2000). Com isso, o faturamento do período produtivo de uma usina responde por todo os custos anuais, inclusive os do período em que não se tem produção.

Assim, torna-se inviável a tentativa de experiências muito inovadoras durante o período produtivo. Neste aspecto, a simulação vem sendo utilizada como apoio na busca de uma melhor compreensão do sistema sucroalcooleiro, sendo possível analisar opções de planejamento sem intervir no sistema produtivo real.

Neste sentido, diversos estudos investigam estas possibilidades.

MATHEW & RAJENDRAN (1993) utilizaram a simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira a fim de determinar o melhor intervalo entre as paradas para manutenção, visando a minimização de perda por paradas em função de quebra de equipamentos.

CAMARGO (1990) apresentou um procedimento para o equacionamento do balanço de massa e energia de uma usina, baseando-se na Lei de Conservação de Massa e na Lei de Conservação de Energia, e subdividindo o modelo de uma usina em oito módulos integrados: lavagem, preparo e moagem, tratamento de caldo, evaporação, cozimento e centrifugação de açúcar, fermentação, destilação, turbo-geração e geração de vapor. Além do balanço de massa e energia, o modelo apresenta cálculos de rendimento e de eficiência de produção, entre outros parâmetros importantes.

O Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar desenvolveu um sistema computacional que permite a simulação dos processos tecnológicos da indústria açucareira e de derivados da cana, utilizando modelos determinísticos e probabilísticos, assim como combinações de ambos, dependendo do conhecimento do processo em particular e das respostas que se deseja obter (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 1992).

MILAN (1992) englobou as etapas de corte, carregamento e transporte em seu modelo físico representativo da produção de cana-de-açúcar para identificação de fatores críticos dos custos do processo de desenvolvimento da cana-de-açúcar e de estratégias para a redução desses custos.

Um sistema de carregamento, reboque e transporte de cana-de-açúcar foi modelado por LOPES (1995), a fim de simular tal sistema, identificando e analisando as variáveis que influenciam o custo de cada uma das operações envolvidas.

HIGGINS et al (1998) desenvolveram um modelo de otimização do fornecimento de cana visando maximizar a produção de açúcar e a receita líquida em relação à data de colheita; MUCHOW et al (1998) utilizaram o mesmo modelo para examinar o impacto do tipo e da idade da cultura sobre os mesmos parâmetros.

As etapas de: plantio, corte, carregamento, transporte, pesagem, amostragem e recepção de matéria-prima, foram enfocados no trabalho de simulação computacional desenvolvido pela COPERSUCAR (BRAGA, 1999).

HAHN & RIBEIRO (1999) desenvolveram um simulador para o planejamento do transporte de cana, baseado em heurística (técnica que melhora a eficiência de um processo de busca de soluções, apontando para direções geralmente interessantes, mas que pode deixar de fora pontos de interesse para determinadas análises).

No setor de plantio, KEATING et al (1999) desenvolveram um módulo computacional (APSIM-Sugarcane) que simula o crescimento da cultura de cana-de-açúcar em função do clima, da disponibilidade de água e de nitrogênio; este módulo foi utilizado por LISSON et al (2000) para analisar o desempenho do sistema, considerando-se a produção da cultura e questões relacionadas para dois sistemas contrastantes de produção, além de desenvolver diretrizes para questões metodológicas em simulações de longo prazo de sistemas produtivos açucareiros.

Análises do processo de fornecimento de matéria-prima em usina, por meio de técnicas de simulação utilizando o software Arena®, foram apresentadas por IANNONI & MORABITO (2002).

SAITO (2000) analisou o comportamento da cadeia agroindustrial do açúcar com o auxílio de simulação baseada em "System Dynamics", para identificar pontos de alavancagem.

VILLARIN (2004) apresenta uma proposta de modelagem e análise de sistemas supervisórios híbridos, onde utiliza, como estudo de caso, o setor industrial sucroalcooleiro, onde os processos são modelados por meio da técnica de redes de Petri.

Um aspecto relevante a ser observado é que os estudos normalmente se concentram em determinado aspecto ou setor do sistema, tais como balanço de massa e energia ou logística de transporte de cana. Processos, operações, recursos e outros fatores externos ao estudo e que aparentemente têm pouca ou nenhuma influência são considerados de forma simplificada ou mesmo ignorados. Dessa forma, pouco se acrescenta à qualidade das informações sobre a real influência desses fatores no sistema analisado, limitando-se a abrangência e o alcance do estudo e as possibilidades de aquisição de conhecimento sobre os processos envolvidos e suas inter-relações.

3. CONCEITOS BÁSICOS DE SIMULAÇÃO

Para a melhor compreensão da técnica de simulação a ser utilizada neste trabalho, são apresentadas, a seguir, as principais definições que envolvem esta técnica.

3.1. Simulação de sistemas

A simulação de sistemas é uma técnica de resolução de problemas, pelo acompanhamento das mudanças ao longo do tempo, de um modelo dinâmico de um sistema (GORDON, 1978). BANKS (1998) complementa ao afirmar que a observação do comportamento do modelo ao longo do tempo tem o objetivo de se fazer inferências a respeito das características operacionais do sistema real que é representado.

Assim, por meio da simulação pode-se criar um modelo de um sistema real, com o propósito de avaliar o comportamento deste sistema sob várias condições, permitindo ao analista visualizar e tirar conclusões sobre novos sistemas sem precisar construí-los, ou fazer alterações em sistemas já existentes sem perturbá-los. É uma ferramenta que permite a análise de interações entre sistemas (integração de sistemas) e entende como vários componentes interagem entre si e como estes afetam todo o desempenho do sistema (LAW, 1986).

Para este trabalho, a simulação é uma técnica de resolução de problemas, por meio da observação do comportamento de uma particular representação (modelo) de um sistema, em uma base de tempo (PORTO, 2002).

3.2. Sistemas

Para SCHMIDT & TAYLOR apud LAW & KELTON (1991), um sistema é definido como um conjunto de entidades que atuam e interagem juntas em direção à realização de alguma finalidade lógica. Seu estado é o conjunto de variáveis necessárias para descrever um sistema em um determinado tempo, relativo aos objetivos de um estudo (LAW & KELTON, 1991).

PRITSKER (1994) define sistema como um conjunto de itens de um setor circunscrito da realidade que é o objeto de estudo ou interesse. Portanto, para considerar-se o escopo de um sistema, deve-se contemplar seus limites, conteúdos e fatores externos que podem afetá-lo. São as entradas para o sistema e constituem o seu ambiente. Desse modo, sistemas são conjuntos de objetos interagindo mutuamente que são afetados por forças externas.

Assim, um sistema pode ser representado como na figura 5.

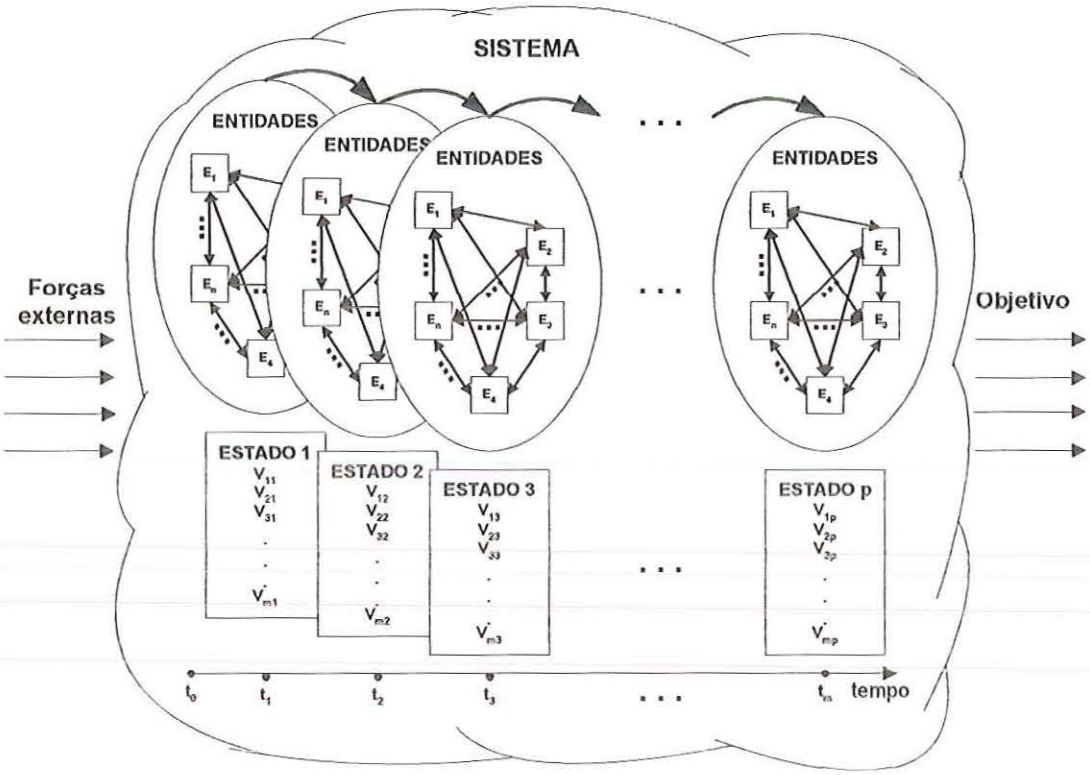

FIGURA 5 – Definição de sistema

Um sistema pode ser caracterizado por meio de um conjunto de variáveis, onde cada combinação de valores de variáveis representa um único estado ou condição do sistema. A manipulação destes valores de variáveis simula o movimento do sistema de um estado para outro.

Deste modo, os sistemas podem ser de dois tipos: discretos ou contínuos.

Um sistema discreto é aquele no qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos discretos no tempo (LAW & KELTON, 1991). São caracterizados pela produção de produtos individualizados cuja variedade e tamanho do lote dependem do tipo de produto, das instalações industriais e da demanda. O interesse principal está nos eventos e as equações expressam as condições para um evento ocorrer.

A simulação consiste em desviar as mudanças no estado do sistema que resultam da sucessão dos eventos, e envolve a modelagem de um sistema de acordo com o seu desenvolvimento sobre um período de tempo.

Um sistema contínuo é aquele no qual as variáveis de estado mudam continuamente em relação ao tempo (LAW & KELTON, 1991). São caracterizados pelo controle contínuo e quantitativo, onde o interesse principal está em mudanças suaves. A simulação começa pela modelagem matemática e lógica, definindo-se como o estado do sistema irá mudar no tempo. As variáveis de estado são minuciosamente definidas no modelo para se avaliar as medidas estatísticas. A mudança de tempo de um sistema contínuo é dirigida por equações diferenciais que definem a mudança no estado do sistema.

3.3. Componentes de um sistema

No conceito de sistema relacionado à simulação, vários componentes estão presentes, e são definidos a seguir (LAW & KELTON, 1991; BANKS, 1998; FREITAS FILHO, 2001): entidades e atributos, recursos e filas de recursos, variáveis, eventos, atividades e atrasos. (Os exemplos que acompanham as definições referem-se a 3 tipos de sistemas: manufatura, supermercado e processamento computacional.)

3.3.1. Entidades e atributos

Uma entidade representa um elemento que possui interesse no sistema e necessita de uma clara e explicita definição. Ela pode ser dinâmica, movendo-se através do sistema, ou estática, servindo a outras entidades. Exemplos de entidades dinâmicas para os sistemas apresentados poderiam ser: as peças que se movem pela fábrica, os clientes chegando e saindo da fila do caixa no supermercado ou os serviços que chegam e saem da CPU depois de processados. Já entidades estáticas podem ser, por exemplo, a máquina, o caixa e a CPU.

As características próprias das entidades, isto é, aquelas que as definem totalmente, são chamadas de atributos. Várias entidades semelhantes possuem os mesmos atributos. Os valores dos atributos é que as diferenciam entre si. Desta forma, pode-se, por exemplo, atribuir o nome de peça a toda a entidade que é processada em uma determinada máquina de um sistema de manufatura. Se estas peças (entidades) forem diferentes entre si e as investigações sobre o sistema requerem respostas que considerem tais diferenças, um simples atributo como um código, um número ou tipo, por exemplo, as tornarão explicitamente individualizadas. Os resultados poderão ser apresentados pelo código, pelo número ou pelo tipo das peças. O mesmo poderá ocorrer com as entidades clientes ou serviços.

3.3.2. Recursos e filas de recursos

Um recurso é uma entidade estática que fornece serviços às entidades dinâmicas. Um recurso pode ter a capacidade de servir uma ou mais entidades dinâmicas ao mesmo tempo, operando como um servidor paralelo. É possível que uma entidade dinâmica opere com mais de uma unidade do recurso ao mesmo tempo, ou com diferentes recursos ao mesmo tempo. Se uma entidade dinâmica não puder se apoderar de um recurso solicitado, ela deverá aguardar pelo mesmo em uma fila.

O processamento de uma fila, isto é, a forma como a mesma será gerenciada depende, fundamentalmente, das políticas operacionais adotadas no sistema ou no modelo que o representa. Não havendo disponibilidade de espaço na fila, esta entidade poderá tomar o destino de outro recurso (ou outra fila) ou mesmo deixar o sistema. Se puder capturar o recurso, a entidade dinâmica o reterá por um tempo (o qual se costuma chamar de tempo de processamento), liberando-o a seguir. Um recurso pode ter vários estados. Os mais comuns são: ocupado e livre. Outros podem ser definidos tais como: bloqueado, em falha, indisponível, etc.

3.3.3. Variáveis

Num sistema, existem diversos tipos de variáveis. Algumas são utilizadas somente para controle de lógica, na verificação de condições. Outras constituem partes intermediárias de outras variáveis. São importantes, mas não traduzem diretamente as características do estado do sistema.

As variáveis cujos valores definem o estado do sistema são conhecidas como variáveis de estado. As variáveis de estado constituem o conjunto de informações necessárias à compreensão do que está ocorrendo no sistema num determinado instante no tempo, com relação aos objetos de estudo. A determinação destas variáveis é função do propósito do estudo. Variáveis de estado definidas numa determinada investigação de um sistema podem ser completamente diferentes daquelas definidas em outro estudo sobre o mesmo sistema. Alguns exemplos são:

- Número de peças esperando para serem processadas em uma máquina ou o estado da máquina, isto é, ocupada ou livre;
- Número de clientes esperando na fila do caixa;
- Número de serviços aguardando na fila da CPU, número de serviços já atendidos.

3.3.4. Eventos

Eventos são acontecimentos, programados ou não, os quais, quando ocorrem, provocam uma mudança de estado em um sistema. Toda mudança de estado é provocada pela ocorrência de um evento. Alguns exemplos:

- A chegada de peças, clientes ou serviços no sistema;
- O início do processamento pela máquina, caixa ou CPU;
- A saída de peças, clientes ou serviços dos sistemas.

3.3.5. Atividades e atrasos

Uma atividade corresponde a um período de tempo predeterminado. Logo, uma vez iniciada, seu final pode ser programado. A duração de uma atividade, no entanto, não é, necessariamente, uma constante. Poderá ser o resultado de uma expressão matemática, um valor probabilístico com base em uma distribuição de probabilidades, ser fornecida a partir da leitura em algum arquivo ou fonte externa ou até mesmo ser dependente do estado do sistema.

Ao contrário de uma atividade, um atraso é um período de tempo sobre o qual não se tem controle. Uma vez iniciado, não se pode programar seu fim. Um caso típico é a espera causada por eventos inesperados, como a espera de uma entidade em uma fila de um recurso. Outro caso de um evento inesperado seria a indisponibilidade por tempo indeterminado, de um recurso devido a uma quebra do mesmo. Todo início e final de uma atividade ou período de espera (mudança de estado), são causados por um evento.

Na figura 6, ilustra-se um exemplo simplificado da relação entre eventos, atividades e variáveis, para um sistema de atendimento bancário.

Muitas variáveis podem ser definidas. Neste exemplo, foram definidas as seguintes variáveis:

- V_1: número de clientes aguardando na fila para atendimento;
- V_2: tempo do cliente aguardando na fila para atendimento;
- V_3: número de clientes atendidos.

As condições iniciais são:

- a fila de clientes que aguardam o atendimento está vazia ($V_1 = 0$);
- o tempo de fila do cliente é zero ($V_2 = 0$);
- nenhum atendimento de cliente foi finalizado ($V_3 = 0$);

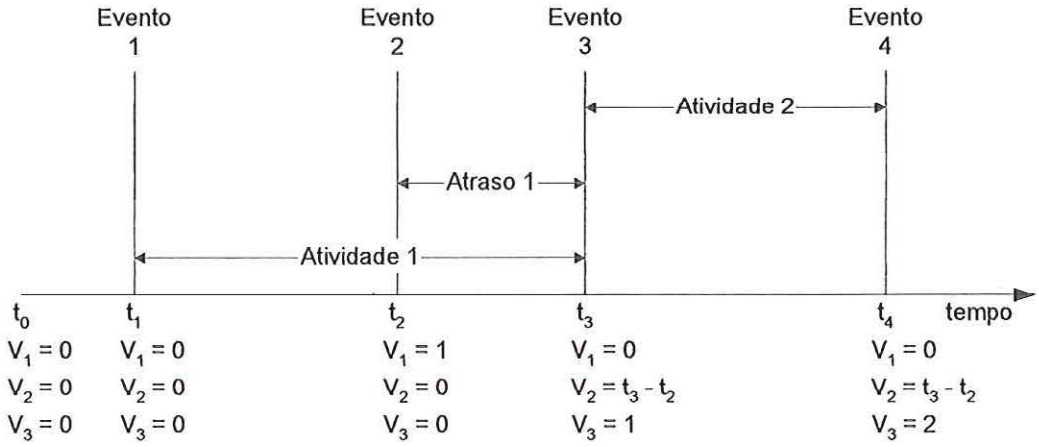

FIGURA 6 – Exemplo da relação entre eventos, atividades e variáveis

- e existe somente um caixa que pode atender um cliente por vez.

No tempo t_1, ocorre o Evento 1, que é a chegada do primeiro cliente no banco. Como não há fila, o cliente começa a ser imediatamente a ser atendido (Atividade 1). As variáveis não sofrem alterações nos seus valores.

No tempo t_2, ocorre o Evento 2, que é a chegada do segundo cliente no banco. Como não terminou o atendimento do primeiro cliente (Atividade 1), o segundo cliente vai para a fila para aguardar o término do atendimento do primeiro cliente. A variável V_1 muda para 1.

No tempo t_3, ocorre o Evento 3, que é o término da Atividade 1. Assim, o primeiro cliente sai do sistema. O segundo cliente sai da fila (Atraso 1) e começa a ser atendido (Atividade 2). As variáveis mudam para: $V_1 = 0$, $V_2 = t_3 - t_2$ (Atraso 1) e $V_3 = 1$.

No tempo t_4, ocorre o Evento 4, que é o término do atendimento do segundo cliente. Ele sai do sistema. A variável V_3 muda para 2.

3.4. Modelos

Para LAW & KELTON (1991), um sistema pode ser estudado por meio de:

- Sistema real ou modelo do sistema: experimentar o sistema real operando sob as novas condições pode ser muito oneroso ou muito arriscado para a integridade do sistema. Por estas razões, normalmente necessita-se construir um modelo como uma representação do sistema e estudá-lo como um substituto para o sistema real.

- Modelo físico ou modelo matemático: um modelo físico pode ser útil para um estudo, porém não possui muita flexibilidade quando se necessita analisar diferentes condições de operação. A grande maioria de modelos construída para esta finalidade é matemática, representando um sistema em termos de relacionamentos lógicos e quantitativos que são manipulados e modificados para ver como o modelo reage e, então, como o sistema reagiria, se o modelo matemático for válido.

- Solução analítica ou simulação: quando o modelo matemático construído é suficientemente simples, pode ser possível trabalhar com os seus relacionamentos e quantidades para se alcançar uma solução exata, analítica. Para sistemas complexos, no entanto, os modelos matemáticos válidos são também complexos, excluindo qualquer possibilidade de uma solução analítica. Neste caso, o modelo deve ser estudado através da simulação, exercitando numericamente as entradas para ver como elas afetam as medidas de desempenho.

Um modelo de simulação é, então, uma representação de um sistema real, existente ou projetado, a ser estudado por meio da simulação (figura 7). Os estímulos que os fatores externos exercem sobre o sistema são representados pelos dados de entrada no modelo. As saídas de resultados gerados pelo modelo representam as respostas do sistema aos estímulos, traduzidas pelas medidas de desempenho.

3.5. Classificação dos modelos de simulação

Os modelos de simulação podem ser classificados em (LAW & KELTON, 1991):

- Estáticos ou dinâmicos: um modelo de simulação estático é uma representação de um sistema em um determinado tempo, ou de um sistema em que o tempo simplesmente não o influencia. Por outro lado, um modelo de simulação dinâmico representa como um sistema evolui ao longo do tempo.

- Determinísticos ou probabilísticos: quando o modelo de simulação não contém nenhum componente probabilístico, é chamado de determinístico e a saída é "determinada", uma vez que o conjunto de quantidades e relacionamentos de entrada no modelo tenha sido especificado. Um modelo de simulação probabilístico, por sua vez, contém ao menos algum componente de natureza aleatória, produzindo saídas aleatórias que devem ser tratadas como uma estimativa das características do modelo.

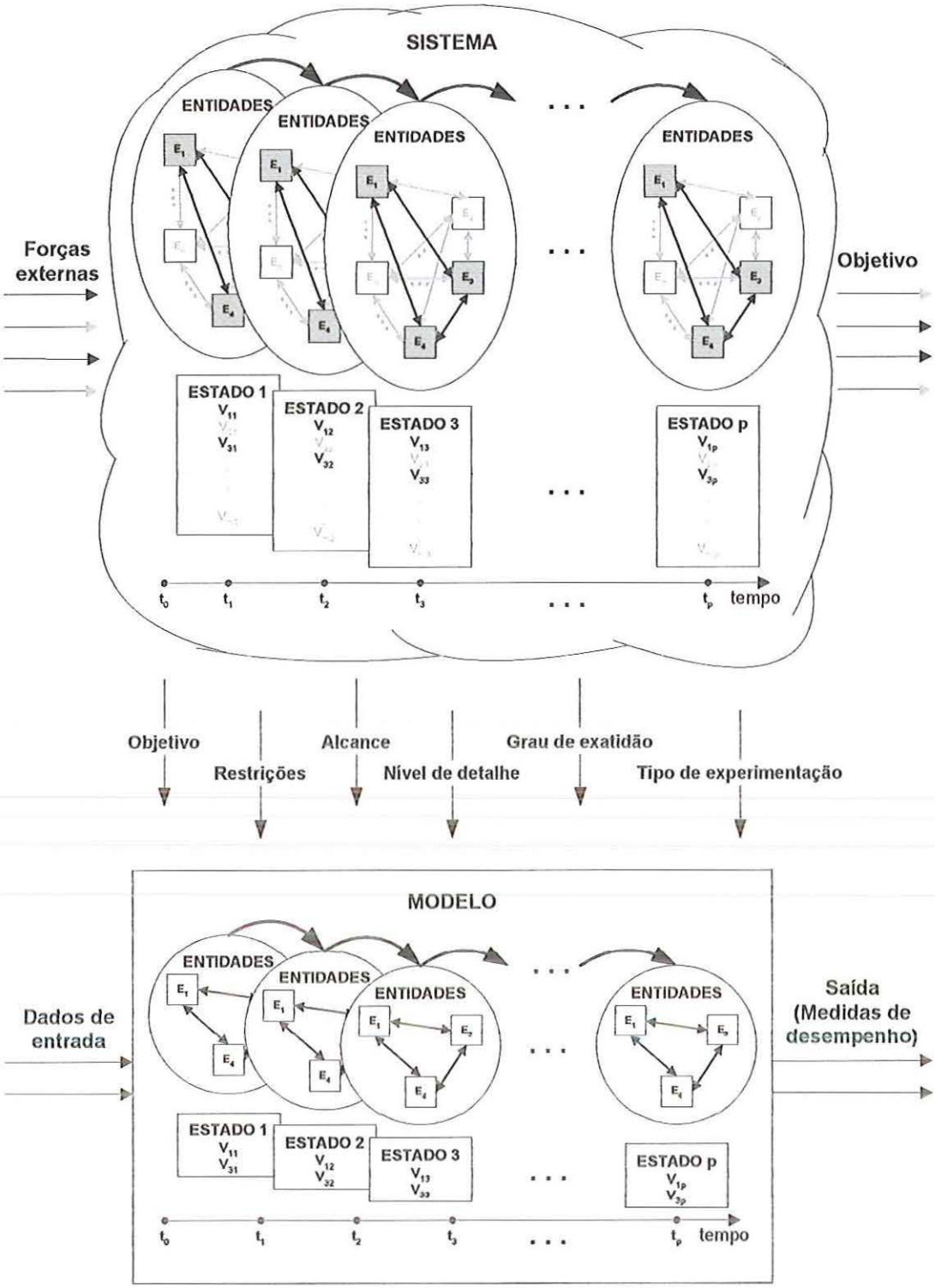

FIGURA 7 – Especificação de modelo, dados de entrada e medidas de desempenho

- Contínuos ou discretos: os modelos de simulação discretos e contínuos são definidos analogamente às definições de sistemas discretos e contínuos, ou seja, para modelos discretos as variáveis mudam instantaneamente em pontos

discretos bem definidos no tempo onde os eventos ocorrem. Por outro lado, nos modelos contínuos as variáveis mudam continuamente em relação ao tempo. Alguns modelos contínuos podem ser discretizados, isto é, tratados como modelos discretos, após algumas suposições realizadas sobre as variáveis de estado. Há também a possibilidade de modelagem mista, na qual variáveis dependentes do tempo podem variar ora de maneira contínua hora discretamente ao longo do tempo.

Em relação a este ponto, muitos sistemas produtivos apresentam comportamento híbrido, ou seja, incluem aspectos de ambos os eventos contínuos e discretos, que, em geral, não são separáveis, e influenciam um ao outro e interagem de formas significativas.

Para PRITSKER (1998), o aspecto mais importante da simulação híbrida é a interação entre as variáveis discretas e contínuas. Por exemplo, quando uma ponte rolante atinge um local, o descarregamento é iniciado. Segundo o autor, três interações fundamentais podem ocorrer. Primeiro, uma mudança discreta num valor pode modificar uma variável contínua. Um exemplo deste tipo de interação é a finalização de uma operação de manutenção que instantaneamente aumenta a taxa de processamento de máquinas dentro de um sistema. Segundo, uma variável contínua de estado, alcançando um determinado valor, pode causar a ocorrência ou a programação de um evento (por exemplo, a chegada de um transportador de material a uma determinada posição inicia um processo de descarregamento). Em geral, eventos podem ser baseados no valor relativo de duas ou mais variáveis de estado. Terceiro, a descrição funcional de variáveis contínuas podem ser mudadas em instantes discretos de tempo. Um exemplo disto é a mudança nas equações que governam a aceleração de uma ponte rolante quando uma pessoa está próxima da ponte.

Na modelagem de sistemas híbridos, os aspectos contínuos do problema devem ser considerados primeiro. Os aspectos discretos do modelo – incluindo eventos, redes, algoritmos, procedimentos de controle e capacidades lógicas avançadas – devem ser desenvolvidos depois (PRITSKER, 1998). As interfaces entre as variáveis discretas e contínuas deverão então ser abordadas.

A respeito das interfaces, PRITCHETT et al. (2000) comentam que os modelos de simulação híbrida devem atender alguns requisitos: atualizar-se a si mesmo quando necessário, relatar quando a próxima atualização é necessária, e relatar interações com outros objetos que garantam uma atualização conjunta. Os autores colocam que a arquitetura da simulação de sistemas híbridos não deve impor limites desnecessários sobre os tipos dos objetos; deve facilitar a comunicação entre os objetos; e deve ser capaz de atualizar os componentes individuais de uma maneira eficiente computacionalmente.

Os modelos de simulação híbrida podem ser úteis em diversas áreas: sistemas de manufatura, linhas de produção, indústrias químicas, sistemas mecatrônicos, controles de processos, etc. PRITSKER (1998) comenta que uma área onde a modelagem híbrida tem sido poderosa é no desenvolvimento de procedimentos para análise da utilização de equipamentos de movimentação de material. A modelagem de esteiras, pontes rolantes e veículos auto-guiados envolve os conceitos contínuos de mudanças de aceleração e velocidade e também os requisitos discretos associados com carregamento, descarregamento, movimentação sobre segmentos de rede, e estratégias de controle associadas com os movimentos.

Outra área de aplicação importante é a de processo de alta velocidade, que é definido como um processo onde o volume e a taxa de trabalho são tais que a modelagem discreta não pode ser realizada efetivamente (STURROCK & DRAKE, 1996). Este tipo de processo trabalha com centenas, até milhares de entidades por minuto. Como exemplo, pode-se citar as operações de empacotamento de alta velocidade, que consistem em se fabricar materiais em volume, pastas ou líquidos, pela mistura e processamento de seus ingredientes em passos que são caracterizados como contínuos, semi-contínuos ou em lote (SIPRELLE & PHELPS, 1997). Os equipamentos envolvidos em tais operações são tipicamente tanques, esteiras, misturadores, secadores e tubos. Em seguida às operações de fabricação está o empacotamento, onde o material é acondicionado, em alta velocidade, em recipientes que são lacrados, rotulados e armazenados. As operações de fabricação produzem diferentes tipos do produto base, enquanto que as operações de empacotamento diferenciam os produtos pela embalagem em diferentes recipientes. Segundo PRITSKER (1998), para modelos de linha de empacotamento, freqüentemente é vantajoso modelar os itens na esteira usando conceitos contínuos para manter as variáveis de estado do número de itens na esteira, o número de itens nas áreas intermediárias, e o número de itens a serem processados numa máquina.

A modelagem de sistemas híbridos tem sido desenvolvida segundo um dos tipos de abordagem descritos abaixo (SIPRELLE & PHELPS, 1997; PRITCHETT et al., 2000):

- Modelagem contínua dos processos físicos, que é apropriada para estudar as propriedades termodinâmicas e físicas do material que está sendo processado. Modelar um sistema com equações contínuas tem a vantagem da rápida execução. No entanto, a complexidade das equações matemáticas aumenta rapidamente, mesmo para modelos mais simples, e a precisão e resolução requeridas resultam em modelos inadequados, ineficientes e lentos na execução. Isto faz com que o uso de equações contínuas seja inadequado para a aplicação em problemas logísticos. Em adição, a falta de uma interface entre o sistema de equações e um componente discreto freqüentemente impossibilita

a modelagem de todos os aspectos do sistema (por exemplo, fornecimento de matéria-prima e fluxo saída da produção).

- Modelagem discreta, que é mais apropriada para ser utilizada em problemas logísticos, mas é inadequada e lenta para a modelagem do fluxo de massa ou as operações de empacotamento de alta velocidade. Uma abordagem comum para lidar com fluxos de material num sistema discreto é a agregação, que significa atribuir uma certa quantidade de material a cada entidade discreta, e então tratar cada entidade como uma porção do fluxo. Ela melhora a velocidade de execução do modelo e geralmente conserva uma boa flexibilidade na modelagem. Porém, ela sacrifica a precisão e o detalhamento do modelo. Além disso, pode dificultar a implementação de lógicas de controle complexas.

3.6. Especificação de um modelo de simulação

Desde que um modelo é uma descrição de um sistema, ele também é uma abstração de um sistema. Para desenvolver uma abstração, deve-se decidir quais os elementos do sistema a serem incluídos no modelo, bem como seus limites ou fronteiras. Para se tomar tais decisões, um objetivo para a construção do modelo deve ser estabelecido. A referência a este objetivo deve ser feita para se decidir se um elemento de um sistema é significante e, então, se deve ser modelado. O sucesso de uma modelagem depende de quão bem definidos são os elementos significantes e os relacionamentos entre eles (PRITSKER, 1994).

Tão importante quanto a definição dos objetivos, é a identificação de restrições sob as quais o estudo deverá ser conduzido. Os objetivos necessitam ser temperados pelas restrições sob as quais o projeto deve ser executado, tais como: orçamento, prazo de entrega, acessibilidade de recursos, etc.

Alguns dos principais aspectos da especificação de um modelo de simulação são comentados a seguir.

3.6.1. Alcance

O alcance refere-se à amplitude do modelo ou quanto do sistema o modelo conterá. A determinação do alcance do modelo é baseada na decisão de quanto realçar ou de suprimir uma atividade particular em busca da realização dos objetivos da simulação. Uma tendência comum é não modelar os sistemas inteiramente, sempre quando a área do problema e todas as variáveis relevantes estiverem realmente isoladas dentro de um sub-sistema menor.

Se, por exemplo, o objetivo é encontrar o número de operadores exigidos para suportar um nível de produção de uma célula, provavelmente não será necessário que o modelo represente o que acontecerá às peças depois de deixarem as células. O alcance do modelo seria obtido com somente aquelas atividades cujas interações têm um significado direto sobre o problema sendo estudado. As atividades de "contra-fluxo" e "seqüenciais", que não impedem as medidas de interesse da execução, seriam omitidas do modelo.

3.6.2. Nível de detalhe

O nível de detalhe define a profundidade ou resolução do modelo. Em um extremo, uma fábrica inteira pode ser modelada como uma simples operação "caixa preta" com o tempo de atividade aleatória e, em outro extremo, o movimento detalhado de uma máquina seria modelado, correspondente a uma das operações da máquina. Ao contrário do alcance do modelo, que afeta somente o seu tamanho, o nível de detalhes afeta tanto a complexidade do modelo quanto o tamanho. A determinação de um nível apropriado de detalhes é uma decisão importante, pois muitos detalhes dificultam e consomem tempo no desenvolvimento de um modelo válido, e poucos detalhes podem fazer o modelo muito irrealista pela exclusão de variáveis críticas.

3.6.3. Grau de exatidão

O grau de exatidão pertence à correção dos dados que serão usados. Para alguns modelos ou para certas atividades, a informação não necessita ser tão precisa ou exata como se necessita para outros. Os graus de exatidão exigidos são determinados pelos objetivos do estudo. Se a decisão for importante ou a comparação for em faixa estreita, maior exatidão pode ser exigida. A exatidão, algumas vezes, tem que ser sacrificada se os dados de entrada seguros forem simplesmente indisponíveis, tal como quando se inicia o modelo de um sistema completamente novo.

O grau de exatidão exigido pode ter um impacto significante sobre o tempo e esforço exigidos para recolher os dados, porém ele freqüentemente tem impacto reduzido sobre o tempo de construção do modelo, isto porque um modelo pode ser construído com valores estimados que podem, mais tarde, ser trocados pelos valores exatos. A precisão da saída é freqüentemente governada pelo grau de exatidão do modelo.

3.6.4. Tipo de experimentação

O número e a natureza das soluções alternativas a serem avaliadas deve ser planejado no início, no sentido de assegurar que um cronograma adequado será adotado.

Freqüentemente esta decisão, por si mesmo, é influenciada pela restrição do prazo de entrega do estudo.

Quando alternativas que são ligeiramente diferentes precisam ser avaliadas, um modelo base (ou neutro em relação às diferenças) pode ser desenvolvido sem que exija menores modificações para modelar cada alternativa. Se as configurações alternativas forem significantemente diferentes, elas podem exigir quase o mesmo esforço de modelagem, como o que se faz ao desenvolver um modelo inicial.

Para estudos em que melhoramentos em um sistema existente estão sendo considerados, é freqüentemente útil e eficaz se modelar o sistema atual tão bem como o sistema proposto. A premissa básica é que não se está pronto para fazer melhoramentos em um sistema até que se entenda como é que opera o sistema atual. Informações sobre o sistema atual são mais fáceis de se obter do que informações da área de mudança. Uma vez que o modelo do sistema atual está construído, freqüentemente é mais fácil visualizar quais mudanças necessitam ser feitas para modificar este sistema atual. Os sistemas também podem ser modelados juntos, na mesma simulação, e ser executados lado a lado, permitindo-se a comparação de desempenhos. E, também, durante a apresentação final dos resultados, será fácil demonstrar, com ambas as versões "como está" e "como será", o impacto efetivo que a mudança pode ter sobre a execução do sistema.

3.7. Interfaces de um modelo de simulação

As interfaces referem-se às formas como o analista interage com o modelo de simulação. Existem basicamente dois grupos de interfaces: de entrada de dados e de saída de resultados.

3.7.1. Entrada de dados

De acordo com os objetivos do estudo de simulação, a quantidade de dados a serem introduzidos no modelo pode ser elevada. Neste caso, é bem adequado que se disponha de uma interface que permita a leitura ágil dos dados, por exemplo, de arquivos externos. Caso contrário, será necessário o desenvolvimento de alguma rotina para tal leitura, o que pode requerer uma quantidade significativa de tempo e esforço.

3.7.2. Saída de resultados

A forma na qual os resultados serão apresentados pode afetar significativamente o tempo e esforços envolvidos no estudo da simulação. Se a animação detalhada ou um

relatório extensivo é esperado, o projeto pode facilmente se estender por diversas semanas depois da fase experimental ter sido completada. Muitas vezes o único resultado exigido é uma simples verificação de se um sistema é capaz de atender a uma exigência de produção, e, em tais casos, uma simples resposta satisfará.

3.8. Passos para aplicação da simulação

A simulação computacional é o processo de projetar um modelo matemático-lógico de um sistema real e fazer experimentos com este modelo num computador. Estes experimentos ou simulações permitem fazer-se inferências sobre sistemas, tais como (LOBÃO & PORTO, 1997):

- identificação de problemas;
- comparação de desempenho com outros sistemas;
- estudos sobre utilização de capacidade instalada, nível de inventário, lógica de controle, refinamento de projeto, integração, seqüenciamento, gargalo de sistema, arranjo físico, índice de produtividade;
- treinamento de operadores, testes de inicialização de equipamentos.

Com a técnica de simulação não se pretende fazer nenhuma tentativa de isolar as relações entre variáveis. Observando o modo como todas variáveis mudam com o tempo, muitas "corridas" de simulação devem ser realizadas para a compreensão das relações envolvidas no sistema; assim, o estudo deve ser planejado como uma série de experimentos, que devem ser realizados de acordo com a natureza do estudo:

- Análise de sistemas: pretende entender como um sistema existente opera, ou seja, qual o comportamento do sistema.
- Projeto de sistemas: produzir um sistema a ser construído que atenda certas especificações.
- Postulação de sistemas: é uma simulação empregada onde o comportamento do sistema é conhecido, mas os processos que o produzem não.

A aplicação da simulação a muitos tipos de sistemas com diferentes tipos de estudos resulta em muitas variações na maneira de se realizar a simulação. Os passos para um estudo de simulação foram descritos por vários autores (BANKS & CARSON, 1996; LAW & MCCOMAS, 1990; SHANNON, 1975; GORDON, 1978; LAW & KELTON, 1991; PRITSKER, 1994). Um estudo de simulação, porém, não é uma simples seqüência de passos. O processo é interativo porque o ato de modelar revela importantes informações

conforme o estudo avança. Os relacionamentos entre o sistema em estudo e o modelo de simulação são continuamente definidos e redefinidos.

LOBÃO & PORTO (1997) apresentam uma proposta de sistematização de estudos de simulação (figura 8), baseada nos estudos dos vários autores citados. Eles salientam que a utilização completa ou parcial dos passos depende do grau de complexidade do projeto de estudo de simulação a ser desenvolvido.

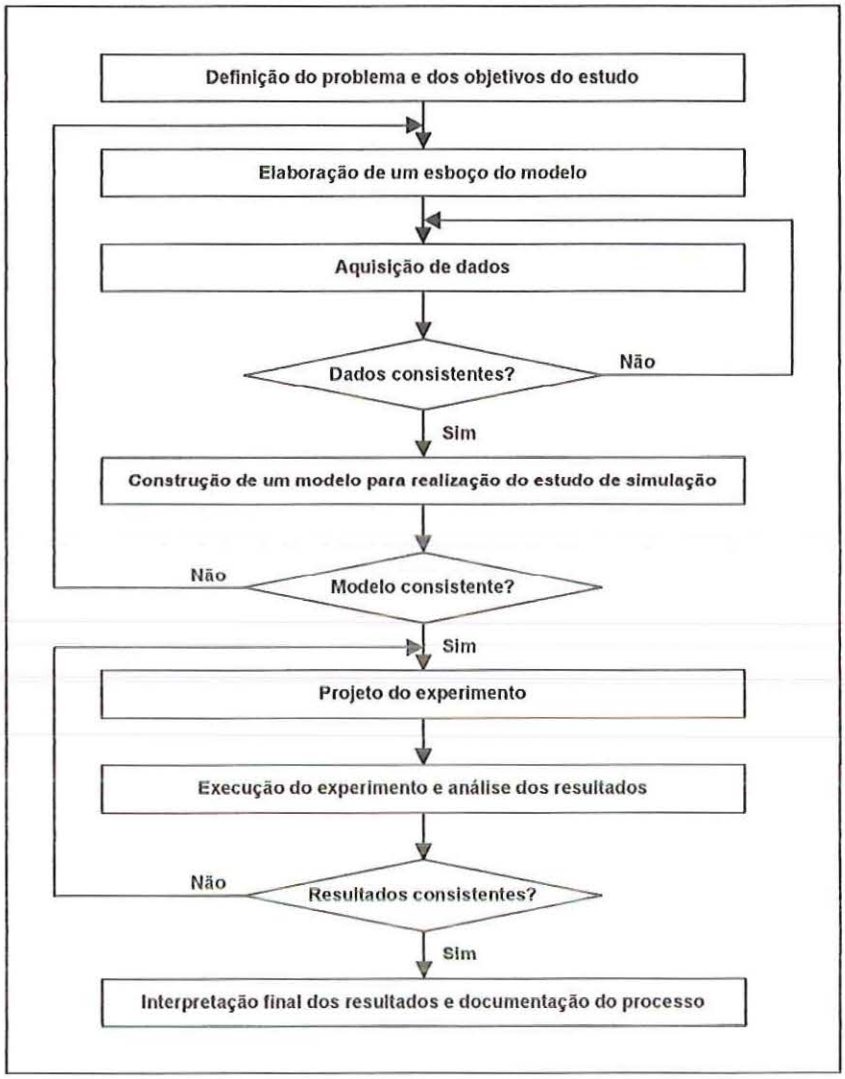

FIGURA 8 – Proposta de sistematização dos estudos de simulação (LOBÃO & PORTO, 1997)

O roteiro divide o processo de simulação em dez etapas sucessivas.

- Passo 1: Definição do problema e dos objetivos do estudo.

  Engloba a compreensão do funcionamento do sistema, identificando-se o propósito do estudo da simulação, as entradas necessárias e as saídas

desejadas do modelo, e o comportamento desejado do sistema a ser modelado. O presente estudo deverá se focalizar especialmente neste passo. PORTO (2000) relaciona alguns objetivos mais comuns em estudos de simulação:

- Análise de desempenho – Qual a evolução de desempenho do sistema considerando um conjunto de circunstâncias de alta significância (utilização, produção, tempo de espera, etc.)?
- Análise de capacidade – Qual é o processamento máximo ou capacidade de produção do sistema?
- Análise de aptidão – O sistema é capaz de encontrar a exigência de execução específica (*throughput*, tempo de espera, etc.) e, se não, que mudanças (adicionando recursos, improvisando métodos, etc.) são recomendadas para fazê-lo capaz?
- Estudo de comparação – O quanto muda uma configuração do sistema ou execução de variação do projeto comparado com outra configuração alternativa?
- Análise de sensibilidade – Quais decisões (variáveis) são as mais influentes sobre uma ou mais medidas de execução, e quão influentes elas são?
- Estudo de otimização – Quais combinações de valores praticáveis para um conjunto de decisões (variáveis), dariam melhores conclusões na execução dos objetivos desejados?
- Análises resposta/decisão – Quais são os relacionamentos entre os valores de uma ou mais decisões (variáveis) para que o sistema responda àquelas mudanças?
- Análise de restrição – Onde estão as restrições ou gargalos no sistema e quais são as soluções trabalháveis para um ou outro, reduzindo-os ou eliminando-os?
- Efetividade de comunicação – Quais variáveis e representações gráficas podem ser usadas para, mais efetivamente, retratar o comportamento dinâmico ou operação do sistema?
- Passo 2: Elaboração de um esboço do modelo.

  Um esboço inicial do modelo do sistema deve ser elaborado com a realização dos primeiros estudos sobre o fluxo de informações, a disposição física dos componentes, a hierarquização dos módulos, etc. Dependendo da abordagem escolhida para a construção do modelo, algumas ferramentas e metodologias

podem ser aplicadas, tais como: diagrama de blocos, diagrama de objetos ou diagramas de fluxo de dados.

- Passo 3: Aquisição de dados.

  Com o esboço do modelo, podem ser identificadas as entradas e saídas mais relevantes, e verificarem-se quais são controláveis e quais são incontroláveis, para propor soluções para eliminar ou ao menos atenuar os problemas. A aquisição de dados pode ser realizada de diversas formas: dados históricos, medições "in loco", catálogos de fabricantes, entrevistas com operadores e projetistas do próprio sistema ou sistema similar, etc. Nesta etapa é importante a determinação do tipo de distribuição da probabilidade mais semelhante a cada conjunto de dados, através de análise de resíduos da distribuição, construção de histogramas e comparação com curvas de distribuição padronizadas, testes de aderência, etc.

- Passo 4: Validação dos dados.

  A verificação da validade dos dados coletados pode ser realizada através de:

- coleta de dados de diferentes fontes para verificação de semelhanças entre os dados dessas fontes com o conjunto de dados do estudo;
- construção de histograma para verificação de semelhança entre os dados coletados e os padronizados;
- corrida de simulação para verificação de semelhança entre os resultados obtidos com os reais.

- Passo 5: Construção de um modelo para realização do estudo de simulação.

  Nesta etapa, um fator importante para o sucesso da simulação é a escolha do software simulador, cujas gerações mais recentes contam com módulos gráficos e inteligência artificial, permitindo a realização de estudos de simulação por usuários sem conhecimentos profundos nas diversas áreas envolvidas, tais como modelagem, simulação, processo a ser estudado, estatística, programação de computadores, entre outros. Deve ser observado também o nível de detalhamento do modelo. Se, por um lado, a negligência na identificação de variáveis e na construção do modelo podem trazer inconsistência ao modelo, por outro lado, um modelo superdimensionado pode tornar o sistema muito complexo, aumentando os custos e diminuindo a sua confiabilidade.

- Passo 6: Validação do modelo.

O processo de verificação da fidelidade com que o modelo representa o sistema real é bastante semelhante ao de validação dos dados, sendo que ambos estão fortemente inter-relacionados. Assim, a validação dos modelos pode ter diversas abordagens:

- interatividade com o cliente, no sentido de verificar a correção das respostas desejadas, a adequação na eliminação de variáveis e aproximações realizadas na construção do modelo;
- identificação, através da animação do modelo, da ocorrência de impossibilidades físicas e/ou inconsistências;
- realização de corrida de simulação por outro modelador ou operador familiarizado com o estudo para verificação de problemas e revisão do modelo;
- "teste de Turing", que é a análise, por especialistas, de relatórios com resultados reais do sistema e resultados obtidos pela simulação do modelo, visando identificar diferenças entre os dois grupos de dados.
- Passo 7: Projeto do experimento.

  É a fase de proposição de procedimentos e testes para analisar e comparar as alternativas para a solução do problema. Para cada configuração experimental é importante a realização de uma nova bateria de testes de validação para garantir-se a confiabilidade dos resultados. Desta forma, é muito importante a determinação do tamanho adequado da amostra de dados para produzir resultados dentro do intervalo de confiança desejado.
- Passo 8: Execução do experimento e análise de resultados.

  Os dados utilizados e obtidos na execução do experimento devem ser organizados em forma de tabelas e gráficos e armazenados para posterior análise final.
- Passo 9: Refino do projeto de experimento.

  Este passo deve ser realizado caso os resultados obtidos não sejam satisfatórios para a resolução do problema.
- Passo 10: Análise final dos resultados e documentação do processo.

  A análise final dos resultados e a finalização do projeto devem ser organizados sob alguns aspectos:
- produção de documentação final que permita o rápido e claro entendimento do sistema por outros usuários quando da necessidade de ampliação ou manutenção do modelo;

- acesso restrito à documentação, de forma a evitar alteração involuntária da configuração do sistema, através de senhas, chaves de "hardware" e outros dispositivos.

4. PROJETO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO CUSTOMIZADO PARA O SETOR SUCROALCOOLEIRO

4.1. A proposta do ambiente de simulação

Em termos gerais, segundo FERREIRA (1986), ambiente é aquilo que cerca ou envolve os seres vivos ou as coisas. Para HOUAISS & VILLAR (2001), ambiente é o recinto, espaço, âmbito em que se está ou vive. Especificamente, no campo da informática, estes mesmos autores colocam que ambiente é o conjunto de elementos de hardware ou software onde os programas são executados. Neste aspecto, CAMARÃO (1989) define ambiente como as instalações de processamento de dados, consideradas em conjunto, incluindo certas características como: capacidade de memória, modalidade de processamento, periféricos, etc.

Em resumo, ambiente computacional pode ser definido como sendo o conjunto formado por elementos computacionais físicos e virtuais, que fornecem uma estrutura que permite a interação entre o usuário e o computador, com o propósito de se alcançar uma ou mais finalidades no tratamento de informações.

Ainda no campo da informática, o termo ambiente adquire diversas especificidades: ambiente de desenvolvimento, operacional, de execução, etc. A especificidade de interesse para este projeto é o ambiente de simulação. O desenvolvimento deste tipo de ambiente foi necessário em função do aumento significativo do uso da simulação como técnica de análise de sistemas.

A tarefa de compor um programa de simulação pode ser tornar complexa para pessoas com pouco conhecimento tanto sobre simulação como programação em geral. No intuito de diminuir tal complexidade, as ferramentas de simulação foram evoluindo em formas cada vez mais customizadas: linguagens de programação, linguagens de simulação e softwares de simulação. Estes últimos enfatizam a facilidade de uso e um ambiente de simulação integrado, além de benefícios que as linguagens de alto nível oferecem (PEGDEN et al, 1991).

4. PROJETO DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO CUSTOMIZADO PARA O SETOR SUCROALCOOLEIRO

Os ambientes de modelagem e simulação disponibilizam estruturas para a geração do modelo do sistema e do programa de simulação por meio de especificações textuais e gráficas. Cada ambiente apresenta características e aplicações distintas, mas todos oferecem ferramentas para o desenvolvimento de simulação e para análise dos resultados obtidos através da simulação (NONATO, 1999), além de recursos gráficos que auxiliam na visualização da construção do modelo e da sua execução.

Os softwares de simulação podem ser divididos em: pacotes específicos e pacotes de propósito geral.

Os pacotes de simulação específicos são projetados para um determinado tipo de sistema e/ou problema. Nestes pacotes, a modelagem é realizada na própria ferramenta, sendo os parâmetros do modelo especificados através de uma linguagem relacionada com o sistema modelado (PIEKARSKI, 1998). As ferramentas de modelagem apresentam funções específicas para o tipo de sistema para o qual o pacote foi projetado, com nomenclaturas bem familiares aos conhecedores do sistema. Existem pacotes específicos para modelagem de sistemas computacionais e seus sistemas operacionais, de redes de computadores, de sistemas aeroespaciais, etc.

Os pacotes de simulação de propósito geral apresentam recursos de modelagem mais genéricos, de forma a permitir a representação de variáveis e os seus relacionamentos, de praticamente qualquer tipo de sistema discreto. Para a utilização destes pacotes, o usuário deve conhecer bem a funcionalidade das estruturas de modelagem e entender como elas podem ser aplicadas ao sistema em análise. Um exemplo deste tipo de pacote é o Arena®, software selecionado para este projeto.

O ambiente de simulação desenvolvido neste trabalho é composto por um conjunto de 10 modelos padrões (figura 9), que possuem interfaces padrões para interação com o usuário. Para cada modelo padrão, disponibiliza-se experimentos para análise de desempenho e de sensibilidade.

Os modelos padrões são:

- 1° nível: Usina;
- 2° nível: Agrícola e Industrial; e
- 3° nível: Corte / Carregamento, Recepção de Matéria-Prima, Extração, Tratamento de Caldo, Fabricação de Açúcar, Fabricação de Álcool e Geração de Vapor.

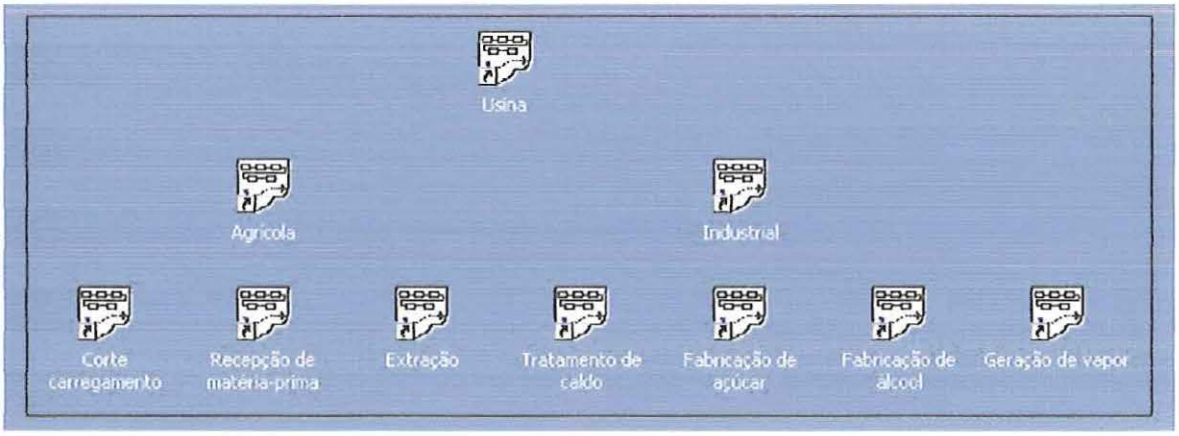

FIGURA 9 – Ambiente de simulação com os 10 modelos padrões

Assim, o ambiente deverá efetuar simulações e análises do sistema sucroalcooleiro em alguns escopos, por meio de um conjunto de modelos padrões que abordam escopos que variam desde o sistema como um todo, como o modelo Usina no 1° nível (da colheita da matéria-prima até a obtenção de produtos finais) até processos específicos, como o corte / carregamento ou a extração, no 3° nível. Os modelos formam módulos separados, porém podem compartilhar informações por meio da geração de arquivos externos, tanto de dados de entrada para os modelos quanto de resultados das execuções das simulações.

Os modelos padrões, assim como quaisquer outros modelos de simulação, devem ser desenvolvidos para um objetivo específico. Neste projeto, foram pesquisados objetivos de interesse das usinas, por meio de questionários e entrevistas. Durantes este processo de levantamento de objetivos, percebeu-se uma das restrições importantes do projeto: a viabilidade do desenvolvimento de modelos padrões para atender a um número relevante dos objetivos levantados depende de uma estrutura maior para o estudo, tanto de recursos humanos quanto de tempo e investimento financeiro. Além disso, muitos desses objetivos requerem a particularização de aspectos importantes dentro dos modelos, tais como regras de decisão e disponibilidade de dados, contrariando a idéia de padronização de modelos.

Após a reflexão sobre estes questionamentos e a análise dos questionários e entrevistas, definiu-se que os experimentos, modelos e interfaces desenvolvidos teriam como objetivo principal a análise da produção de açúcar, álcool e bagaço. Assim, outros aspectos também importantes, como os relacionados aos ciclos de vapor e água, não foram incluídos.

A este ambiente são integradas interfaces (figura 10) que permitem que o usuário compreenda o procedimento do estudo de simulação e introduza corretamente os dados necessários para as análises, mesmo que ele possua conhecimentos limitados sobre simulação e/ou programação computacional.

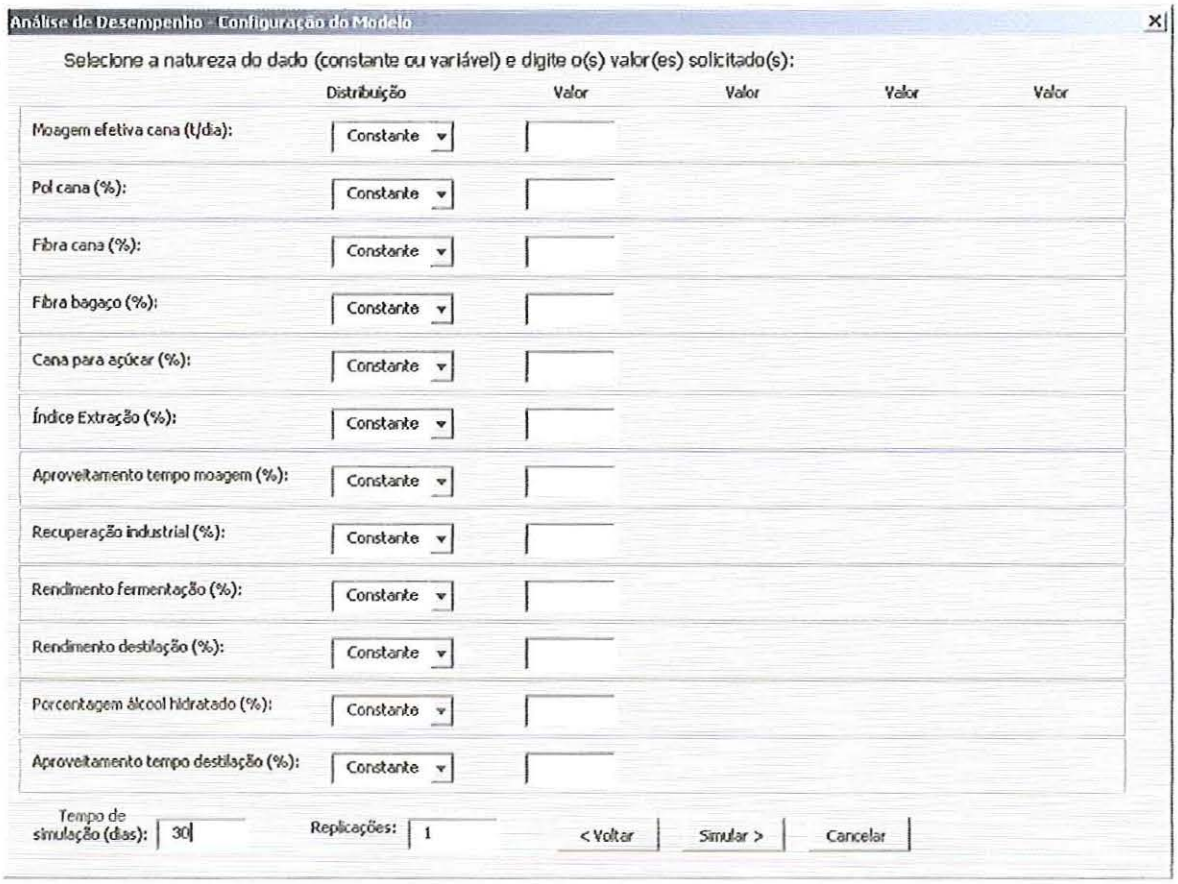

FIGURA 10 – Exemplo de interface de interação do ambiente com o usuário para a entrada de dados

As análises que o ambiente de simulação poderá realizar são:

- Análise de sensibilidade: permite o estudo das variáveis mais influentes sobre uma ou mais medidas de execução, e quanto influentes elas são.
- Análise de desempenho: permite verificar a evolução de desempenho do sistema considerando um conjunto de fatores tais como recursos, tempos, índices de eficiência, etc.

E, após estarem definidos os tipos de análise, este projeto se completa com a determinação dos experimentos possíveis de serem realizados.

A análise de sensibilidade permite que sejam realizados experimentos no formato de planejamentos fatoriais em dois níveis (2^k). Este tipo de planejamento foi escolhido pelo fato da indústria sucroalcooleira ser um tipo de indústria baseada na produção em escala. Neste tipo de indústria, grandes incrementos de melhoria nos índices de desempenho podem ser obtidos por pequenos incrementos nos fatores de produção. Assim, em geral, o planejamento da produção procura pequenas alterações que possam gerar melhorias

significativas. Neste aspecto, o planejamento fatorial em dois níveis se mostra adequado, uma vez que apresenta claramente a influência da mudança de um valor inferior para um superior no resultado a ser analisado.

Às variáveis de influência do sistema são atribuídas faixas de valores possíveis e/ou desejáveis (figura 11). A execução das diversas combinações dos valores inferiores e superiores de cada variável mostra a importância e a influência destas variáveis nos resultados do sistema. Assim, os resultados e os conhecimentos adquiridos nesta análise servirão de apoio para a definição de modificações que efetivamente produzam efeitos significativos nas respostas de interesse do sistema.

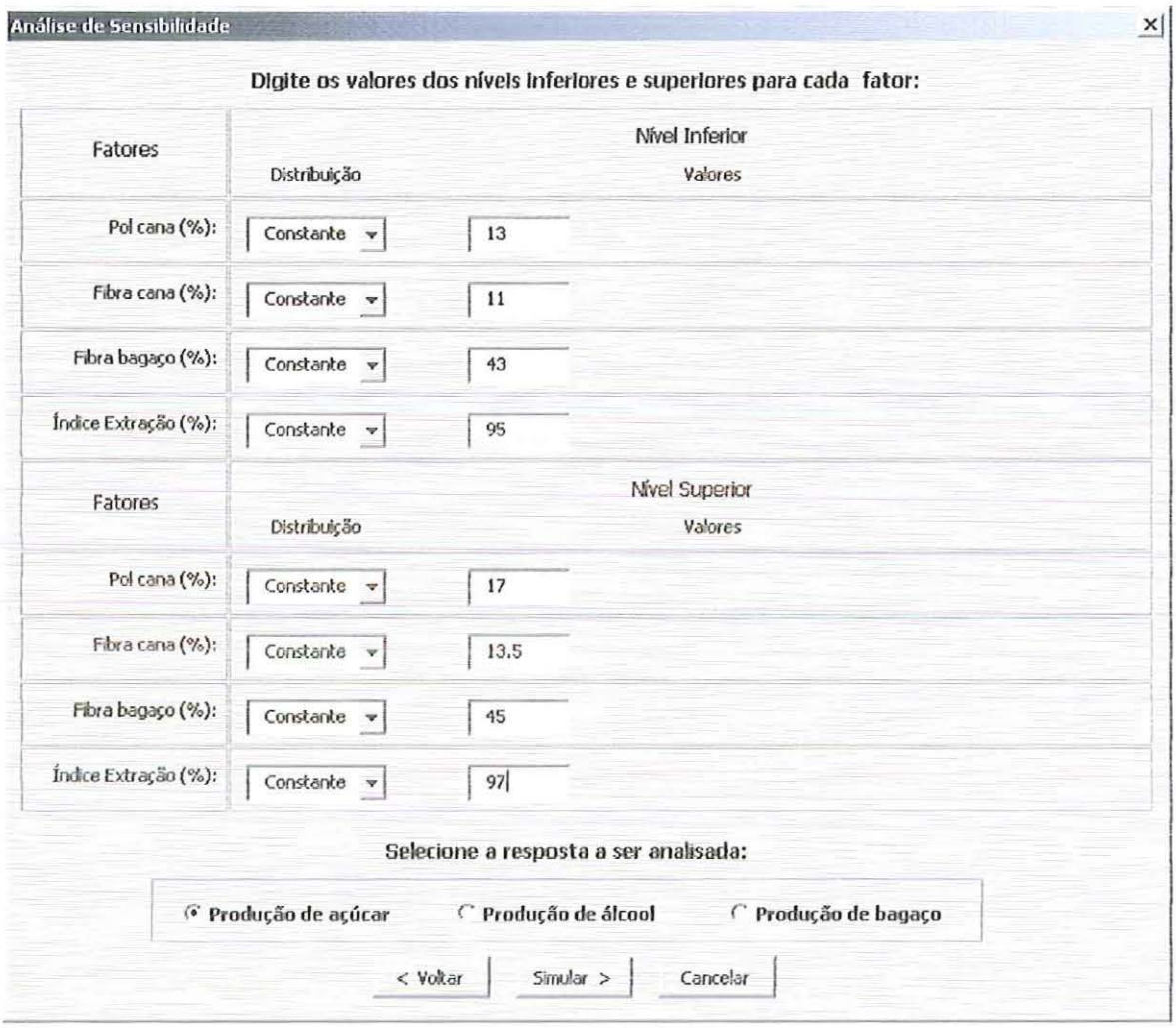

FIGURA 11 – Exemplo de interface para entrada de dados de uma análise de sensibilidade

Nas análises de desempenho, os experimentos permitem a comparação entre opções de planejamento. As interfaces desenvolvidas possibilitam uma grande quantidade de configuração de cenários (figura 12), utilizando-se o mesmo modelo. A possibilidade da execução de replicações do mesmo cenário na mesma execução do modelo permite que

haja um tratamento estatístico consistente nos resultados da simulação, o que aumenta a confiança nos resultados da análise.

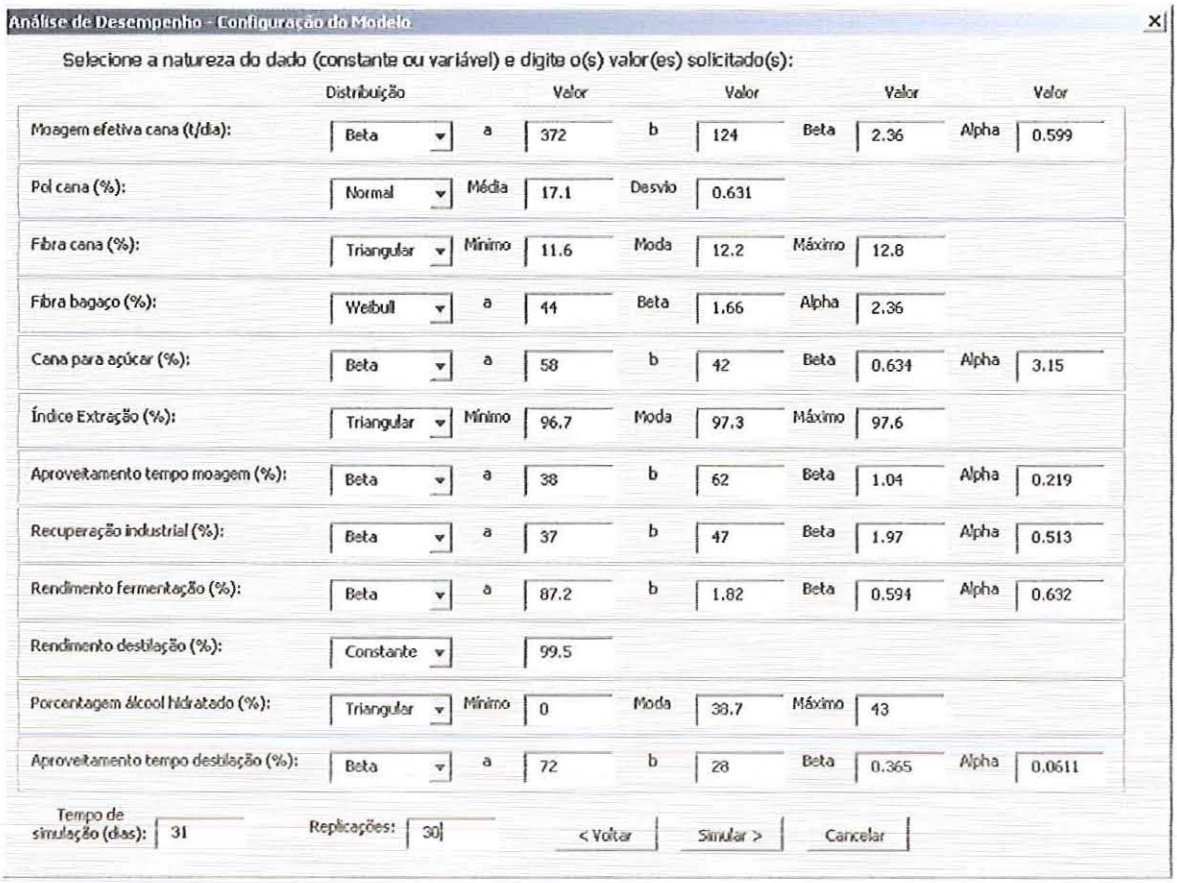

FIGURA 12 – Exemplo de interface para entrada de dados de uma análise de desempenho

Para este tipo de análise, podem ser utilizados, em um experimento inicial, valores históricos ou de períodos recentes de produção, para a determinação do estágio atual do sistema produtivo em relação ao desempenho. Este experimento inicial pode determinar também o nível de precisão do modelo em relação aos resultados do sistema. A partir daí, é possível a realização de experimentos com conjuntos de valores desejáveis nos diversos parâmetros, de acordo com a estratégia da usina (novos investimentos, mudanças no mercado, novo mix de produção, etc).

Este conjunto de tipos de análise fornecidos pelo ambiente de simulação, pode ser utilizado pelo planejador na tomada de decisões relativas a modificações no sistema produtivo. Além disso, pode tornar-se uma boa ferramenta para treinamento de funcionários, especialmente a análise de sensibilidade. Ao estudarem o sistema produtivo sucroalcooleiro por meio da execução dos modelos do ambiente de simulação, eles podem adquirir um senso de proporção entre entradas e saídas do sistema, bem como o entendimento de como as variáveis afetam o comportamento do sistema.

4.2. Implementação do ambiente de simulação

O ambiente de simulação tem como base as ferramentas de modelagem e análise fornecidas pelo software de modelagem e simulação Arena®, que foi escolhido principalmente por dispor de recursos que permitem o desenvolvimento dos modelos padrões e interfaces padrões.

O sistema sucroalcooleiro foi estudado de modo a permitir: a identificação dos tipos de análise viáveis e de interesse para o setor sucroalcooleiro (análise de desempenho e de sensibilidade, como relatado no item anterior); e a delimitação dos sub-sistemas a serem transformados em modelos padrões.

Assim, os modelos padrões desenvolvidos para o ambiente de simulação procuraram captar e representar a essência das atividades, processos e recursos padronizáveis dentro do sistema agroindustrial sucroalcooleiro. Deste modo, uma vez integrados ao ambiente, os modelos padrões permitirão que sejam analisados diversos cenários de planejamento, somente com a alteração dos valores dos parâmetros dos modelos, por meio das interfaces e dos arquivos de entrada de dados.

Estas interfaces foram desenvolvidas no VBA® (*Visual Basic Application*), um ambiente de desenvolvimento de programação baseado na linguagem Visual Basic® (CORNELL, 1993; NELSON, 1994), conforme apresentado na figura 13.

Este ambiente é integrado ao Arena®, ou seja, pode ser acionado a partir do ambiente de modelagem do Arena®, além de possuir procedimentos e rotinas desenvolvidos especificamente para as necessidades das aplicações em modelos de simulação do Arena®. Por exemplo, na figura 14, o procedimento ModelLogic_RunBeginSimulation() determina ao Arena® o que deve ser feito assim que a execução do modelo for iniciada.

O Arena® permite que os dados de entrada dos modelos de simulação sejam introduzidos a partir da leitura de arquivos externos, que também podem ser usados para a gravação dos resultados das simulações. Em geral, estes arquivos possuem formatação simples (por exemplo, arquivos do tipo texto, com extensão <*.txt>). Neste aspecto, outra característica do VBA é a possibilidade de extender a capacidade do Arena® de leitura e gravação para arquivos externos de formato mais complexo de aplicativos desenvolvidos para o sistema operacional Windows®.

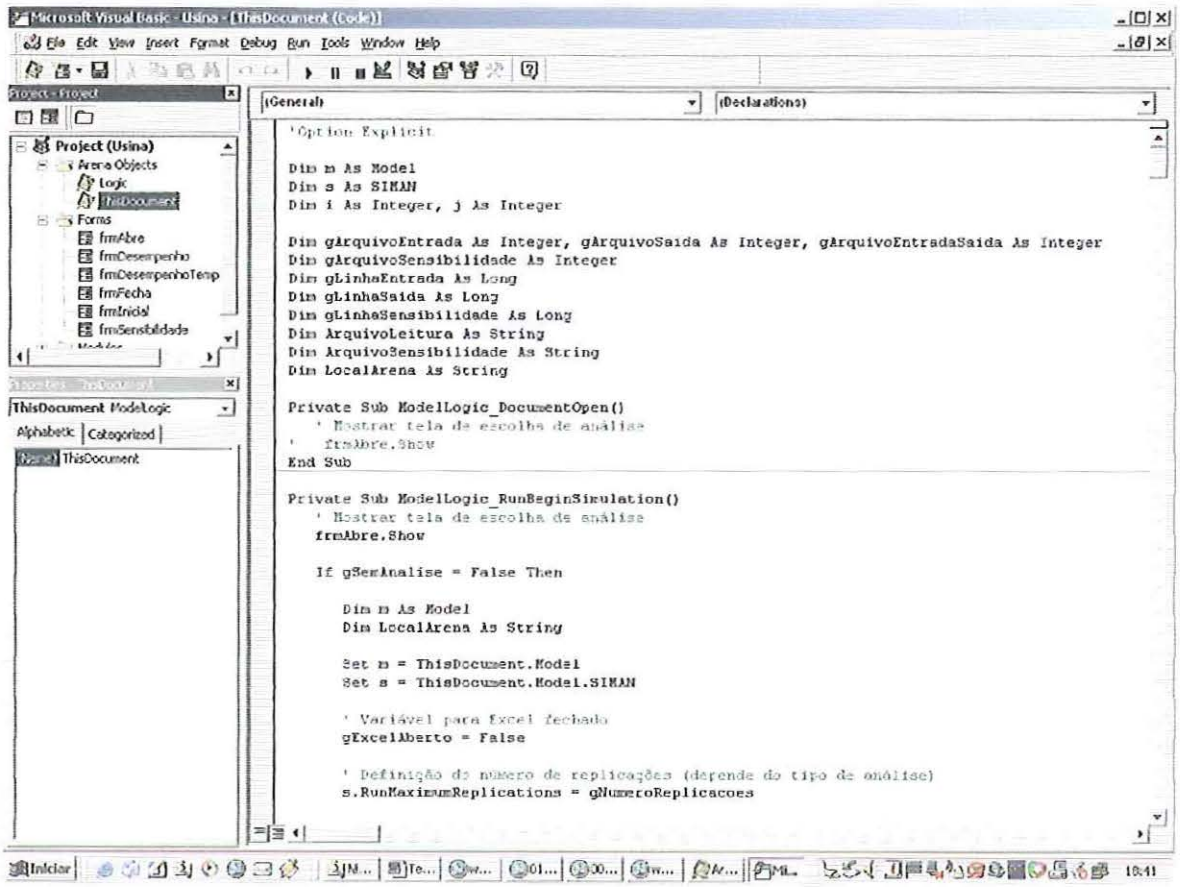

FIGURA 13 – Ambiente de programação do VBA® integrado ao Arena®

Este projeto utiliza duas formas de entrada de dados. A primeira é por meio de interfaces de entrada de dados, conforme será apresentado adiante. A segunda é por meio de planilhas do aplicativo Microsoft® Excel®. As planilhas de dados de entrada devem ser preenchidas previamente à execução dos modelos. Assim que se inicia a simulação, o modelo faz a leitura de valores na planilha, atribuindo-os às variáveis do modelo.

Os resultados das simulações também são apresentados em planilhas Excel®, assim que forem gerados após a execução dos modelos. Este aplicativo é bastante difundido no setor sucroalcooleiro e os profissionais do setor estão familiarizados com sua forma de trabalho. Além disso, a planilha Excel® permite uma formatação e diagramação de fácil programação, que podem facilitar a correta entrada de dados e a apresentação dos resultados em formatos compreensíveis como tabelas e gráficos.

```
(General)                                   (Declarations)

'Option Explicit

Dim m As Model
Dim s As SIMAN
Dim i As Integer, j As Integer

Dim gArquivoEntrada As Integer, gArquivoSaida As Integer, gArquivoEntradaSaida As Integer
Dim gArquivoSensibilidade As Integer
Dim gLinhaEntrada As Long
Dim gLinhaSaida As Long
Dim gLinhaSensibilidade As Long
Dim ArquivoLeitura As String
Dim ArquivoSensibilidade As String
Dim LocalArena As String

Private Sub ModelLogic_DocumentOpen()
    ' Mostrar tela de escolha de análise
'    frmAbre.Show
End Sub

Private Sub ModelLogic_RunBeginSimulation()
    ' Mostrar tela de escolha de análise
    frmAbre.Show

    If gSemAnalise = False Then

        Dim m As Model
        Dim LocalArena As String

        Set m = ThisDocument.Model
        Set s = ThisDocument.Model.SIMAN

        ' Variável para Excel fechado
        gExcelAberto = False

        ' Definição do número de replicações (depende do tipo de análise)
```

FIGURA 14 – Exemplo de programação no VBA, com procedimentos específicos para o Arena®

Para a análise de desempenho, o Arena® executa o modelo com os dados alimentados pela interface e, por meio de uma programação VBA®, os resultados são enviados para uma planilha Excel®. As respostas de cada experimento executado podem ser gravadas em diferentes arquivos, permitindo que o analista compare o desempenho do sistema nas opções de simulação que foram executadas.

Já na análise de sensibilidade, o modelo padrão executa todas as possíveis simulações em função dos valores inferiores e superiores dos parâmetros em estudo, gerando as respostas de interesse que são enviadas para uma determinada planilha Excel®, previamente preparada para executar os cálculos relativos ao procedimento de análise por planejamento fatorial. Com isso, a planilha apresenta os efeitos que são significativos para as respostas de interesse, bem como a variação causada por eles.

4.3. Processo de interação usuário / ambiente

A seguir, descreve-se o processo de interação entre o usuário e o ambiente de simulação customizado.

Na área de trabalho do Windows®, o usuário tem atalhos para o acionamento dos modelos padrões. Ao executar um deles, o respectivo modelo é aberto dentro do ambiente do Arena®. A figura 15 apresenta a tela inicial do ambiente de simulação para o modelo global da usina.

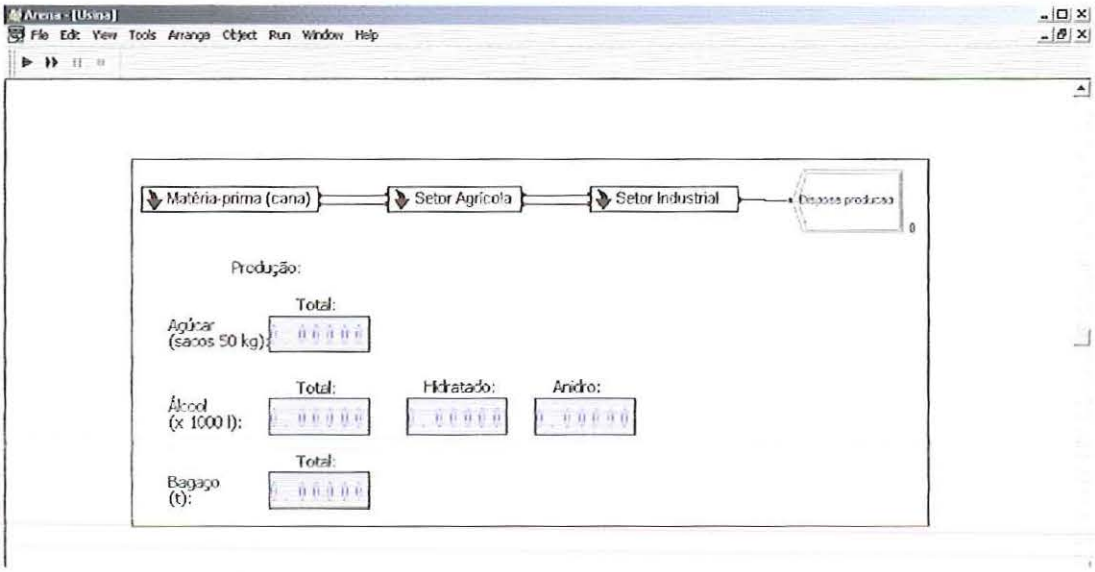

FIGURA 15 – Tela inicial do modelo padrão Usina

Com o ambiente aberto, o usuário pode iniciar a execução do modelo ao clicar no botão "**Go**". A primeira interface aparece, solicitando ao usuário que escolha entre umas das análises disponíveis, conforme apresentado na figura 16. Ao escolher, por exemplo, a análise de desempenho, o ambiente apresenta outra interface (figura 17), para a configuração das variáveis e de seus valores para que o Arena® possa executar a simulação.

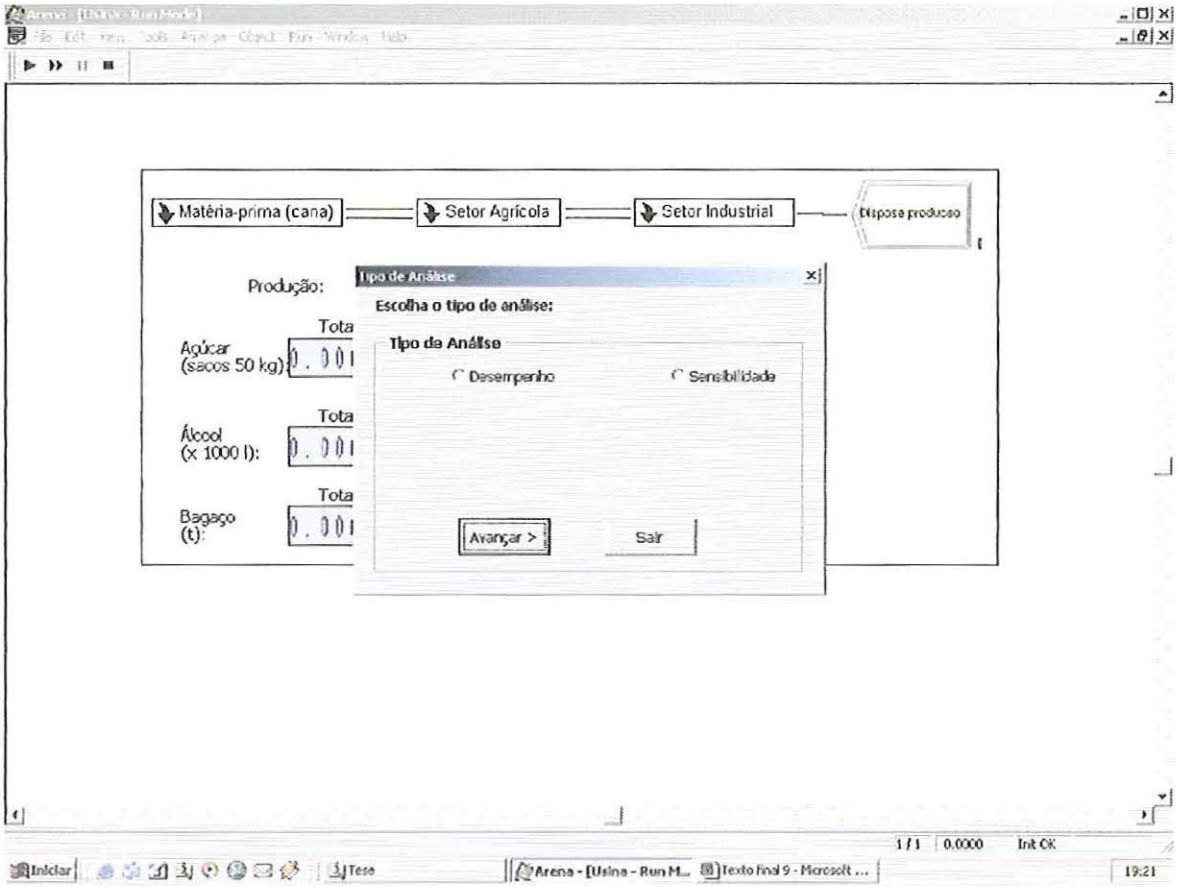

FIGURA 16 – Tela para seleção do tipo de análise

No exemplo da figura 17, o ambiente de simulação não está utilizando arquivos externos para a entrada de dados. A programação no VBA® atribui os dados fornecidos nesta tela às respectivas variáveis. Os valores nesta tela podem ser determinísticos, ou de natureza aleatória.

Para esclarecer a natureza aleatória, toma-se como exemplo a variável pol da cana (teor de sacarose na cana), conforme apresentado na figura 18. O usuário deve escolher, na caixa de seleção "Distribuição", a distribuição desejada. Por exemplo, escolhendo uma distribuição triangular, a interface apresentará 3 caixas de texto, onde deverão ser introduzidos três valores que são associados a esta variável: o primeiro representando o valor mínimo, o segundo representando o valor mais comum (moda) e o terceiro representando o valor máximo de uma distribuição triangular que representará o comportamento probabilístico desta variável.

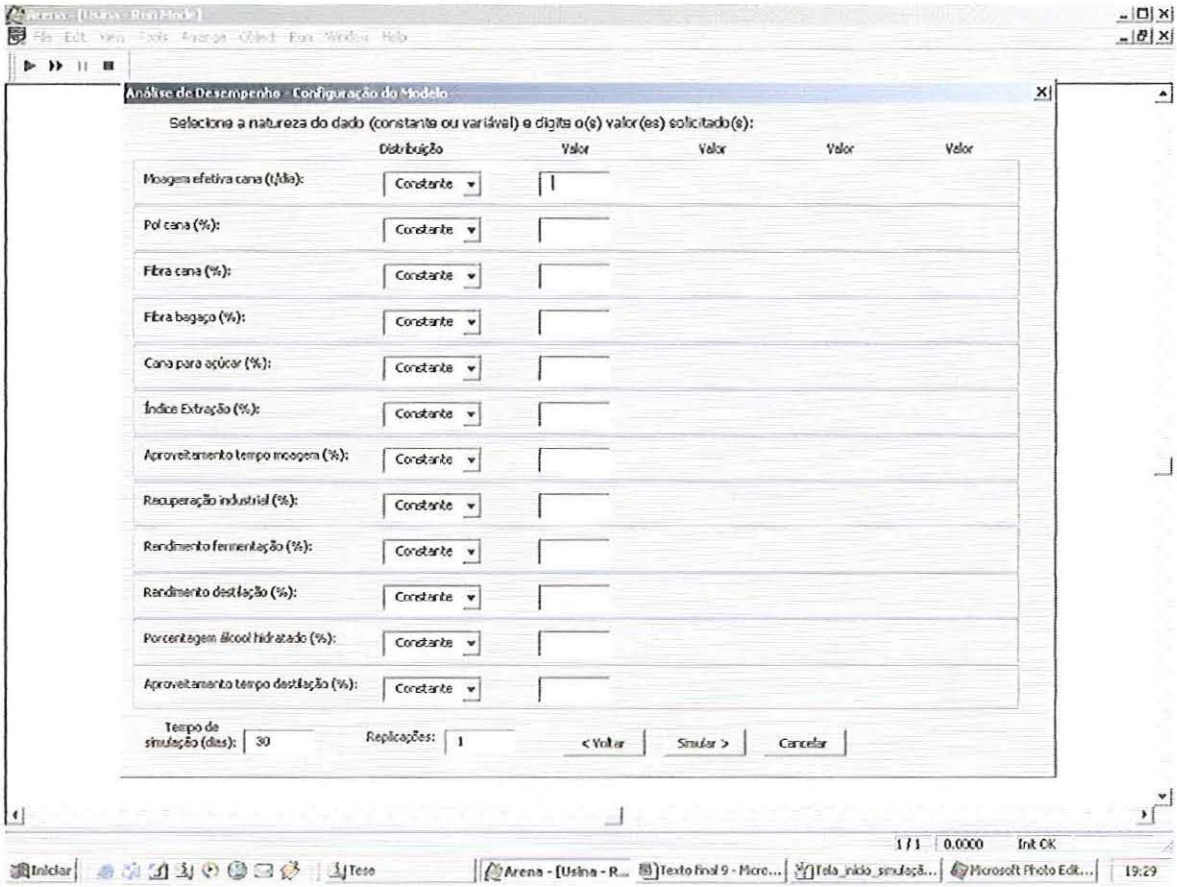

FIGURA 17 – Interface para entrada de dados para a análise de desempenho

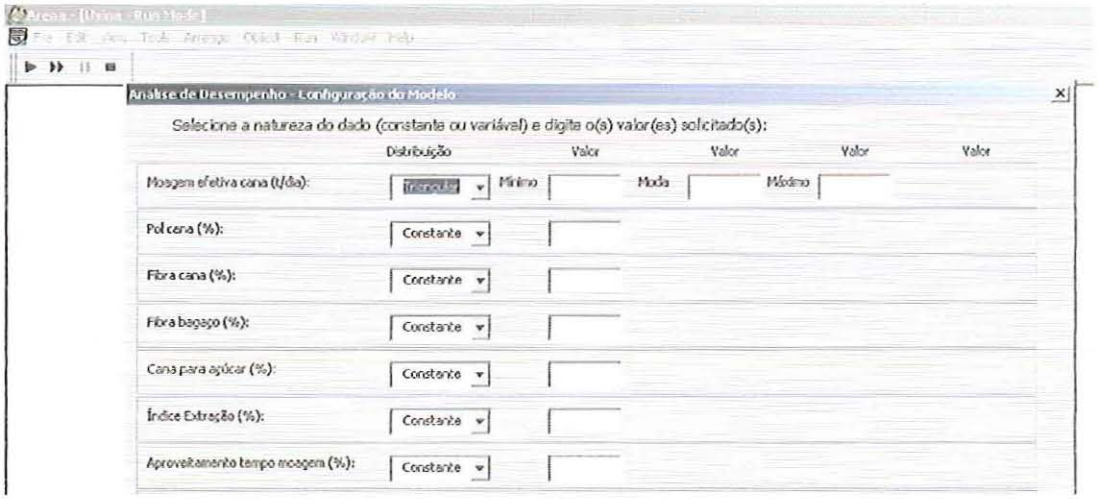

FIGURA 18 – Entrada aleatória de dados segundo uma distribuição estatística triangular

Outra forma de consideração da aleatoriedade na variável é por meio da leitura de um arquivo externo (em Excel®) contendo diversos valores desta variável (por exemplo,

valores históricos). A cada entidade gerada durante a execução, o modelo faz a leitura de um valor diferente da variável.

Após a entrada de dados, o modelo inicia a execução da simulação. As variáveis de desempenho do modelo em questão são atualizadas sempre que ocorrer alguma mudança no seu valor, e apresentadas na tela de execução. Finalizada a execução, os valores finais de desempenho ficam disponíveis para uma observação inicial (figura 19), por meio de uma animação do Arena®. Ao finalizar a execução pelo botão "**End**", o usuário é solicitado a salvar o arquivo de resultados.

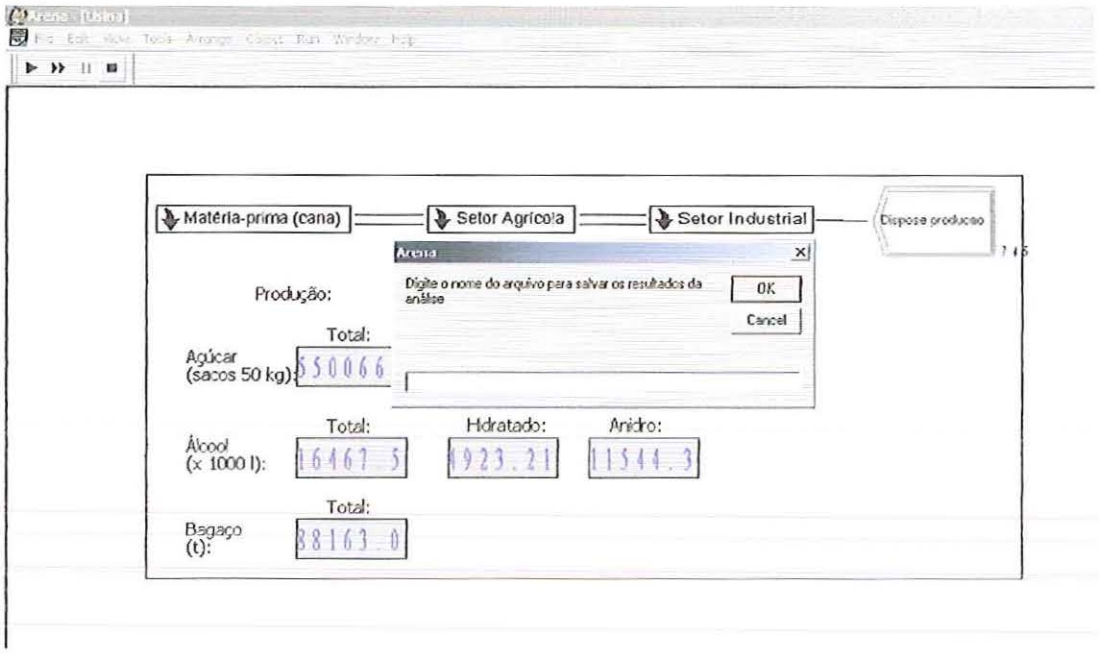

FIGURA 19 – Interface para gravação de resultados e finalização da análise

Maiores detalhes sobre a forma de interação entre o usuário e o ambiente de simulação estão descritos no item 5.6, onde são apresentados exemplos de implementação e testes com os modelos padrões.

O ambiente de simulação possui 10 modelos padrões em 3 níveis de hierarquia, conforme apresentado na figura 16. Os modelos padrões constituem-se em arquivo distintos, não necessitando de outros para funcionar. Assim, eles podem ser acessados de forma independente, ou seja, não é necessário acessar, por exemplo, um modelo do 2° nível antes de acessar um modelo do 3° nível. Desta forma, o ambiente fornece algumas possibilidades de estratégias de análise.

Primeiramente, o usuário pode utilizar a análise "de cima para baixo", partindo de análises mais agregadas e ir prosseguindo para análises mais específicas. Nesta estratégia, ele poderá aproveitar o conhecimento adquirido a partir das análises agregadas para criar

cenários adequados nas análises específicas, além do ganho de se ter a visão inicial do todo. Este tipo de estratégia pode ser observado no exemplo da figura 20.

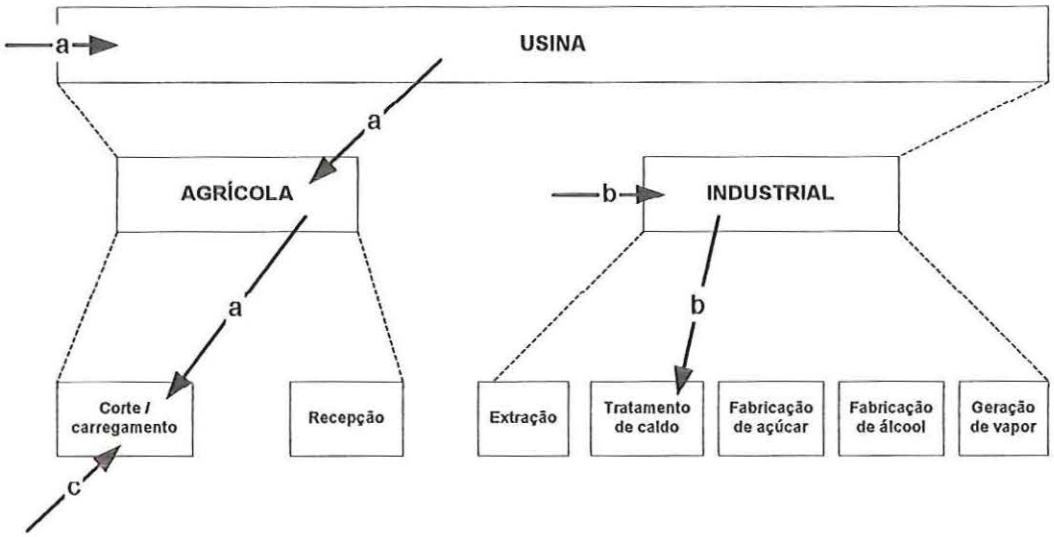

FIGURA 20 – Possibilidades de estratégias de análise no ambiente de simulação

Nesta figura, a estratégia descrita está representada pelo conjunto de setas marcadas com a letra "a". Assim, o analista inicia sua análise pelo modelo Usina. Obtidos os resultados após a execução deste modelo, ele inicia uma nova análise (podendo aproveitar dados da primeira análise), agora no modelo Agrícola. Finalmente, obtidos os resultados da execução deste modelo, o analista passa para outra análise mais específica no modelo Corte / carregamento.

O conjunto de setas marcadas com a letra "b" também representa a estratégia comentada acima, onde o analista inicia já em um nível intermediário de análise agregada (modelo Industrial), para depois continuar sua análise em um modelo mais específico (modelo Tratamento de caldo).

O ambiente de simulação permite, ainda, que o usuário vá diretamente para as análises específicas, sem a necessidade de passar pelas análises mais agregadas. Esta estratégia está representada, no exemplo da figura 20, pela seta marcada com a letra "c", onde o analista vai analisar diretamente um problema no modelo Corte / carregamento.

A utilização de um ou outro tipo de estratégia será definida pelo uso da simulação. A simulação deve ser orientada de forma a apoiar tomadas de decisões. Para casos em que o problema envolve muitas variáveis e setores, ou mesmo quando não se tem um conhecimento suficiente sobre a questão envolvida, a estratégia mais recomendada é a análise "de cima para baixo". Porém, quando se tem um nível razoável de conhecimento e

controle sobre as influências do problema sobre os demais setores ou variáveis, uma análise específica direta pode ser mais prática e eficiente.

O conhecimento suficiente para se adotar uma ou outra estratégia é desenvolvido por meio do treinamento do analista no ambiente de simulação. A familiarização ao ambiente é que permite que ele explore o melhor uso entre as estratégias.

4.4. Benefícios da utilização do ambiente de simulação

O desenvolvimento do ambiente de simulação customizado para o sistema agroindustrial sucroalcooleiro pode trazer ganhos em duas dimensões.

Em primeiro lugar, os modelos padrões e interfaces padrões, quando integrados ao ambiente de simulação do Arena®, permitem um ganho operacional, no sentido de que não há a necessidade do usuário conhecer a forma e as estruturas de modelagem e programação do software para efetuar as análises. Ele interage com o ambiente por meio de janelas de diálogo semelhantes às utilizadas pelos aplicativos em Windows®. Ao escolher o tipo ou setor de análise, o usuário está ativando um dos modelos padrões. De acordo com o tipo de análise, o usuário é solicitado a fornecer os valores dos parâmetros necessários para que os modelos sejam executados, sem ter que realizar qualquer procedimento mais complexo que envolva a programação do software.

Outro ganho representativo do ambiente de simulação está relacionado aos resultados das simulações. Os resultados das análises consideram a variação que ocorre nos parâmetros quando o sistema evolui no tempo, apoiando e fortalecendo o processo de tomada de decisão no planejamento da produção em função de fornecer resultados mais precisos, que consideram o comportamento dinâmico dos elementos envolvidos na análise. Além disso, é possível a análise de cenários alternativos, ou seja, o estudo de opções de produção pela variação dos parâmetros do modelo. Isto possibilita a sugestão de mudanças apoiadas em previsões de produção mais sólidas.

Havendo necessidade, estas análises podem ser realizadas com a incorporação de um volume considerável de dados históricos, sem que haja perda significativa no desempenho na execução do estudo, ou seja, sem que haja um aumento significativo no tempo de execução das análises e dos cenários. Finalmente, as análises, em especial a análise de sensibilidade, permitem que os profissionais do planejamento aumentem seu conhecimento sobre o comportamento dinâmico e as relações entre as variáveis do sistema agroindustrial sucroalcooleiro.

O capítulo seguinte detalha a metodologia e as etapas de desenvolvimento do ambiente de simulação.

5. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS, MODELOS E INTERFACES PADRÕES

O projeto do ambiente de simulação foi desenvolvido segundo uma metodologia de pesquisa baseada em 4 fases, que estão subdivididas em 6 etapas (figura 21).

As etapas são realizadas seqüencialmente, porém o desenvolvimento do projeto não é linear. Conforme o estudo avança, uma determinada etapa é mais enfocada, mas as etapas anteriores podem ser realimentadas com novas informações e conhecimentos adquiridos, passando, assim, por uma reavaliação que deve afetar as etapas posteriores. Estes ciclos de melhoria salientam a característica marcante da simulação de agregar conhecimentos à medida que os estudos progridem.

A etapa 4 exemplifica claramente os ciclos de melhoria. Esta etapa buscou adequar as informações do sistema produtivo sucroalcooleiro (etapas 1 e 2) com as informações sobre os softwares de simulação (etapa 3). Para isso, foram necessários a revisão e o aprofundamento das informações levantadas nestas etapas, o que propiciou a oportunidade de se aumentar o nível de conhecimento sobre o sistema estudado e os softwares.

As etapas de desenvolvimento do projeto estão descritas a seguir.

5.1. Etapa 1: Estudo e modelagem conceitual dos sistemas envolvidos

O estudo dos sistemas consiste no levantamento e documentação das informações sobre atividades produtivas das cadeias do açúcar e do álcool e sobre o processo de planejamento da produção na indústria sucroalcooleira, já comentadas anteriormente.

A modelagem conceitual dos sistemas refere-se ao desenvolvimento de modelos das atividades produtivas e suas interações, onde são relacionadas algumas das principais análises a serem desenvolvidas durante o processo de planejamento da produção em cada setor, mostrando seus objetivos, entradas e saídas. A modelagem teve, como ponto de partida, o trabalho de YAMADA (1999), que desenvolveu e validou modelos do processo produtivo sucroalcooleiro, utilizando ferramentas de modelagem baseadas em rede de Petri.

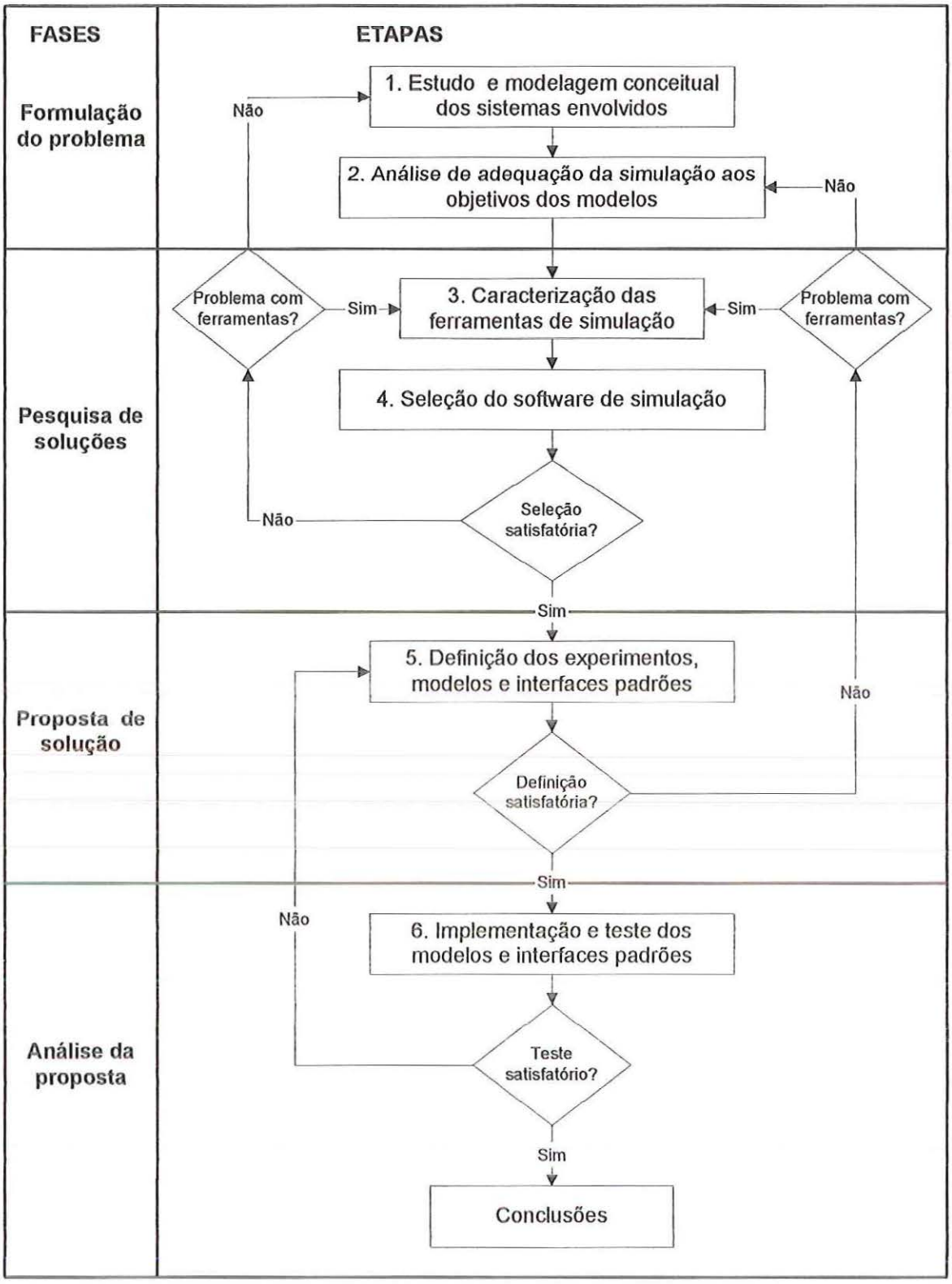

FIGURA 21 – *Metodologia de desenvolvimento do trabalho de pesquisa*

Os modelos desenvolvidos estão apresentados a seguir.

5.1.1. Plantio

A produção de matéria-prima é uma etapa fundamental na indústria sucroalcooleira, pois é onde se define a produção de açúcar e álcool. Cabe à indústria o trabalho de recuperar a sacarose produzida no campo. A figura 22 apresenta o modelo conceitual do sistema de plantio.

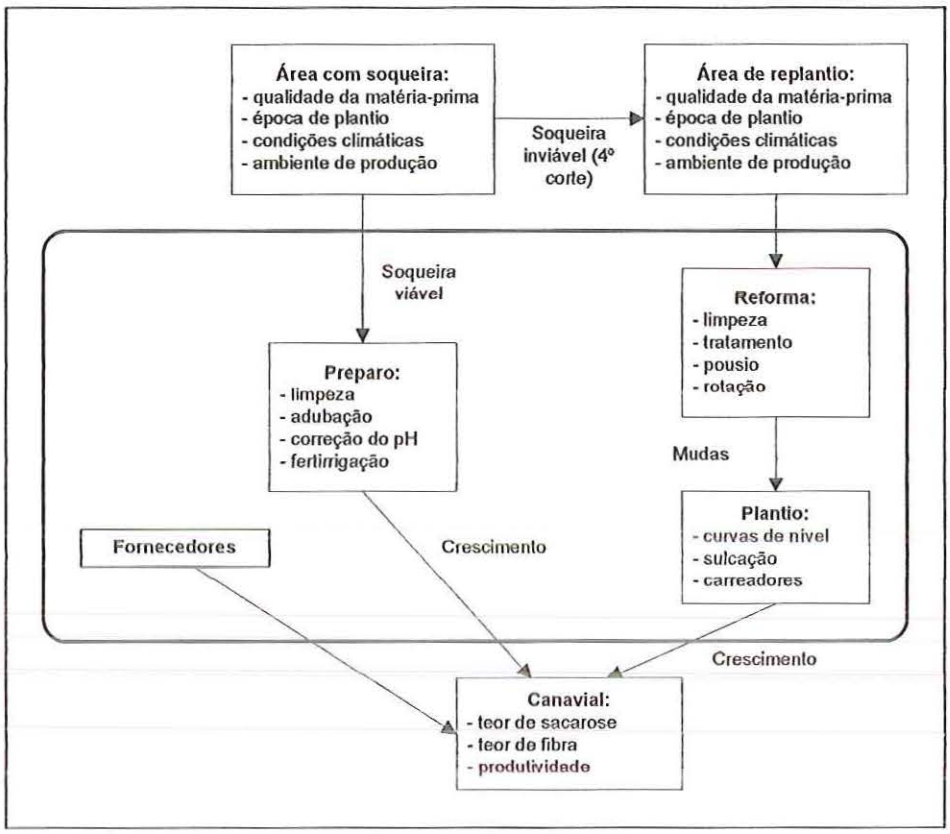

FIGURA 22 – Modelo conceitual do sistema de plantio

O objetivo principal desta etapa é a de maximizar a produtividade, que é a relação entre a quantidade de matéria-prima produzida por unidade de área, em conjunto com a maximização do teor de sacarose e a obtenção de um teor adequado de fibra.

Basicamente, existem dois tipos de área: com soqueira e para replantio de novas mudas. Os principais fatores comuns que afetam os dois tipos são: qualidade da matéria-prima, época de plantio, condições climáticas e ambientes de produção.

Em relação à qualidade da matéria-prima, os parâmetros mais importantes são: teor de fibra e teor de sacarose. O teor de fibra está relacionado ao potencial de produção de bagaço, mas seu aumento exige uma maior embebição que, apesar de ser benéfica à extração, pode criar dificuldades nas demais fases do processamento, especialmente na

evaporação. Quanto ao teor de sacarose, o objetivo é maximizá-lo, em conjunto com a maximização da pureza, que garante um baixo teor de impurezas e/ou de açúcares redutores, denotando uma maturação correta da matéria-prima.

Outro aspecto importante da qualidade da cana-de-açúcar é a sua adaptabilidade ao ambiente de produção, determinados em função das condições de umidade, relevo, composição química do solo, entre outros fatores. Assim, existem qualidades de cana-de-açúcar mais adequadas, em termos de produtividade (toneladas de matéria-prima por hectare), para determinados tipos de ambientes de produção.

Para as áreas com soqueira, outros dois aspectos são importantes: o número de cortes e o preparo do solo. Em função do ambiente de produção e da variedade da matéria-prima, algumas áreas com soqueira ultrapassam os quatro cortes usuais, com redução relativamente baixa na produtividade e na obtenção de um bom teor de sacarose, mas com ganho na quantidade total de matéria-prima produzida. Em relação ao preparo do solo, estas áreas exigem menos operações de tratos culturais, com menores custos na alocação de pessoal e de equipamentos, em relação às áreas de replantio.

As áreas de replantio necessitam de maiores cuidados no preparo do solo, demandando maiores custos na alocação de pessoal e de equipamentos, além da sua indisponibilidade para colheita para a safra seguinte, no caso do plantio de variedades de 18 meses.

Finalmente, outro aspecto importante é a utilização de fornecedores particulares de matéria-prima. Em geral, a maior parte da matéria-prima é cultivada em áreas próprias da usina, com pessoal e recursos próprios. No caso de fornecedores particulares, o controle dos parâmetros de fibra, sacarose, produtividade, etc, torna-se mais difícil. Algumas usinas utilizam-se do arrendamento de áreas de terceiros, para que elas próprias possam efetuar o plantio e controle destas áreas.

5.1.2. Colheita

A etapa de colheita é governada pela capacidade diária de extração (DELGADO & CESAR, 1990), não devendo haver falta ou excesso de fornecimento de matéria-prima para a indústria, cujo interesse é trabalhar dentro de sua capacidade máxima, com elevada eficiência, sobre uma matéria-prima colhida o mais recentemente possível e de melhor qualidade possível. Esse ideal, no entanto, nem sempre pode ser atingido na prática, por irregularidades nas operações agrícolas e industriais. O modelo conceitual do sistema de colheita está representado na figura 23.

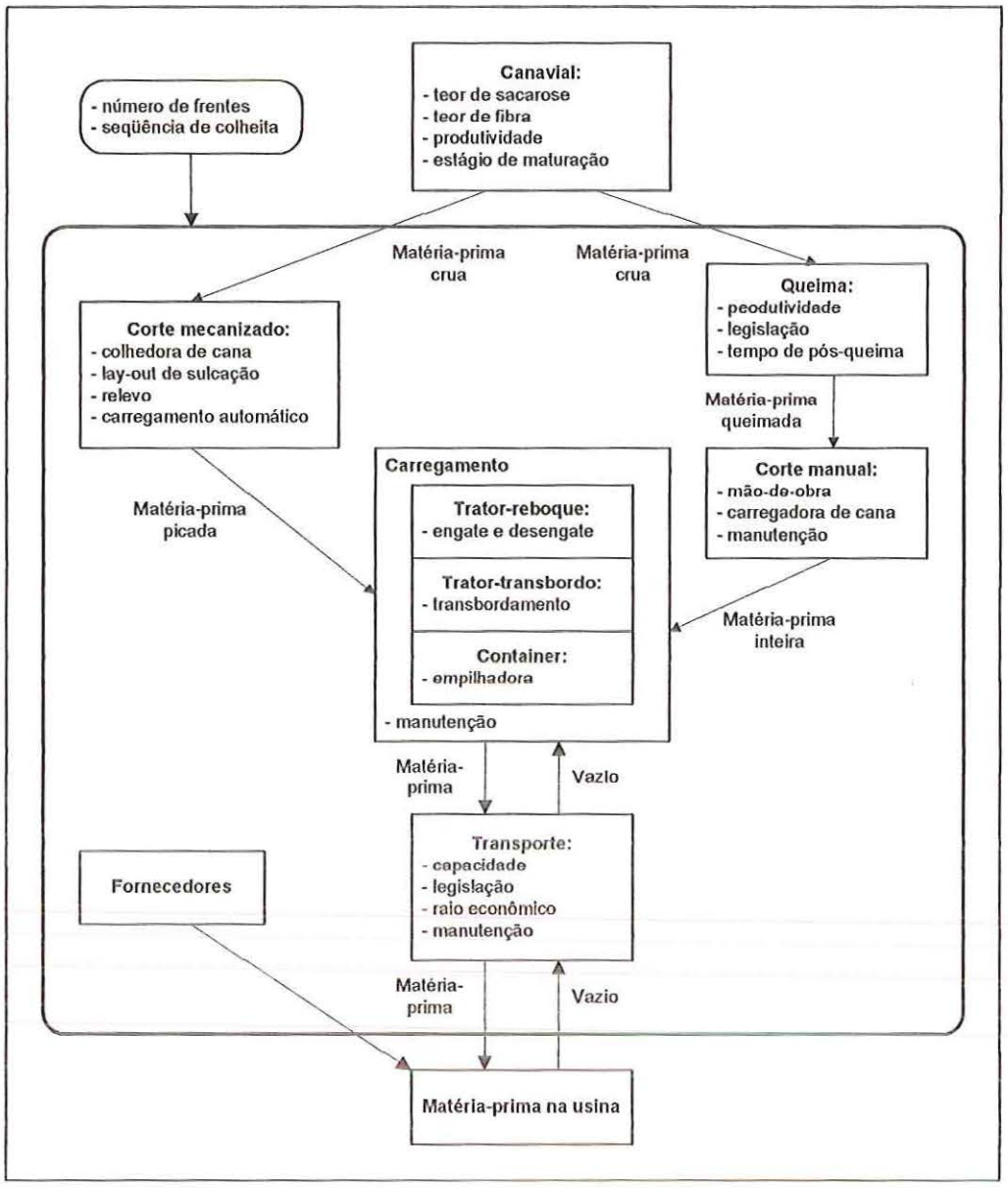

FIGURA 23 – Modelo conceitual do sistema de colheita

Em termos gerais, a produção de açúcar e álcool é função da quantidade de matéria-prima processada e do teor de sacarose da cana-de-açúcar no momento da colheita. Desde que o essencial é colher a cana-de-açúcar com um ótimo teor de sacarose para se obter um bom rendimento industrial, a determinação do estágio de maturação assume particular importância dentre as operações preliminares da colheita.

O período de maturação corresponde ao período necessário para que a planta atinja o seu pico de concentração de sacarose. Esse período é maior para o 1° corte, sendo menor para os cortes seguintes. Desta forma, as variedades mais comuns são: precoce,

média e tardia, quando a maturação é atingida, respectivamente, entre maio e junho, entre julho e agosto, e de setembro em diante.

DELGADO & CESAR (1990) mostram um estudo de BRIEGER sobre curvas de maturação, caracterizando o período útil de industrialização (PUI) como sendo o período em que a planta possui um teor de sacarose entre 13 e 16% (figura 24), faixa considerada ideal para a industrialização. Assim, as variedades precoces são as mais indicadas para o plantio, pois possuem um PUI longo, que possibilita um período maior para sua industrialização. Na prática, porém, percebem-se muitas exceções a esse comportamento, isto é, variedades precoces com PUI curto, mas a faixa de valores de 13 a 16% é uma referência para a determinação do estágio de maturação.

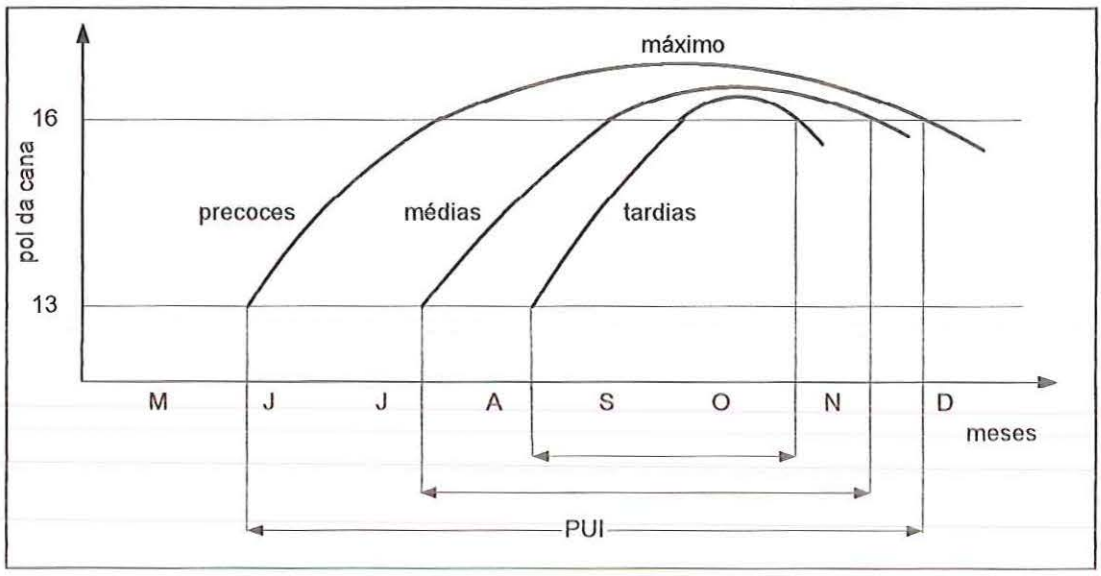

FIGURA 24 – Curvas de maturação da cana-de-açúcar (DELGADO & CESAR, 1990)

Outro aspecto importante de pré-colheita é a queima do canavial. A produtividade média dos trabalhadores do corte da cana-de-açúcar é de 1 t/h, em turnos de 10 horas de trabalho, em áreas com queima da cana-de-açúcar, caindo para 0,6 t/h em áreas sem queima, o que demonstra a utilidade da queima para este tipo de corte. Por outro lado, já existe uma legislação ambiental que determina, entre outros assuntos, cronogramas para a eliminação gradual da queima (MACEDO, 1998). Além disso, o processo de deterioração da matéria-prima se acelera. Dessa forma, o índice de mecanização da colheita da cana-de-açúcar deve aumentar, o que gera a necessidade um investimento em novas colhedoras, assim como um replanejamento do sistema de colheita e recepção de matéria-prima.

Outra questão relacionada à queima é a escolha do tipo de corte: manual ou mecânico. O corte manual necessita de contratação de pessoal, acarretando ações a fim de

garantir boas condições de trabalho (contrato temporário de trabalho, transporte até o campo, alojamento, etc), o que nem sempre é atingido, podendo acarretar conflitos sociais e trabalhistas.

No corte mecânico, por sua vez, o trabalho de uma colhedora pode ser realizado também no período noturno. Além disso, a colheita mecanizada apresenta outras vantagens, tais como: matéria-prima mais livre de terra para a indústria; melhor aproveitamento da capacidade útil da unidade de transporte, pela maior densidade da matéria-prima picada em relação à inteira; e carregamento automático nos reboques durante o corte. No entanto, para uma boa operação neste tipo de corte, deve-se colher, preferencialmente, em terrenos planos ou levemente inclinados, embora colhedoras mais modernas, adaptadas com esteira para movimentação, já conseguem trabalhar nesses tipos de terreno; e deve-se evitar terrenos irregulares ou pedregosos.

A escolha do tipo de carregamento a ser utilizado é de fundamental importância. No sistema de trator-reboque, utilizam-se diversas manobras de engate e desengate que consomem um tempo importante para o sistema de fornecimento. Esta questão vem sendo contornada pela adoção do denominado sistema bate-volta: a unidade de transporte, quando chega até a frente de corte, desengata os reboques vazios e engata outros reboques carregados previamente, dispensando-se o tempo de espera para o carregamento dos reboques.

O sistema de trator-transbordo, por sua vez, necessita de um número maior de tratores para manter um fluxo regular e constante de alimentação dos reboques engatados nas unidades de transporte.

O mesmo ocorre para o sistema de container, que deve contar com um número suficiente de empilhadoras para o preenchimento sem falhas, com os containers carregados, das carrocerias das unidades de transporte.

Algumas unidades de transporte são consideradas especiais, chamadas de veículos combinados longos, que necessitam de uma Autorização Especial de Tráfego (AET) para poder transitar nas rodovias (WIDMER, 1991). Entre outras, A AET especifica os horários e locais com permissão para o tráfego dessas unidades especiais, baseado no volume de tráfego da região em questão. A legislação rodoviária exige também que existam pontos pré-determinados para a entrada e a saída dessas unidades nas rodovias em que possuam permissão para trafegar.

A capacidade de carga está ligada à densidade da matéria-prima transportada. Esta, por sua vez, depende de alguns fatores, tais como: variedade da matéria-prima, arranjo da matéria-prima (ordenado em fileiras ou aleatoriamente), forma de corte (matéria-prima inteira ou picada), entre outros.

Cada viagem de uma unidade de transporte consome um considerável tempo, especialmente quando estão carregadas. Desse modo, deve-se analisar quais distâncias são viáveis para se transportar matéria-prima, pois quanto maior a distância do local de carregamento de matéria-prima em relação à usina, maiores serão o tempo e energia consumidos para a chegada dessa matéria-prima, além de aumentar o risco de uma falha no abastecimento, que pode ocasionar a interrupção do processo industrial. Por meio dessa análise, chega-se ao raio econômico, que se traduz na maior distância economicamente viável para se efetuar o transporte de matéria-prima até a unidade produtora.

Outro aspecto importante do planejamento da colheita é a definição do número de frentes e da seqüência de colheita. Esta definição considera a capacidade diária de extração e a disponibilidade de equipamentos para corte e carregamento e de unidades de transporte de matéria-prima nas diversas áreas de plantio, de modo a gerar um fluxo constante e uniforme de fornecimento de matéria-prima à indústria. Nesse planejamento, deve-se considerar também o fluxo de colheita de matéria-prima de terceiros, que pode ser realizada pelos fornecedores ou pela própria usina.

5.1.3. Recepção de matéria-prima

O objetivo principal desta etapa é o de propiciar que a cana descarregada seja conduzida à extração de uma maneira uniforme e contínua, minimizando-se as interrupções, falhas ou excessos de carga, por meio da análise conjunta das opções de tipos de descarga e de equipamentos de descarga e de movimentação da matéria-prima. Tal análise deve procurar, também, minimizar os tempos de espera das unidades de transporte de matéria-prima nas filas que possam ocorrer. O modelo conceitual do sistema de recepção de matéria-prima é apresentado na figura 25.

Em geral, em todas as unidades de transporte de matéria-prima de fornecedores efetua-se a amostragem, por causa do menor controle sobre os parâmetros de fibra, sacarose, etc. Para a matéria-prima cultivada pela própria usina, procura-se efetuar a amostragem em todas as unidades de transporte, porém, algumas podem deixar de ser amostradas para cobrir eventuais atrasos no fornecimento e/ou para diminuir a fila de unidades de transporte na entrada da usina.

O procedimento de bate-volta, assim como no carregamento das unidades de transporte no campo, também pode ser utilizado na recepção de matéria-prima, onde a unidade de transporte desengata os reboques cheios e engata reboques vazios. Com isso, a unidade de transporte fica liberada para iniciar uma nova viagem, enquanto que os reboques carregados são movimentados por tratores.

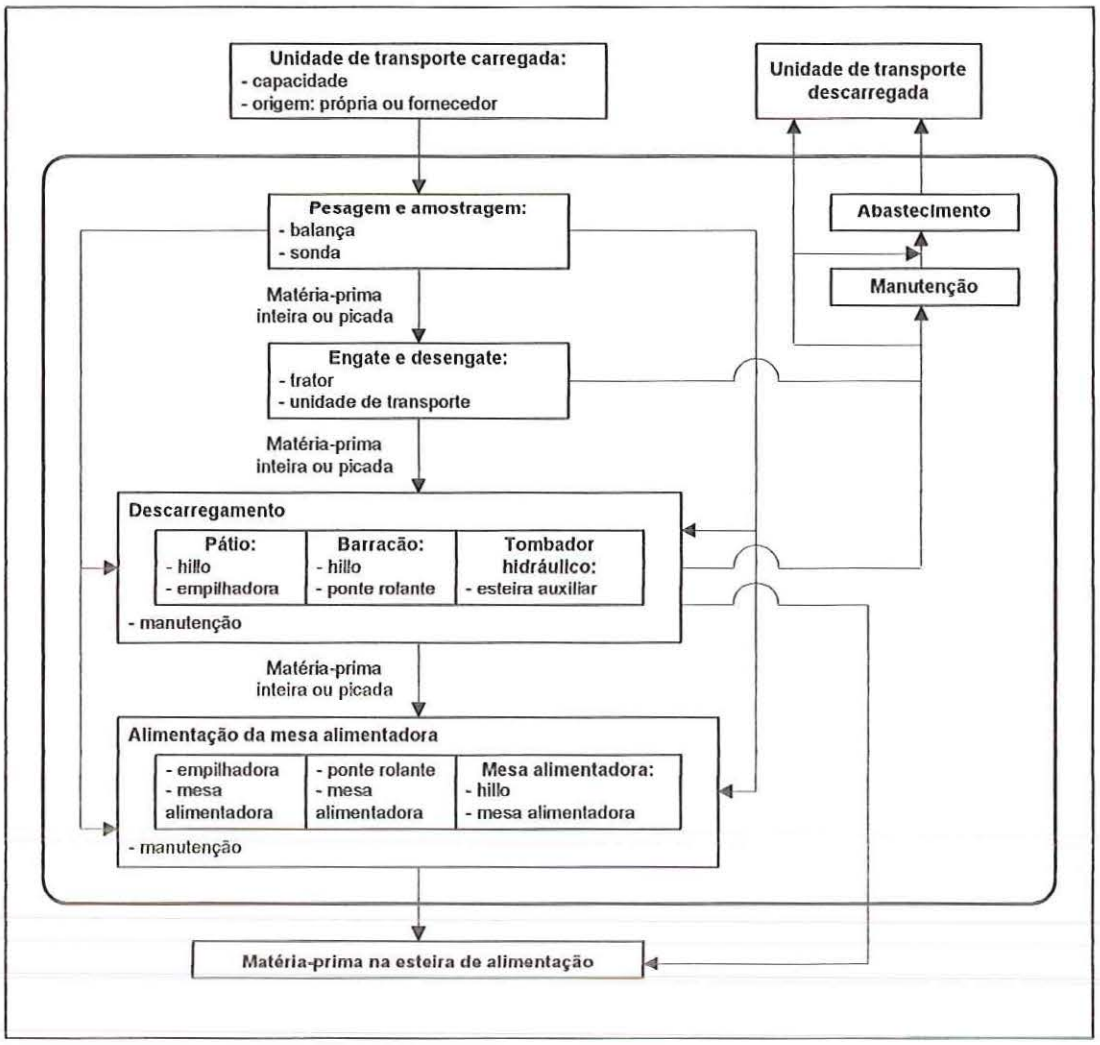

FIGURA 25 – Modelo conceitual do sistema de recepção de matéria-prima

Em relação ao sistema de descarregamento, algumas características do sistema em pátio são (SATO):

- investimento inicial menor em infra-estrutura;
- custo elevado de manutenção dos tratores;
- limitação na altura de armazenamento, necessitando de área proporcionalmente maior;
- consumo elevado de combustível dos veículos utilizados para a movimentação da matéria-prima;
- necessidade de mesa alimentadora adaptada para alimentação de matéria-prima com tratores-empilhadoras.

Algumas características do sistema de barracão são (SATO):

- custo de aquisição do barracão e da ponte rolante elevados;
- capacidade de alimentação limitada à capacidade da garra hidráulica;
- altura de armazenamento maior em relação ao pátio, necessitando de menor área;
- economia no consumo de combustível, podendo ser utilizada a energia gerada na própria usina para movimentação de matéria-prima;
- perda de tempo na movimentação das pontes rolantes, especialmente em barracões longos.

O espaço físico disponível é um fator importante não só para o sistema de armazenamento em pátio como também para a opção de descarregamento direto nas mesas alimentadoras. Dependendo do tipo de unidade de transporte a ser descarregada, seu tamanho impede que o descarregamento seja realizado em determinados equipamentos, por falta de espaço para manobras. Para contornar esta dificuldade, manobras adicionais de engate e desengate podem ser necessárias para diminuir o tamanho da unidade de transporte.

As unidades de transporte vazias podem necessitar de uma manutenção e/ou de um abastecimento de combustível, antes de retornar para o campo.

A alimentação nas esteiras de cana-de-açúcar deve ser a mais uniforme possível. Isso significa que se deve formar camadas de cana bem distribuídas tanto na largura quanto no comprimento das esteiras, o que se obtém com relativa facilidade, no caso da alimentação com matéria-prima picada.

Para a alimentação com matéria-prima inteira, a obtenção de uma boa alimentação, segundo SATO, inicia-se no carregamento de matéria-prima no campo. Um feixe bem distribuído e alinhado faz com que a unidade de transporte consiga carregar uma boa quantidade de matéria-prima de uma forma segura, facilitando o descarregamento e aumentando a probabilidade dela cair sobre as esteiras na posição horizontal, o que proporciona a formação de camadas bem uniformes de cana-de-açúcar, sem falhas ou excessos.

Complementando os procedimentos para uma adequada alimentação de matéria-prima para a extração, faz-se necessária a operação bem sincronizada entre as mesas e esteiras, ajustando-se suas velocidades de alimentação de forma que a esteira de alimentação principal esteja sempre com uma camada uniforme de cana-de-açúcar.

5.1.4. Extração

O objetivo do sistema de extração (figura 26) é buscar um compromisso entre alta capacidade de moagem e elevada extração, além da obtenção de bagaço com um teor de umidade adequado para a queima eficiente no processo de geração de vapor. Para isso, um bom preparo da matéria-prima é de fundamental importância.

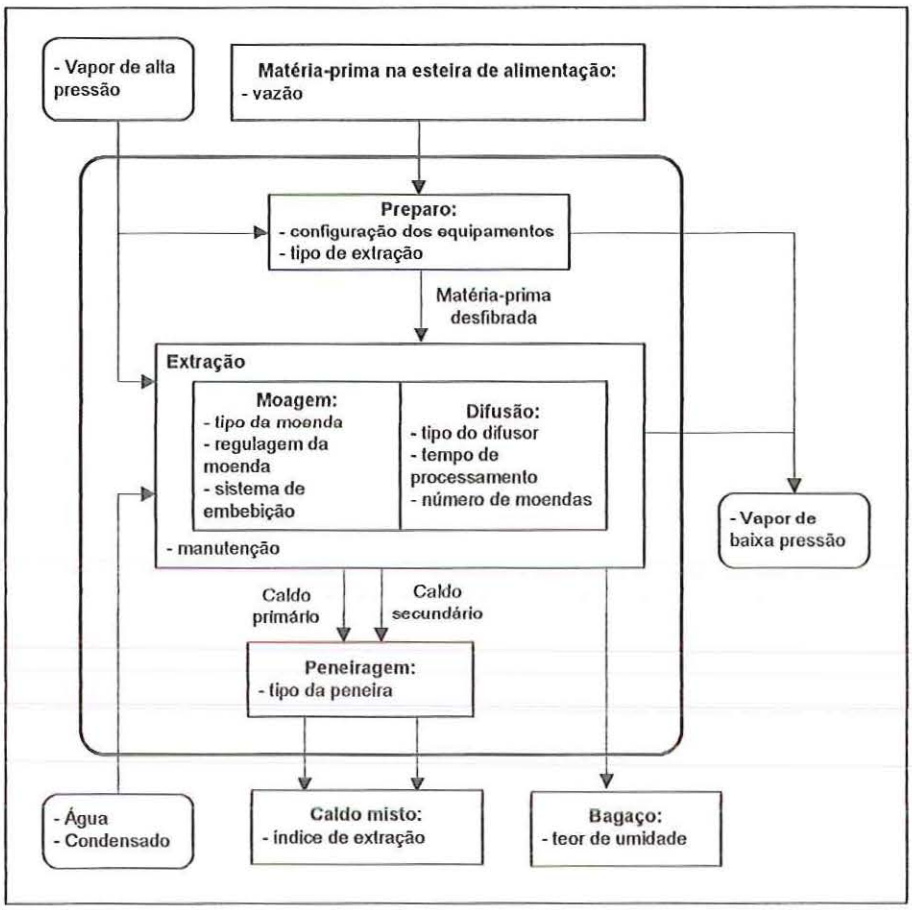

FIGURA 26 – Modelo conceitual do sistema de extração

A configuração mais utilizada para o preparo é a de um picador seguido de um desfibrador convencional, para a extração em moendas. Neste sistema, obtêm-se índices de preparo próximos de 87%.

Em relação à embebição, sua eficiência depende do volume de água aplicado. Os principais tipos são (NUNES; DELGADO & CESAR, 1990):

- simples: consiste na simples aplicação de água no bagaço de cada terno, a partir do 2°. A eficiência desse sistema é baixa, pois o volume de água aplicado é pequeno. Por outro lado, o aumento da quantidade de água para valores muito elevados torna o sistema antieconômico, pois exige um

superdimensionamento dos demais setores da usina para a eliminação deste excesso de água.

- composta: método mais empregado, consiste na adição de água no último terno da moenda, fazendo o caldo resultante deste último terno retornar ao terno anterior. Este procedimento é repetido sucessivamente até o caldo atingir o 2° terno. Para uma mesma quantidade de água aplicada, este sistema é mais eficiente que a embebição simples, uma vez que obtém-se um volume de caldo maior aplicado ao bagaço em cada terno.

Outros tipos de embebição derivam da embebição composta, variando-se os locais de aplicação da água de embebição e os circuitos de recirculação do caldo de embebição.

Para complementar o conjunto de procedimentos para se obter as melhores condições de alimentação e extração, efetua-se a regulagem da moenda, que consiste em descrever os posicionamentos geométricos dos componentes dos ternos para uma determinada condição de trabalho desejada. Ela leva em consideração, entre outros fatores, a capacidade horária de moagem, a porcentagem de fibra da cana-de-açúcar, o comprimento dos rolos da moenda, a velocidade de rotação dos rolos, a porcentagem de fibra do bagaço na saída dos ternos, o tipo de frisos, o diâmetro das camisas, o número de ternos da moenda, a forma de alimentação dos ternos, a qualidade do preparo da matéria-prima e a pressão hidráulica nos cabeçotes dos ternos.

Para o processo de difusão, o bom preparo da matéria-prima torna o processo físico-químico de lixiviação e percolação eficiente dentro do difusor para se obter elevada extração de sacarose.

Neste processo, a eficiência depende fundamentalmente do preparo inicial da matéria-prima. Deve-se atingir índices de preparo da ordem de 92%, para se obter uma camada uniforme e permeável de matéria-prima, que permita uma boa ação da água ou do caldo de diluição sobre os caldos retidos pela camada de massa fibrosa. Para isso, utilizam-se algumas opções, tais como: um segundo picador, um desfibrador vertical no lugar do convencional, ou mesmo um segundo desfibrador.

Outro fator importante é o tempo de processamento dentro do difusor. De acordo com o tipo do difusor, existem diferentes sistemas de lavagem, de embebição e de recirculação de caldo, cada um com um tempo próprio de processamento da difusão.

Comparando-se a moagem com a difusão, percebe-se que em regiões sucroalcooleiras de grandes índices de extração com moendas, é possível também a obtenção de valores um pouco superiores com difusores.

Algumas vantagens mencionadas por construtores de difusores são:

- obtenção de bagaço com uma pol variando de 1 a 2%;

- extração da sacarose variando de 96,5 a 98%;
- menor custo inicial em relação às moendas;
- pouca exigência de pessoal e manutenção, em função do processo inteiramente automático;
- obtenção de caldo mais limpo, pois, em difusores, a camada de bagaço funciona como elemento de filtração.

5.1.5. Tratamento de caldo

Um dos principais índices para medição da eficiência da concentração é dado pela recuperação, que é a relação entre a sacarose obtida no açúcar fabricado e a sacarose contida no caldo misto.

As perdas consideradas na concentração são:

- perdas de sacarose na torta;
- perdas de sacarose no mel final;
- perdas indeterminadas (vazamentos, arrastes, inversões, etc.).

A concentração inicia-se com o tratamento de caldo. Um aspecto relevante nesta etapa (figura 27) é a utilização de insumos. A boa operação dos equipamentos e a qualidade dos insumos, especialmente enxofre, cal e polímeros, proporcionam uma boa qualidade ao açúcar, aliado ao consumo racional destes insumos.

Outro fator importante é tempo de residência do caldo nos decantadores, que depende do fator de decantação, que é a diferença de densidade entre a matéria a ser decantada e o líquido no qual está contido. Além disso, a superfície e a forma das partículas, bem como a viscosidade do líquido, também exercem sua influência. Um tempo de residência elevado provoca a destruição de açúcares e a inversão da sacarose, com conseqüente diminuição na recuperação de açúcar e na sua qualidade.

Em geral, o tempo de residência pode variar de 45 minutos a 4 horas, dependendo do tipo de decantador empregado (COPERSUCAR, 1999).

Um subproduto importante é a torta. Segundo DELGADO & CESAR (1990), a produção de torta varia entre 27 e 45 kg por tonelada de cana-de-açúcar, com um teor de umidade de 65 a 80%. Para uma boa operação de filtração, a quantidade de sacarose na torta não deve ser superior a 1%.

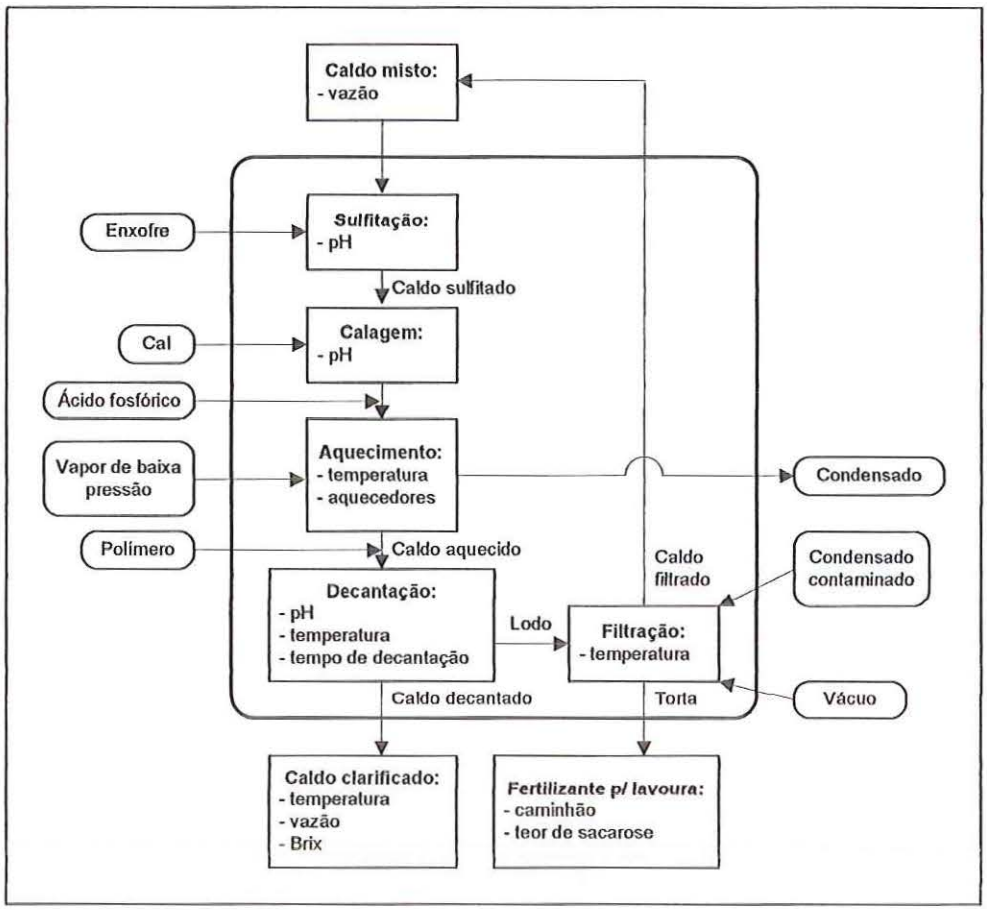

FIGURA 27 – Modelo conceitual do sistema de tratamento de caldo

5.1.6. Fabricação de açúcar

A fabricação de açúcar possui dois processos fundamentais: evaporação e cristalização. O modelo conceitual está representado na figura 28. O objetivo deste setor é racionalizar a utilização do vapor na evaporação e maximizar a recuperação de açúcar na cristalização.

A eficiência da etapa de evaporação pode ser medida por:

- efeito: é a eficiência da evaporação, que é dada pela relação entre a quantidade de vapor de aquecimento utilizado e a quantidade de vapor produzida em cada efeito;
- múltiplo-efeito: é a economia ou eficiência do múltiplo-efeito, que é dada pela relação entre a quantidade total de vapor produzido no múltiplo-efeito e a quantidade de vapor de alimentação introduzido no 1° efeito.

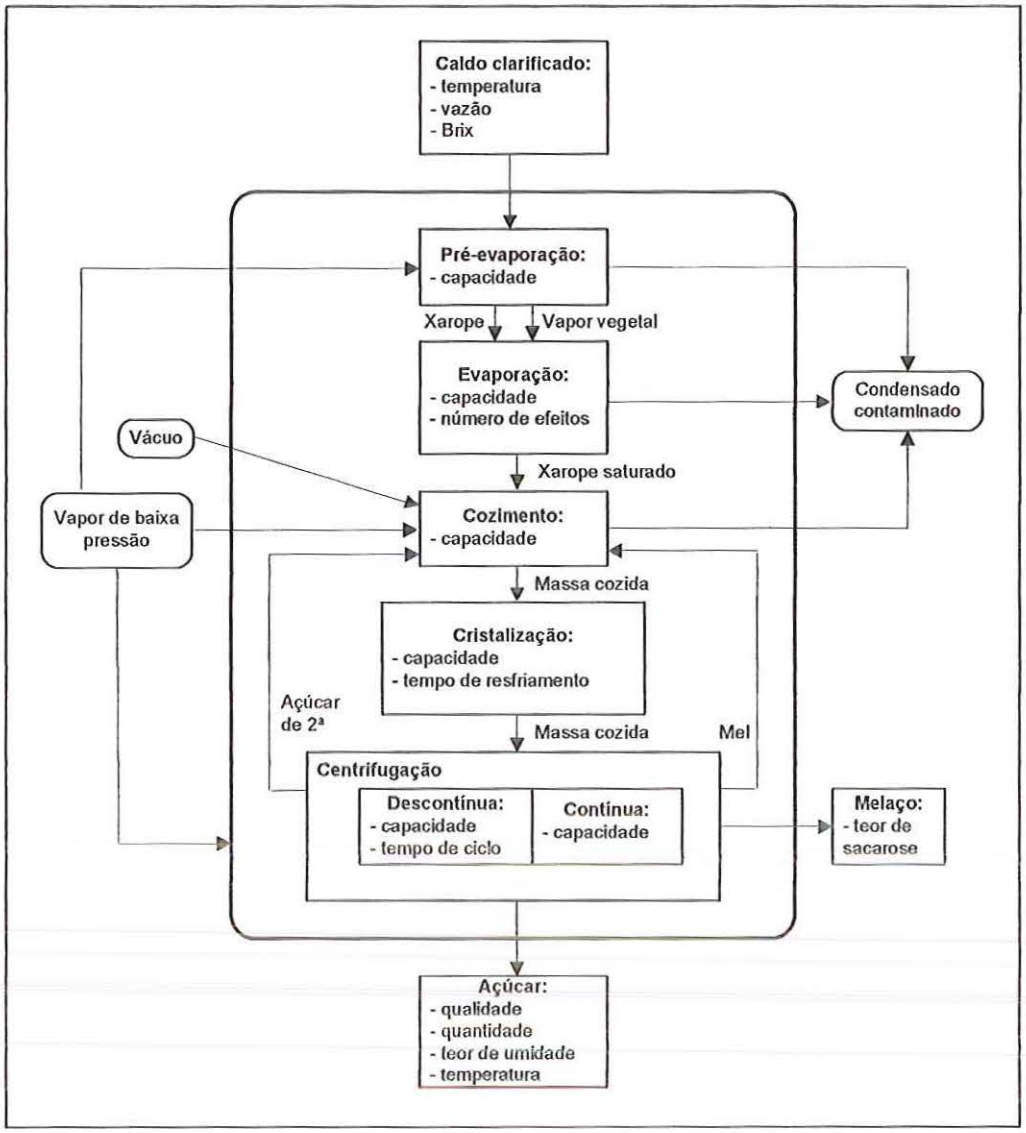

FIGURA 28 – Modelo conceitual dos sistemas de evaporação e cristalização

A definição sobre o esquema de massas a ser utilizado depende do grau de recuperação que se quer obter na fabricação do açúcar e do nível de esgotamento que se quer no mel final.

Os métodos de esgotamento do açúcar mais utilizados, segundo HUGOT (1977) e DELGADO & CESAR (1990) são: de 2 massas cozidas e de 3 massas cozidas.

O processo com 2 massas cozidas é também chamado de trabalho com duas massas. É pouco empregado, normalmente quando a pureza do xarope é muito baixa. Consiste em formar dois tipos de massa cozida A e B (figura 29).

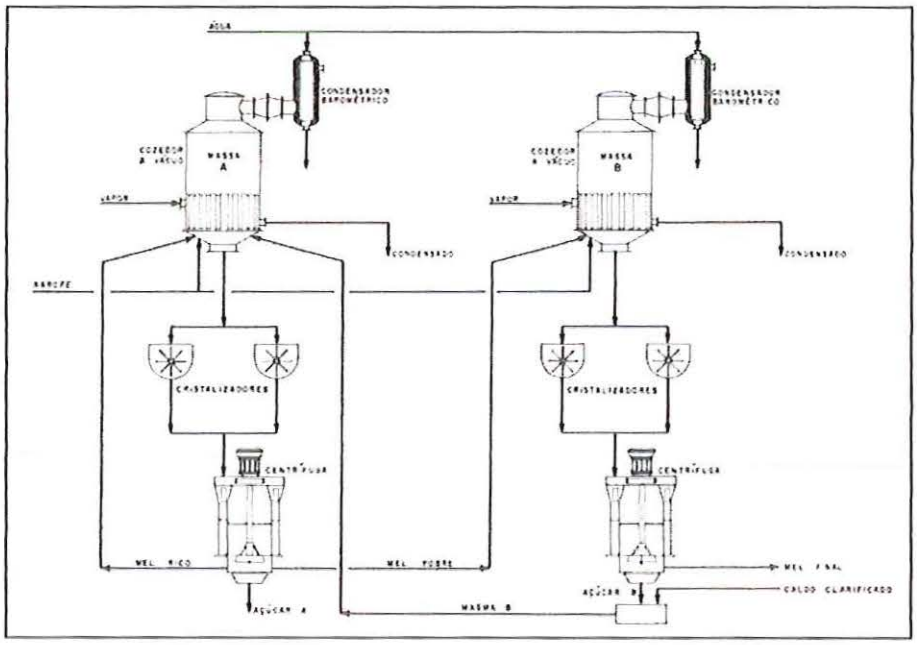

FIGURA 29 – Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 2 massas (COPERSUCAR, 1999).

A centrifugação da massa A pode ser simples ou dupla, com separação dos méis pobres, obtidos na fase da centrifugação sem lavagem, e dos méis ricos, gerados no período de lavagem com água e vapor, durante o qual uma certa quantidade de açúcar dissolvida pela água ou pelo vapor é perdida com o mel.

O açúcar de massa B pode ser comercializado diretamente ou pode ser transformado em magma, por refundição sob as turbinas de massa B, para servir de pé aos cozimentos A.

O processo de 3 massas cozidas é o empregado com mais freqüência. Formam-se 3 tipos de massa cozida, A, B e C (figura 30).

O primeiro cozimento, quando só existe xarope, é feito nos cozedores A, resultando em açúcar de 1ª, que é o açúcar comercial, e mel A.

O pé de cozimento é formado a partir do mel A, do mel B, e é enviado para os cozedores B e C.

O cozedor B é alimentado com parte do mel A. Após o cozimento no cozedor B, a massa cozida B é enviada para turbinas contínuas, onde é centrifugada, resultando no açúcar de 2ª e no mel B. Dilui-se com água o açúcar de 2ª, que passa a se chamar magma B e é enviado como pé de cozimento para os cozedores A. O mel B vai alimentar o cozedor C.

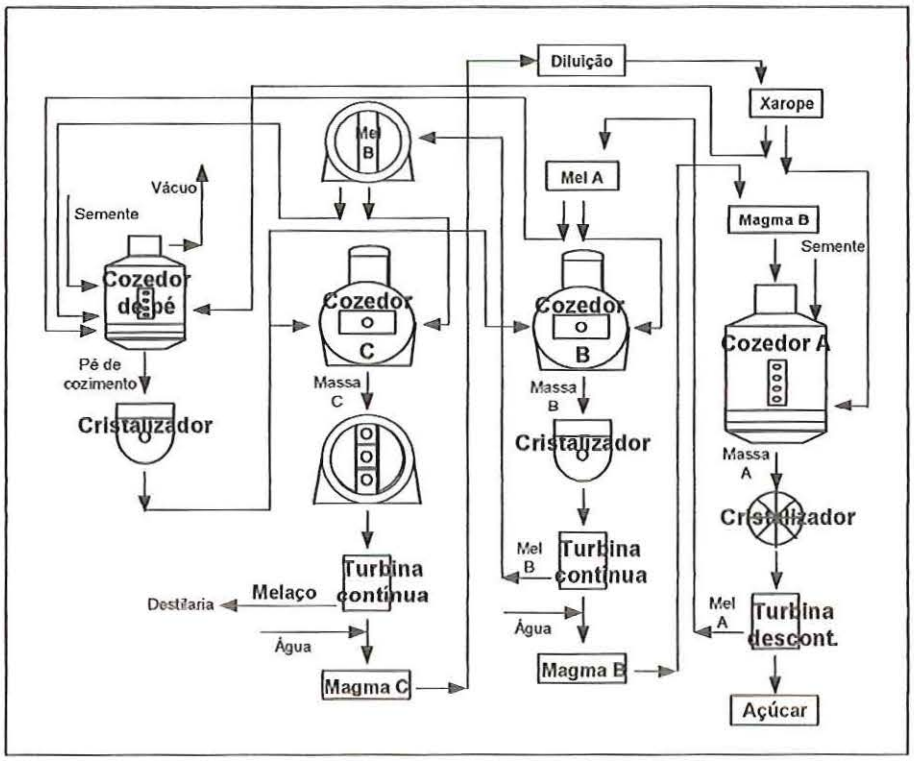

FIGURA 30 – Diagrama simplificado do sistema de fabricação de açúcar com 3 massas (Adaptado de YAMADA, 1999)

Após o cozimento no cozedor C, a massa cozida C é enviada para turbinas contínuas, onde é centrifugada, resultando no açúcar de 3ª e no mel final, ou melaço. Dilui-se com caldo clarificado o açúcar de 3ª, que passa a se chamar magma C e é enviado para um tanque de diluição para ser adicionado ao xarope que vai alimentar os cozedores A. O mel final é enviado para a destilaria.

Os cozedores A fazem o cozimento do magma B, alimentado com o xarope proveniente da etapa de evaporação. Após o cozimento nos cozedores A, a massa cozida A é descarregada em turbinas descontínuas, onde é centrifugada, resultando no açúcar de 1ª (comercial), que é enviado para a secagem e posterior embalagem, e no mel A.

5.1.7. Fabricação de álcool

O objetivo deste setor é maximizar a eficiência do processo de fabricação de álcool (figura 31), representada pela relação entre a quantidade de álcool produzido e a quantidade de álcool que deveria ser produzido em função do teor de açúcares existentes no mosto. Ela considera as eficiências da fermentação e da destilação (epuração, retificação e desidratação).

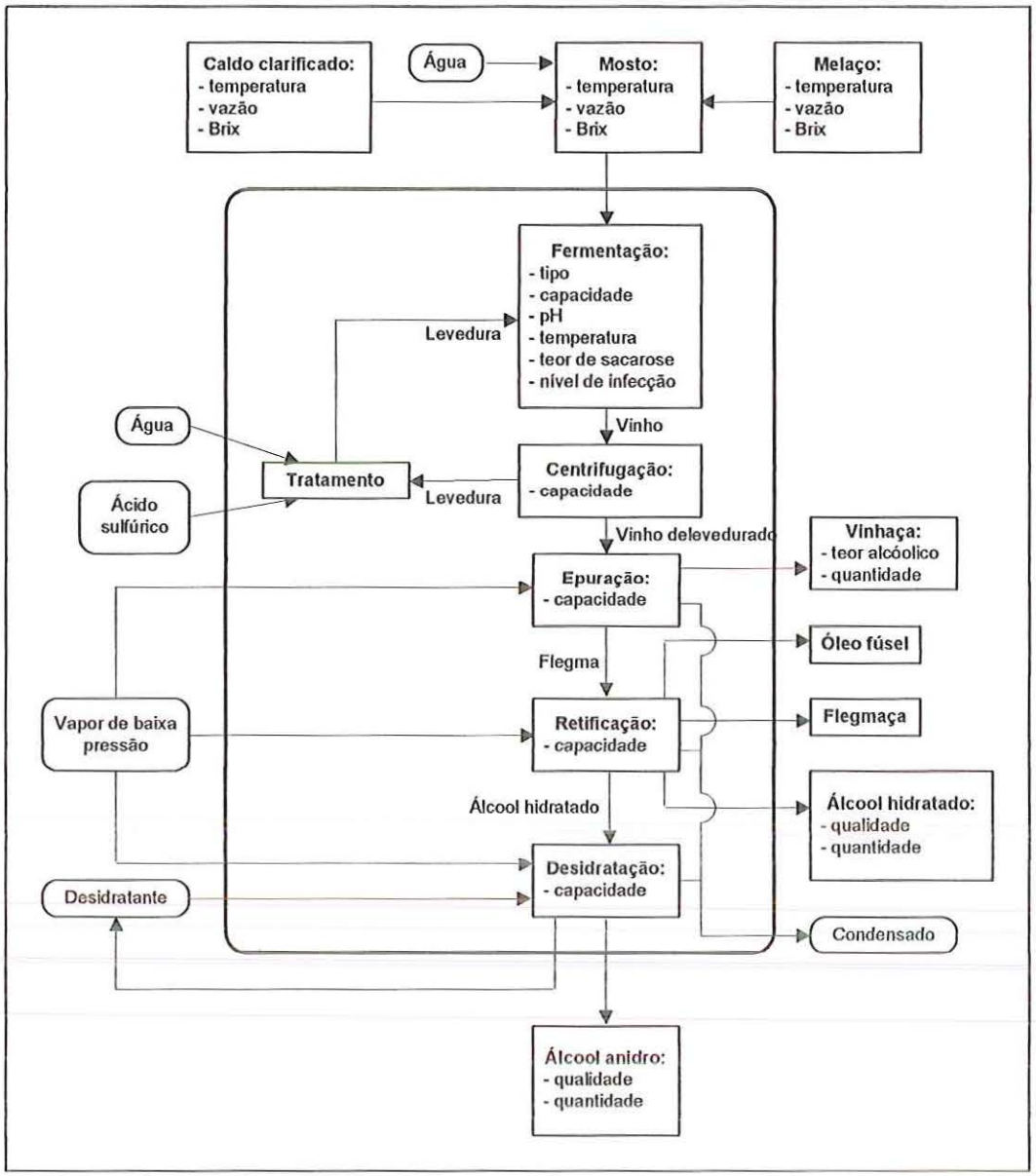

FIGURA 31 – Modelo conceitual do sistema de fabricação de álcool

Os principais fatores que influenciam a eficiência do processo de fermentação são:

- pH: sendo um processo bioquímico, a fermentação tem um ponto ótimo para o funcionamento das enzimas envolvidas. Para um pH baixo, tem-se um melhor controle de infecção por parte de microorganismos contaminantes, mas o meio pode se tornar extremamente ácido, o que é impróprio para a levedura.
- temperatura: o processo fermentativo é exotérmico, portanto, ocorre uma elevação da temperatura do mosto, podendo atingir valores elevados que

desfavorecem a atividade das leveduras e favorecem o desenvolvimento de infecções, além da perda de álcool por evaporação.

- teor de açúcares totais do mosto: o mosto deve apresentar uma concentração de açúcares que seja compatível com a natureza e composição da matéria-prima, com o tipo de levedura utilizado e com o processo de condução da fermentação. Em geral, o mosto apresenta um Brix entre 14 e 28%. O nível elevado de açúcares totais no mosto faz com que a levedura produza mais álcool, o que pode tornar o meio impróprio para sua sobrevivência. A utilização de mosto muito diluído, por sua vez, provoca, entre outros efeitos, um volume maior nas dornas e depósitos, o favorecimento de infecções, um maior consumo de água e de vapor e um menor rendimento dos aparelhos de destilação. Dessa forma, o mel final deve ser preparado, pois apresenta um Brix médio de 88%, devendo ser diluído para um Brix em torno de 22%, através de diluição intermitente ou contínua.

- nível de infecção: a presença de outros microorganismos em quantidade excessiva diminui o rendimento da fermentação, pois esses microorganismos competem com a levedura por espaço e alimento. Por outro lado, a ausência de infecção torna o meio extremamente favorável para a reprodução da levedura. O excesso de reprodução, por sua vez, diminui o rendimento da operação, pois consome energia que a levedura gastaria na produção de álcool, além de gerar uma superpopulação, que pode ser descartada se não houver demanda para sua utilização plena.

Um aspecto importante da fermentação é o tempo de fermentação. No caso de fermentação por batelada, o controle é facilitado, mas o tempo de fermentação aumenta, e a produção do vinho é intermitente. Para a fermentação contínua, deve haver um maior controle nas fermentações parciais em cada dorna, porém a produção é constante.

Uma boa fermentação deve contar com uma quantidade conveniente de levedura. Em geral, a levedura deve apresentar algumas características:

- velocidade de fermentação: é traduzida na quantidade de açúcar fermentado, numa unidade de tempo. Uma alta velocidade de fermentação propicia fermentações rápidas, além de reduzir o risco de infecções.

- tolerância ao álcool: permite obter vinhos de grande riqueza alcoólica, gerando, conseqüentemente, um maior rendimento dos aparelhos e uma possibilidade menor da ocorrência de infecções, já que o álcool é um anti-séptico natural.

- rendimento: é a relação entre açúcar consumido e álcool produzido.

- resistência à acidez: no controle de infecções adota-se a diminuição do pH quando as leveduras apresentam alta resistência à acidez do meio.
- estabilidade: representa a capacidade das leveduras de manterem suas propriedades estáveis face às variações do meio.

O excesso de levedura que possa ocorrer, em função de boas condições de reprodução, pode ser secado e embalado para a comercialização. A levedura seca tem boa aplicação como componente de ração animal.

No processo de destilação, o resultado principal é a produção de álcool hidratado e/ou anidro. Outro parâmetro importante é a produção de vinhaça. Sua retirada tem uma proporção aproximada de 13 litros para cada litro de álcool produzido, e é utilizada na lavoura como fertilizante, sendo que sua graduação alcoólica não deve ser superior a 0,03°GL (COPERSUCAR, 1999).

5.1.8. Geração de vapor

O objetivo deste setor é produzir e fornecer a quantidade suficiente de vapor para suprir as necessidades da usina para a geração de energia elétrica, para o acionamento de equipamentos e o funcionamento de processos industriais. O modelo conceitual do sistema de geração e distribuição de vapor está representado na figura 32.

A produção de vapor depende, basicamente, da quantidade de bagaço disponível para ser utilizado como matéria-prima para a combustão nas caldeiras, que é determinada pelo índice de fibra presente na cana-de-açúcar. Geralmente, este índice é suficiente para que a quantidade de bagaço produzido pelas moendas produza todo o vapor necessário ao funcionamento da usina. Um índice de fibra normal, associado a um bom funcionamento da usina em relação à utilização de energia elétrica e vapor, podem gerar excedentes de vapor para serem utilizados para outros fins: fornecimento de energia elétrica à rede, fabricação de subprodutos, bombeamento de água de irrigação, etc.

Outros fatores que influenciam a produção de vapor são: quantidade e qualidade do condensado recuperado após os processos, disponibilidade e qualidade da água que será transformada em vapor, e as condições de funcionamento das caldeiras, tais como: umidade do bagaço, excesso de ar, combustão incompleta do bagaço, convecção externa, temperatura de expulsão dos gases, etc.

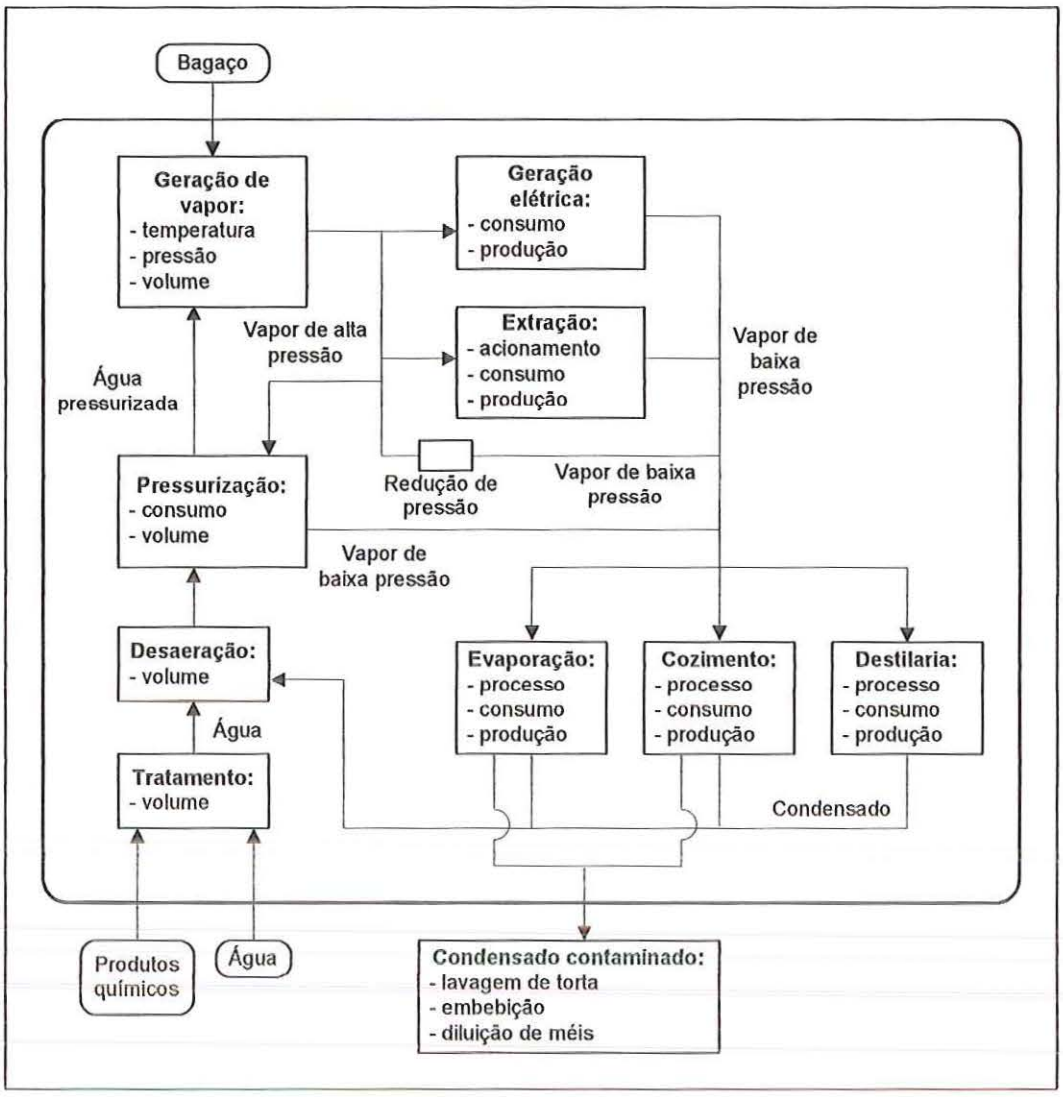

FIGURA 32 – Modelo conceitual do sistema de geração e distribuição de vapor

Nas usinas há três tipos de pressão de vapor principais (HUGOT, 1977):

- alta pressão: normalmente utilizado para o acionamento de turbinas a vapor, sendo necessário dispor de uma pressão de 60 kgf/cm^2. Abaixo de 16 kgf/cm^2 o consumo das turbinas a vapor aumenta rapidamente. De outro lado, acima de 45 kgf/cm^2 o custo de instalação diminui o interesse pela economia do vapor, devido ao preço das caldeiras, o qual aumenta rapidamente com a pressão.
- baixa pressão: serve tanto como limite superior para a fabricação quanto como contrapressão para as máquinas. Normalmente, são utilizadas pressões de 1,5 a 2,0 kgf/cm^2.

5.2. Etapa 2: Análise da adequação da simulação aos objetivos dos modelos conceituais

O desenvolvimento dos modelos conceituais do processo produtivo sucroalcooleiro expõe os principais objetivos do planejamento da produção para cada setor. Tais objetivos podem possuir variados graus de adequação à utilização da simulação para sua análise e resolução. Desta forma, esta etapa do desenvolvimento do projeto procurou identificar as áreas de maior potencial de aplicação da simulação, ou seja, as áreas nas quais ela pode proporcionar melhores retornos na análise.

Os níveis do planejamento da produção (agregado, detalhado) também afetam estes graus de adequação. Neste trabalho, foram enfocadas as análises agregadas (relacionadas às oportunidades do mercado, ao mix de produtos e aos recursos gerais necessários) e detalhadas (relacionadas aos materiais necessários, às formas de produção, aos prazos de produção, às capacidades de produção dos recursos).

Em análises agregadas, o objetivo de uma empresa sucroalcooleira é, basicamente, atender a demanda de produtos finais (açúcar e álcool) no prazo determinado. A simulação pode auxiliar na análise das necessidades de recursos para o atendimento de variadas demandas.

Para o nível detalhado, o grau de adequação da simulação aos problemas e objetivos levantados para cada sistema do processo produtivo sucroalcooleiro está relacionado na tabela 1.

No plantio, os objetivos do planejamento da produção são:

- maximizar produtividade;
- maximizar teor de sacarose;
- obter teor adequado de fibra.

Estes objetivos estão relacionados à produtividade das áreas plantadas e à qualidade da matéria-prima, que são afetadas por uma quantidade considerável de fatores, cujos comportamentos variam ao longo do tempo. Essas características indicam a simulação como uma técnica adequada para o estudo deste sistema. Porém, de acordo com a abrangência definida para este projeto no item 3.1, será modelada somente a condição do canavial pronto, que servirá como dado de entrada para o modelo do sistema de colheita.

O planejamento da produção para os sistemas de colheita e recepção de matéria-prima, possui alguns objetivos que implicam no estudo e análise de atividades produtivas e logísticas, com o intuito de racionalizar os recursos envolvidos. Tais objetivos são:

TABELA 1 – Adequação da simulação aos objetivos dos modelos conceituais do processo produtivo sucroalcooleiro

SISTEMA	OBJETIVO	GRAU DE ADEQUAÇÃO DA SIMULAÇÃO
Plantio	Maximizar produtividade	Adequado
	Maximizar teor sacarose	Adequado
	Obter teor adequado de fibra	Adequado
Colheita	Gerar fluxo uniforme de matéria-prima	Neutro
	Utilizar racionalmente os recursos de corte, carregamento e transporte	Muito adequado
	Analisar formação de filas ao longo dos processos de corte, carregamento e transporte	Muito adequado
Recepção de matéria-prima	Gerar fluxo uniforme de matéria-prima	Neutro
	Utilizar racionalmente os recursos de descarga e movimentação de matéria-prima	Muito adequado
	Analisar formação de filas ao longo dos processos de descarga e movimentação de matéria-prima	Muito adequado
Extração	Maximizar índice de extração	Neutro
	Manter fluxo uniforme de produção de caldo e bagaço	Neutro
Tratamento de caldo	Minimizar perda de sacarose na torta	Neutro
	Utilizar racionalmente os equipamentos do tratamento de caldo	Adequado
	Utilizar racionalmente os insumos químicos de produção	Neutro
	Manter fluxo uniforme de produção de caldo clarificado	Neutro
Fabricação de açúcar	Maximizar eficiência na recuperação	Neutro
	Utilizar racionalmente os equipamentos da fabricação de açúcar	Adequado
	Utilizar racionalmente o vapor na evaporação	Neutro
	Manter fluxo uniforme de produção de açúcar	Neutro
Fabricação de álcool	Maximizar eficiência na fermentação	Neutro
	Maximizar eficiência na destilação	Neutro
	Utilizar racionalmente os insumos químicos de produção	Neutro
	Utilizar racionalmente o vapor na destilação	Neutro
	Manter viabilidade da levedura	Neutro
	Manter fluxo uniforme de produção de álcool	Neutro
Geração de vapor	Manter produção uniforme e suficiente de vapor	Neutro

- utilizar racionalmente os recursos de corte, carregamento e transporte;
- analisar formação de filas ao longo dos processos de corte, carregamento e transporte;
- utilizar racionalmente os recursos de descarga e movimentação de matéria-prima;

- analisar formação de filas ao longo dos processos de descarga e movimentação de matéria-prima.

Além disso, estes sistemas apresentam opções de processo em várias atividades. Estas, por sua vez, apresentam características predominantemente discretas. Deste modo, a simulação mostra-se muito adequada como ferramenta de apoio à análise dos objetivos relacionados acima.

Outro objetivo relevante do planejamento nestes setores é gerar fluxo uniforme de matéria-prima. Este objetivo depende de análise de processos com características contínuas e/ou híbridas, onde a simulação discreta pode ser utilizada junto com o recurso da agregação, que traz algum prejuízo na precisão dos resultados.

Os sistemas de extração, tratamento de caldo, fabricação de açúcar, fabricação de álcool e geração de vapor possuem características predominantemente contínuas e/ou híbridas. Novamente, a simulação discreta pode ser utilizada, porém com algum prejuízo da precisão dos resultados, uma vez que a modelagem utiliza o recurso da agregação. Neste estudo, a simulação será aplicada a estes sistemas para a análise de desempenho do processamento industrial em relação à produção de açúcar, de álcool, de bagaço e dos demais produtos e sub-produtos intermediários.

5.3. Etapa 3: Caracterização das ferramentas de simulação

Nesta etapa, foram pesquisadas as informações sobre linguagens de simulação e simuladores comerciais. Foram levantadas as características básicas das linguagens de simulação GPSS® e SIMAN®, e dos softwares Arena®, ProModel®, AutoMod® e Taylor®, que são utilizados no Laboratório de Simulação de Sistemas de Eventos Discretos, da EESC – USP, onde o presente estudo está se desenvolvendo. Maiores detalhes sobre as ferramentas citadas podem ser encontrados em PRICE & HARRELL (1999), ROHRER (1999) e SADOWSKI & BAPAT (1999).

Entre todas as ferramentas apresentadas, somente o Arena® apresenta implementações de estudos de simulação relacionados à indústria sucroalcooleira (BRAGA, 1999), o que, a princípio, favorece a sua seleção para a utilização no neste trabalho.

5.4. Etapa 4: Seleção do software de simulação

5.4.1. Análise preliminar

Os diversos trabalhos sobre critérios para seleção de software de simulação (LAW & HAIDER, 1989; BANKS & GIBSON, 1997; HLUPIC et al., 1999) apresentam terminologias e agrupamentos de critérios diversificados. Para evitar ambigüidades e incertezas na análise dos critérios, este trabalho utiliza os conceitos desenvolvidos nestes estudos citados acima, incorporando-os ao trabalho de NIKOUKARAN et. al. (1998), que desenvolve uma estrutura hierárquica que apresenta uma classificação e padronização dos termos e conceitos relacionados aos critérios de seleção (figura 33). O fornecedor, o software e o usuário são os elementos importantes que formam o nível mais alto da hierarquia. O software cobre um campo amplo de questões, e foi dividido em sub-critérios: modelo, entrada, saída, execução, animação, testabilidade e eficiência.

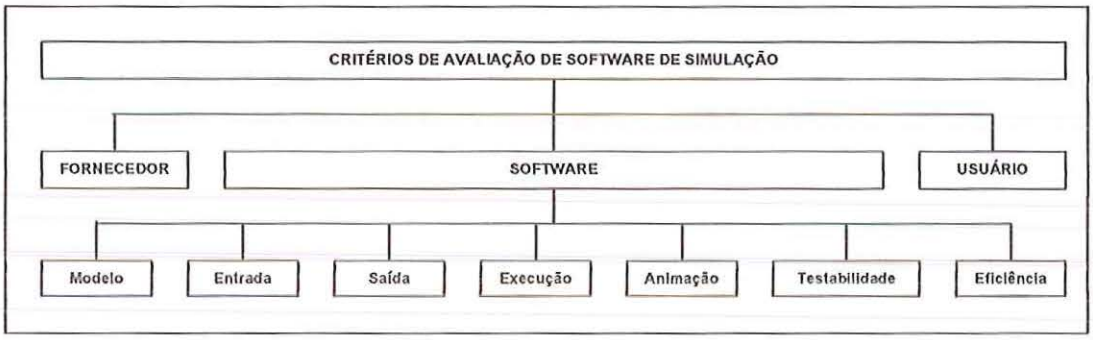

FIGURA 33 – Critérios de avaliação de software de simulação (Adaptado de NIKOUKARAN et. al., 1998)

Para este estudo, foram discutidos preliminarmente alguns critérios mais importantes que orientaram a preparação de uma pequena lista de softwares a serem analisados, a partir da lista apresentada no item 5.3. Também foram abordados critérios que não são relevantes para o processo de seleção.

O objetivo principal do trabalho é a geração de estruturas customizadas de simulação para a indústria sucroalcooleira. Para isso, a ferramenta de simulação a ser utilizada deve combinar algumas características. Ela deve ser fácil de aprender e de utilizar, para possibilitar que o desenvolvedor ganhe tempo no processo de aprendizado das suas estruturas básicas de simulação e possa dispor de um tempo adequado para o aprendizado das estruturas mais complexas relacionadas à customização. Além disso, ela deve ser flexível o suficiente para permitir a construção de interfaces, funções e subrotinas

customizadas. Desta forma, optou-se pela escolha dos simuladores (Arena®, AutoMod®, ProModel® e Taylor®), ao invés das linguagens de simulação (GPSS® e SIMAN®). Os simuladores apresentam ambientes de desenvolvimento mais intuitivos, que combinam os processos de simulação e de animação, facilitando o aprendizado. Além disso, os simuladores citados disponibilizam estruturas de programação e customização, que os tornam flexíveis.

Outro aspecto considerado na análise preliminar foi o suporte técnico. A disponibilidade de suporte técnico no Brasil é muito interessante, pois pode acelerar o processo de aprendizado, por meio dos treinamentos e da troca de experiência mais intensa entre os desenvolvedores dos modelos e os especialistas em simulação dos fornecedores. Dos quatro simuladores, três possuem suporte técnico local (Arena®, AutoMod® e ProModel®), sendo que o AutoMod® disponibiliza cursos de treinamento avançado somente nos Estados Unidos. Assim, a lista preliminar dos softwares a serem analisados ficou constituída pelos simuladores: Arena®, AutoMod® e ProModel®.

Um grupo de critérios de menor relevância abordado na análise preliminar foi o do fornecedor. Este grupo é importante quando ainda não se adquiriu o software. Porém, o laboratório onde se desenvolve este estudo possui licenças de todos os três softwares há mais de 5 anos. Neste período, foi possível verificar que os três fornecedores são competentes, possuem grande experiência no mercado e diversos clientes e parceiros, entre eles grandes corporações líderes de mercado. Todos os fornecedores disponibilizam boas documentações, em diversos formatos, além do suporte técnico local.

5.4.2. Análise detalhada dos critérios e dos simuladores

A seleção do software de simulação a ser utilizado no projeto foi desenvolvida por meio da análise dos critérios da hierarquia apresentada anteriormente. Os grupos de critérios analisados foram: modelo, entrada, saída, execução, animação, testabilidade, eficiência e usuário (Anexo A).

Para cada critério associou-se uma nota, que varia de 0 a 5, sendo que o zero representa a ausência da característica, e 5 representa o melhor desempenho possível da característica. Assim, para um determinado critério, os simuladores podem ter notas iguais, e pode acontecer de nenhum obter nota máxima (neste caso, nenhum dos simuladores satisfaz plenamente o critério para este estudo). Para cada critério, ainda, foi dado um valor de peso, que varia de 1 a 5, denotando a importância de cada critério. Para isso, foram observados os objetivos do projeto de pesquisa, e as características e necessidades de modelagem do sistema produtivo sucroalcooleiro.

5.4.3. Escolha do software de simulação

Pela análise desenvolvida, percebe-se que cada software possui potencialidades e deficiências ao longo dos vários grupos de critérios. Por outro lado, cada estudo de simulação possui características próprias que requerem características e habilidades diversificadas dos simuladores. Desta forma, dificilmente um software é capaz de atender de forma satisfatória a todos os critérios necessários.

Para este estudo, os três softwares possuem um bom nível de adequação às necessidades do projeto de pesquisa, verificado de forma global por meio dos valores das médias ponderadas de cada grupo de critério.

Assim, no balanço de tais valores, optou-se pela escolha do Arena®, por apresentar um bom nível de adequação em todos os grupos de critérios, e principalmente por apresentar de forma satisfatória as características de estrutura para customização, construção hierárquica e modularidade, que constituem a base dos requisitos principais para o desenvolvimento adequado do projeto de pesquisa.

Outros aspectos decisivos para a escolha do Arena® foram:

- a facilidade para a modelagem, pelo fato da modelagem poder ser desenvolvida independentemente do desenvolvimento da representação gráfica;
- o conhecimento prévio maior, por parte do autor, em relação aos outros softwares analisados.

5.5. Etapa 5: Definição dos experimentos, modelos e interfaces padrões

Após a definição dos objetivos de análise dos modelos padrões e da ferramenta de simulação a ser utilizada no desenvolvimento do ambiente de simulação, iniciou-se a definição dos componentes do ambiente: experimentos, modelos e interfaces.

5.5.1. Definição do enfoque de modelagem

A estratégia de desenvolvimento da modelagem consiste na elaboração de um ambiente de simulação interativo, modular e hierárquico, composto de modelos padrões de escopos complementares, com níveis de detalhes coerentes.

A abordagem de modelagem utilizada foi a construção hierárquica dos modelos padrões (figura 34), constituídos por diversos elementos configuráveis, de acordo com a aplicação. Nessa estrutura, o primeiro nível da hierarquia representa o sistema, composto

por setores. No segundo nível, tem-se os setores, que são detalhados no nível dos processos que os compõem. A seguir, no terceiro nível, os processos são detalhados no nível das operações que os constituem. O detalhamento do sistema, dos setores, dos processos e das operações estão descritos adiante no item 5.5.4.

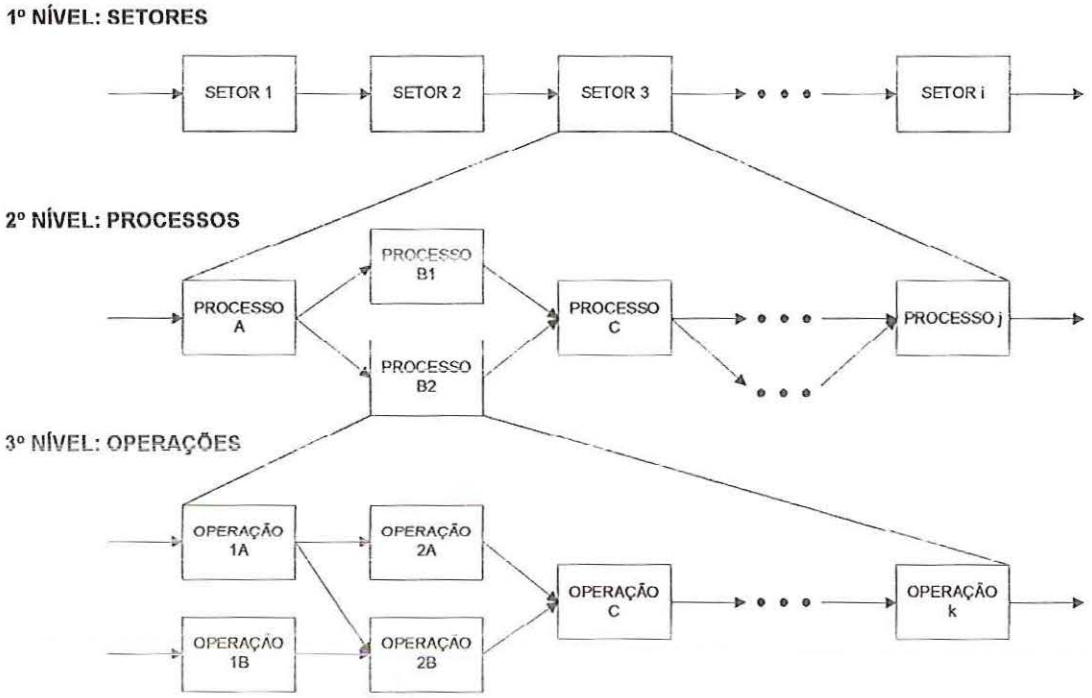

FIGURA 34 – Esquema simplificado da estrutura hierárquica de desenvolvimento dos modelos padrões

A modularidade dos elementos da hierarquia permite que os modelos padrões sejam selecionados de acordo com o escopo, o nível de detalhe requerido e as opções de processos e de operações, conforme os requisitos do problema. No exemplo da figura 30, o usuário pode optar entre os processos B1 e B2, no segundo nível, e entre as operações 1A e 1B, e entre as operações 2A e 2B (caso ele tenha utilizado a operação 1A), no terceiro nível.

Outro aspecto importante neste tipo de enfoque de modelagem é que o ambiente de simulação com estrutura hierárquica modularizada permite:

- o aumento do nível de detalhamento dos modelos padrões, por meio da criação e integração de novos níveis hierárquicos inferiores ou pela divisão de setores, processos ou operações em sub-setores, sub-processos ou sub-operações mais detalhados, dentro do mesmo nível hierárquico;
- o aumento do escopo do sistema, por meio da incorporação de novos setores da cadeia produtiva, com seus respectivos processos e operações.

5.5.2. Definição do nível de detalhe

Dentro do escopo definido para o processo produtivo sucroalcooleiro, este projeto engloba os setores produtivos agrícola e industrial dos produtos finais (açúcar e álcool).

Cada setor produtivo é dividido em processos, que foram definidos segundo critérios de localização física e da terminologia consagrada entre os profissionais envolvidos com o sistema produtivo sucroalcooleiro.

Os processos, por sua vez, são divididos em operações, ou seja, até as operações fundamentais que provocam alguma transformação significativa na matéria-prima ou no material em processo.

As operações, por sua vez, são detalhadas até o nível em que suas lógicas de funcionamento possam representar os principais parâmetros que influenciam o desempenho dos aspectos relacionados à produção. Considera-se também, neste ponto, a análise do nível de adequação da simulação aos modelos conceituais, desenvolvida no item 5.2.

Atividades, lógicas de controle, critérios de decisão e procedimentos e outros componentes da lógica que apresentarem similaridades foram, sempre que possível, padronizados em funções e/ou sub-rotinas, com parâmetros que podem ser configurados para cada aplicação particular.

Em função da complexidade do sistema, o nível de detalhamento descrito acima pode requerer quantidades variadas de informações ao longo dos setores, processos e operações. Tais informações serão mais bem detalhadas adiante, porém, de forma geral, a modelagem do sistema detalha os seguintes aspectos:

- Processos discretos e contínuos de transformação de materiais, mistura e separação de componentes, carga, descarga e movimentação de materiais, etc;
- Tipos, capacidades, estados e sistemas de manutenção de recursos;
- Tipos, atributos, estados e fluxo de movimentação de entidades ao longo do sistema;
- Tipos, políticas de formação e operações de sistemas de armazenamento e filas;
- Lógicas de decisão, fluxos de materiais, sistemas de movimentação, cálculos de índices de eficiência e de perdas nos processos, e outras medidas de desempenho.

Outro fator relevante na definição do nível de detalhe dos modelos foi a disponibilidade de dados. Neste quesito, existem usinas em diferentes níveis de organização. Por um lado, algumas possuem sistemas eficientes e organizados de coleta de

dados, com equipamentos supervisórios e até mesmo levantamentos estatísticos de tempos e atrasos para estudos de simulação discreta, que são adequados a este projeto. No outro extremo, porém, outras usinas investem muito pouco no controle da produção, apresentando deficiência até na organização de informações consideradas básicas. Assim, o nível de detalhe dos modelos deve ser adequado para que os mesmos não exijam informações demasiadamente detalhadas, o que pode inviabilizar sua utilização na grande maioria dos casos.

5.5.3. Identificação de elementos padrões

A modelagem de sistemas produtivos complexos como o sucroalcooleiro requer o manuseio de uma grande quantidade de dados, alguns de grande valia para a simulação, outros de menor importância ou mesmo irrelevantes. As atividades e procedimentos de análise até aqui desenvolvidos possibilitam a verificação prévia dos dados que são necessários e úteis para a geração dos modelos padrões e interfaces.

Observando o sistema produtivo sucroalcooleiro, pode-se perceber dois grupos básicos de dados, diferenciados pelo momento de coleta. Assim, os dados devem ser coletados:

- durante a safra, que são dados relacionados ao regime de funcionamento do sistema, sendo úteis para a verificação e validação dos modelos padrões. Em geral, possuem um nível de detalhe maior e são importantes para análises de alternativas para melhorias do desempenho de processos e operações, entre outras. Neste grupo encontram-se também os dados que não são registrados pelo sistema de controle das usinas e necessitam ser coletados durante o funcionamento do sistema.
- ao final da safra, que são dados relacionados à consolidação dos resultados finais de desempenho do sistema, sendo importantes para a verificação da integração dos diversos modelos padrões. São dados agregados importantes para análises de estratégias de trabalho e de novos investimentos nos setores e processos, entre outras.

A elaboração de modelos padrões requer que sejam identificados os elementos do processo produtivo que possam ser padronizados. Assim, foram analisadas algumas formas de obtenção de informações sobre processos, atividades e recursos mais comumente encontrados nas usinas. Além da consulta a algumas obras (MEADE & CHEN, 1977; HUGOT, 1977; COPERSUCAR, 1987a, 1987b e 1993; DELGADO & CESAR, 1990; YAMADA, 1999), outras formas utilizadas foram:

- Questionário (Anexo B): foi elaborado um questionário, para a identificação de processos, operações e recursos utilizados nas usinas. A finalidade deste levantamento é qualitativa, onde as respostas do questionário foram um ponto de partida para a identificação dos elementos padrões.
- Visitas às usinas: as visitas foram úteis no sentido de se observar "in loco" as possíveis padronizações abstraídas das respostas do questionário. Outro aspecto importante nas visitas é a oportunidade da troca de informações e experiências com profissionais dos diversos setores das usinas, os quais forneceram dados importantes de suas experiências pessoais que auxiliaram na definição dos elementos padrões observados na análise das respostas do questionário.

Os elementos padrões estão identificados na tabelas 2 a 8. Estas tabelas contêm 3 colunas, representando as operações, os recursos e as opções de recursos identificados como elementos padrões. As opções de recursos podem variar em quantidade. Alguns dos recursos, porém, possuem tipos diferentes para a execução da operação. Portanto, se a coluna "Opções" estiver vazia, o recurso pode variar somente em quantidade. Exemplificando: na tabela 2, a operação "Carregamento" conta com o recurso "Tratores" para ser efetuada. Este recurso tem as opções "Reboque", "Transbordo" e "Container", que representam as 3 formas possíveis de se executar a operação "Carregamento". Já o recurso "Carregadoras", na mesma operação, tem como opção somente a quantidade utilizada, por isso está em branco.

TABELA 2 – Elementos padrões do corte / carregamento

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
	Número de frentes	
Queima		Sim ou Não
Corte manual	Cortadores	
Corte mecânico	Colhedoras	
Carregamento	Tratores	Reboque, Transbordo, Container
	Carregadoras	
	Unidades de transporte	Caminhão simples, Romeu e Julieta, Treminhão, Rodotrem

TABELA 3 – Elementos padrões da recepção de matéria-prima

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Pesagem	Balança	
Amostragem	Sonda de amostragem	
Armazenagem de matéria-prima	Local de armazenagem	Pátio, Barracão
Alimentação de matéria-prima	Alimentadores	Mesa alimentadora, Hillo, Tombador hidráulico
Lavagem da matéria-prima	Lavador de cana	
Abastecimento	Bomba de combustível	
Manutenção	Equipamento para manutenção	

TABELA 4 – Elementos padrões da extração

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Preparo	Picador	
	Desfibrador	
Extração	Moenda	Número de ternos
	Difusor	
Peneiragem do caldo	Peneira	Sistema cush cush, peneira vibratória ou peneira rotativa

TABELA 5 – Elementos padrões do tratamento de caldo

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Sulfitação	Coluna de sulfitação	
Calagem	Tanque de calagem	
Aquecimento	Aquecedor	
Decantação	Decantador	
Filtração	Filtro rotativo	

TABELA 6 – Elementos padrões da fabricação de açúcar

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Pré-evaporação	Pré-evaporador	
Evaporação	Evaporador	
Cozimento	Cozedor	
Cristalização	Cristalizador	
Centrifugação	Turbina	Contínua, descontínua
Secagem de açúcar	Secador de açúcar	

TABELA 7 – Elementos padrões da fabricação de álcool

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Fermentação	Conjunto de fermentação (dornas)	Contínuo, por batelada
Turbinagem	Centrífuga de vinho	
Epuração	Coluna A (epuração)	
Retificação	Coluna B (retificação)	
Desidratação	Coluna C (desidratação)	
Tratamento de levedura	Turbina de levedura	

TABELA 8 – Elementos padrões da geração de vapor

OPERAÇÃO	RECURSO	OPÇÕES
Geração de vapor	Caldeira	
Alimentação de água	Turbo-bomba	

5.5.4. Identificação dos modelos padrões

Os possíveis modelos padrões para cada nível hierárquico foram identificados, com base nos seguintes aspectos, já comentados anteriormente:

- identificação de elementos padrões;

- enfoque hierárquico de modelagem;
- potencial de aplicação da simulação aos objetivos dos modelos conceituais.

Outro aspecto importante na definição dos modelos padrões surgiu durante a fase de implementação e teste dos modelos, a ser apresentada no item 5.5.5. Em alguns processos, em especial no setor industrial, apesar de terem sido identificados elementos padrões, a forma de operação dentro do processo, muitas vezes, não se apresenta de forma padronizável, com muitas variações em função de um número elevado de opções de funcionamento que a usina pode adotar. Estas altas variações praticamente exigem que sejam gerados modelos específicos para cada forma de operação, diminuindo a praticidade da utilização direta do ambiente de simulação. Assim, optou-se por diminuir o nível de detalhe em tais modelos, para se conservar a idéia original do projeto de se trabalhar com modelos padrões, que estão descritos a seguir.

Matéria-prima

A matéria-prima (cana) é a entrada principal para a hierarquia de modelos. É uma entidade que flui pelos modelos, sendo transformada e movimentada até atingir o estado final (açúcar e/ou álcool). Seus atributos principais são: massa, teor de sacarose (ou de açúcares totais) e teor de fibra. Tais atributos são definidos, principalmente: pela combinação entre a qualidade da cana cultivada e o ambiente de produção que está sendo colhido; pelo período da colheita; e pelo número de cortes que o canavial já sofreu.

Usina, Setor Agrícola e Setor Industrial

O sistema produtivo sucroalcooleiro, no primeiro nível, pode ser representado conforme a figura 35.

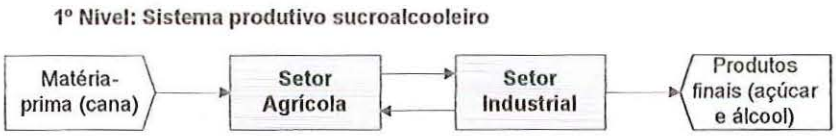

FIGURA 35 – Primeiro nível hierárquico da modelagem do sistema produtivo sucroalcooleiro

A análise deste modelo tem como objetivo avaliar o desempenho da produção em relação aos índices de produtividade nos diversos setores e processos da usina.

O setor agrícola engloba todos os processos e operações desde a matéria-prima no campo (canavial) até a entrada das unidades de transporte na usina e o seu retorno ao campo; e o setor industrial abrange todos os processos e operações desde a entrada das unidades de transporte na usina até a obtenção dos produtos finais (açúcar e álcool).

Detalhando o segundo nível para o setor agrícola (figura 36), tem-se os processos: corte / carregamento, transporte e recepção de matéria-prima. Estes processos abrangem as atividades que transformam a cana plantada (canavial) em cana colhida e entregue na usina para o início de sua industrialização.

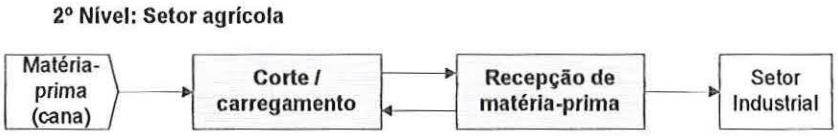

FIGURA 36 – Segundo nível hierárquico – setor agrícola

Para este modelo, a análise está focada no desempenho do sistema de transporte de matéria-prima, avaliando como o conjunto das unidades de transporte atende a demanda.

O segundo nível para o setor industrial (figura 37) apresenta os processos: extração, tratamento de caldo, fabricação de açúcar, fabricação de álcool e geração de vapor. Estes processos transformam a matéria-prima entregue na usina, nos produtos finais.

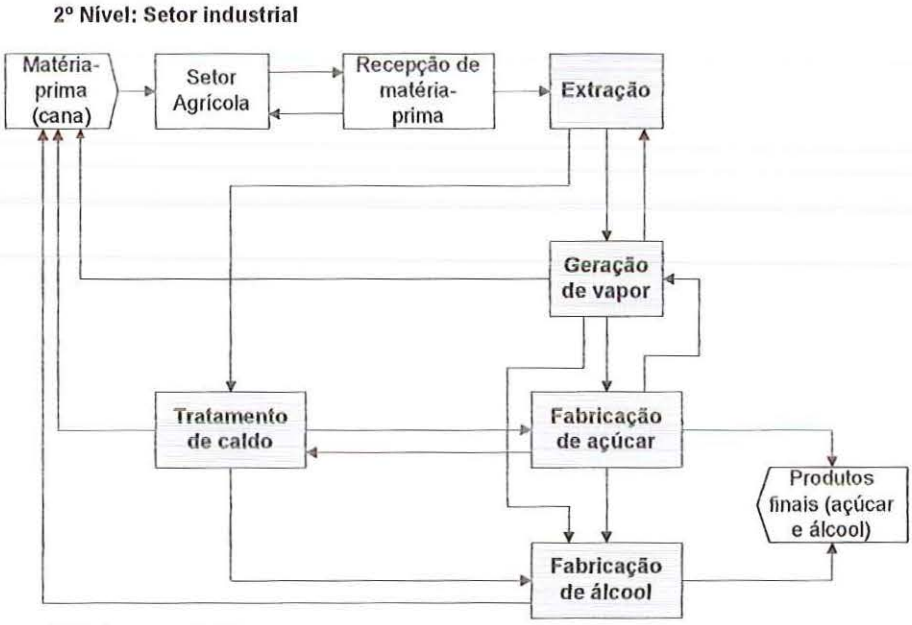

FIGURA 37 – Segundo nível hierárquico – setor industrial

O objetivo deste modelo é analisar o desempenho dos processos industriais em relação à eficiência de produção dos produtos finais.

A seguir está detalhado o terceiro nível hierárquico, relativo aos processos, com suas respectivas operações.

Corte / carregamento

Neste processo (figura 38), a cana é colhida e armazenada em reboque, que são transportados por unidades de transporte. As principais opções de operações são:

3º Nível: Corte / carregamento

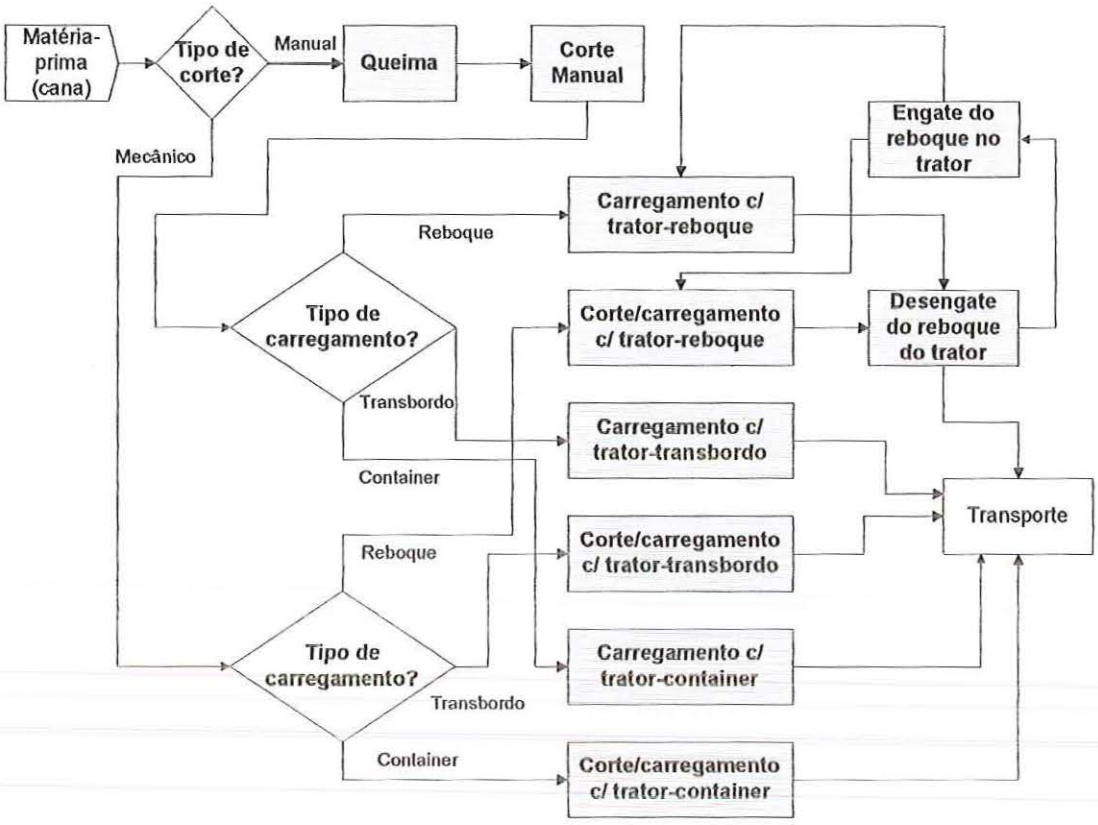

FIGURA 38 – Terceiro nível hierárquico – corte / carregamento

- Quanto ao tipo de corte: manual ou mecanizada;
- Quanto ao tipo de carregamento: com trator-reboque, trator-transbordo ou trator-container.

As operações deste processo estão descritas a seguir:

- Queima: representa a queima prévia do canavial, para facilitar o corte manual. Um fator importante decorrente desta operação é o tempo de pós-queima, que afeta diretamente o teor de sacarose.
- Corte manual: é a operação de corte do canavial realizado por pessoas (recurso). Um fator importante nesta operação é a produtividade dos cortadores, que determina a quantidade de cana cortada em função do tempo gasto.

- Carregamento com trator-reboque: é a operação de carregamento de cana utilizando o trator-reboque e a carregadora (recursos), quando o corte é manual.
- Corte/carregamento com trator-reboque: representa a operação de corte mecanizado e carregamento simultâneo, utilizando a colhedora e o trator-reboque (recursos).
- Desengate do reboque do trator: é a operação de desengate do reboque carregado com cana, do trator utilizado para o carregamento.
- Engate do reboque no trator: é a operação de engate do reboque descarregado, no trator utilizado para o carregamento.
- Carregamento com trator-transbordo: é a operação de carregamento de cana utilizando o trator-transbordo e a carregadora (recursos), quando o corte é manual.
- Corte/carregamento com trator-transbordo: representa a operação de corte mecanizado e carregamento simultâneo, utilizando a colhedora e o trator-transbordo (recursos).
- Carregamento com trator-container: é a operação de carregamento de cana utilizando o trator-container e a carregadora (recursos), quando o corte é manual.
- Corte/carregamento com trator-container: representa a operação de corte mecanizado e carregamento simultâneo, utilizando a colhedora e o trator-container (recursos).

Recepção de matéria-prima

A recepção de matéria-prima (figura 39) é o processo que recebe a unidade de transporte na usina, verifica os índices da carga de matéria-prima e descreve a forma de descarregamento ou armazenagem da carga e a operações pelas quais a unidade de transporte passa até retornar descarregada ao campo. As opções de operação são:

- Quanto ao tipo de matéria-prima: cana inteira ou picada;
- Quanto ao tipo de descarregamento: em pátio, em barracão, direto na mesa alimentadora ou direto na esteira de cana picada;

A unidade de transporte tem as opções de efetuar ou não: o abastecimento e a manutenção.

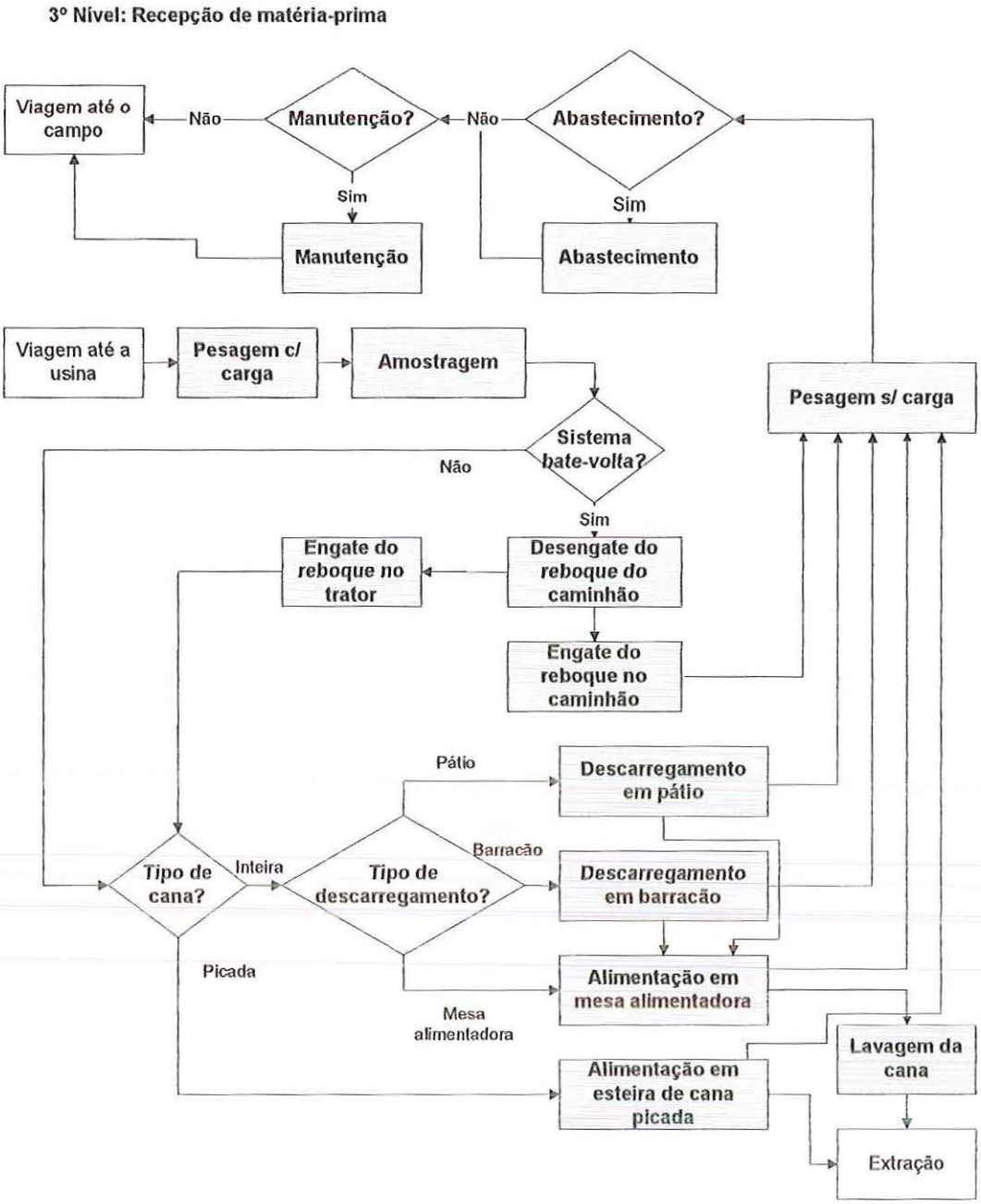

FIGURA 39 – Terceiro nível hierárquico – recepção de matéria-prima

As operações estão descritas abaixo:

- Pesagem com carga: é a operação de pesagem da unidade de transporte carregada, utilizando a balança (recurso). Um atributo importante nesta operação é a massa da carga que está entrando no processo industrial.
- Amostragem: representa a operação de coleta de amostras da carga de matéria-prima da unidade de transporte, utilizando uma sonda (recurso). Por meio de análises químicas, obtém-se, entre outros parâmetros importantes, o

teor de sacarose e o teor de fibra da carga de matéria-prima que está chegando no processo industrial.

- Descarregamento em pátio: é a operação de descarregamento da carga da unidade de transporte no pátio de armazenagem, utilizando o tombador tipo hillo ou o tombador hidráulico (recursos). A organização da matéria-prima descarregada no pátio é realizada por tratores-empilhadeiras (transportadores). Um parâmetro importante decorrente desta operação é o tempo de armazenagem, que influencia o teor de sacarose.
- Descarregamento em barracão: representa o descarregamento da carga da unidade de transporte no barracão de armazenagem, utilizando o tombador tipo hillo ou o tombador hidráulico (recursos). A organização da matéria-prima descarregada no pátio é realizada por pontes rolantes adaptadas com garras (transportadores). Um parâmetro importante decorrente desta operação é o tempo de armazenagem, que influencia o teor de sacarose.
- Alimentação em mesa alimentadora: é a operação de alimentação de cana inteira ou picada na mesa alimentadora (recurso), que alimenta a esteira de cana principal (esteira), para iniciar o processo industrial. Pode ser realizada pelo tombamento da carga da unidade de transporte, por meio de tombador tipo hillo (recurso), ou por trator-empilhadeira (transportador), no sistema de armazenagem em pátio.
- Lavagem da cana: é a operação de adição de água à camada de cana que está sobre a mesa alimentadora. A função é separar a terra contida na cana. É utilizada somente quando a quantidade de terra é excessiva, pois esta operação arrasta com a água uma quantidade relevante de sacarose.
- Alimentação em esteira de cana picada: é a operação de alimentação de cana picada na esteira de cana picada (esteira), utilizando o tombador hidráulico (recurso). A esteira de cana picada também alimenta a esteira de cana principal.
- Pesagem sem carga: é a operação de pesagem da unidade de transporte descarregada, utilizando a balança (recurso). Junto com a primeira pesagem (com carga), tem-se a quantidade de matéria-prima que esta unidade de transporte introduziu no processo industrial.
- Abastecimento: é a operação de abastecimento de combustível na unidade de transporte. Sua freqüência depende do consumo e das distâncias percorridas pela unidade de transporte nas viagens.

- Manutenção: representa a manutenção da unidade de transporte. Sua freqüência depende da política de manutenção adotada e do nível de desgaste mecânico da unidade de transporte.
- Desengate do reboque do caminhão: é a operação de desengate do reboque carregado da unidade de transporte que chega até a usina. É utilizada no sistema de bate-volta.
- Engate do reboque no caminhão: é a operação de engate do reboque descarregado na unidade de transporte que vai retornar ao campo. É utilizada no sistema bate-volta.
- Engate do reboque no trator: é a operação de engate do reboque carregado no trator (transportador) que vai movimentá-lo até o tombador para efetuar o descarregamento.

Extração

O processo de extração (figura 40) descreve as operações que transformam a cana em caldo a ser tratado no processo de tratamento de caldo. Um importante índice analisado neste processo é o índice de extração.

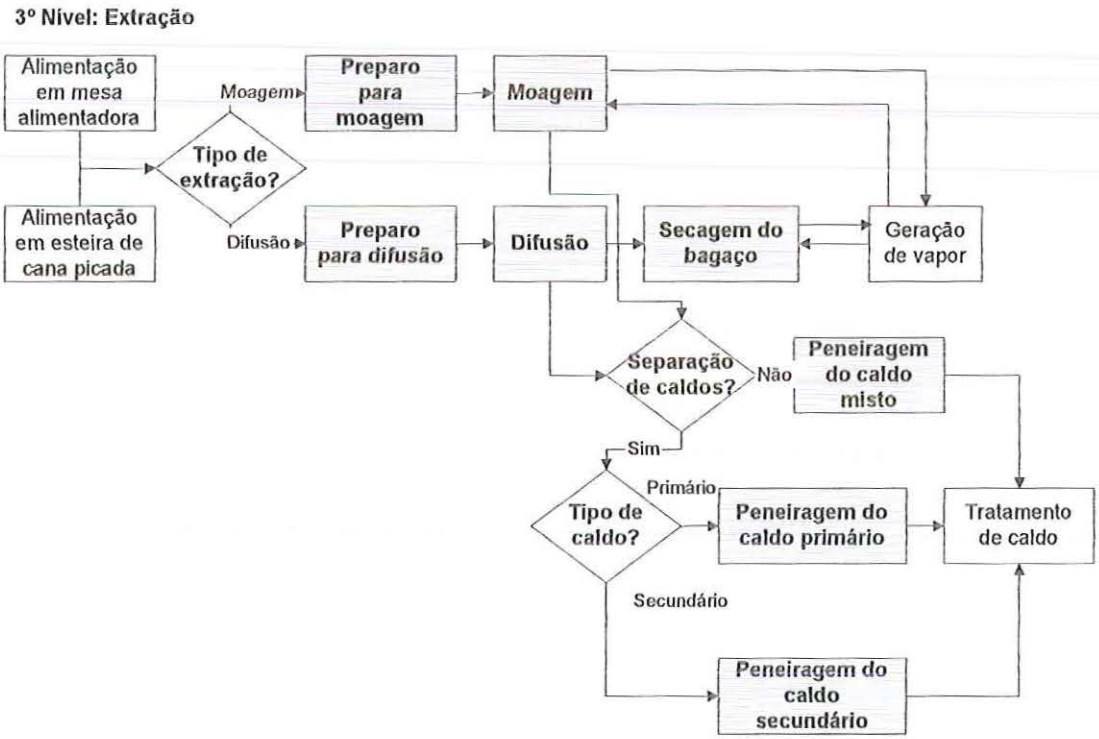

FIGURA 40 – Terceiro nível hierárquico – extração

As opções de operações dentro deste processo são:

- Quanto ao tipo de extração: moagem ou difusão;
- Quanto à separação de caldo: com ou sem.

As operações que compõem este processo são:

- Preparo para moagem: é a operação de preparo da cana para a moagem, utilizando o picador, o desfibrador, o tambor nivelador e o eletroímã (recursos). Um índice importante desta operação é o índice de preparo, que influencia o índice de extração e a moagem (quantidade de cana processada).
- Moagem: é a operação de esmagamento da cana preparada, para a separação do caldo e do bagaço, utilizando a moenda (recurso), que pode ter opções de modelo e número de ternos de extração. Nesta operação ocorre a embebição do bagaço, para melhorar o índice de extração, que é o parâmetro mais importante, pois compõe o índice de rendimento industrial.
- Preparo para difusão: é a operação de preparo da cana para a difusão, utilizando o picador, o desfibrador, o tambor nivelador e o eletroímã (recursos). Um índice importante desta operação é o índice de preparo, que influencia o índice de extração na difusão.
- Difusão: é a operação de difusão da cana preparada, para a separação do caldo e do bagaço, utilizando o difusor (recurso), que pode ter opções de modelo e capacidade. Nesta operação ocorre a embebição do bagaço, para melhorar o índice de extração, que é o parâmetro mais importante. Outro fator importante é o tempo de permanência do caldo no difusor (tempo de difusão).
- Secagem do bagaço: após a difusão, há esmagamento do bagaço úmido resultante da difusão, por meio de um ou dois ternos de moenda convencionais ou pré-secadores do tipo LPE (*Low Pressure Extractor*).
- Peneiragem do caldo misto: é a operação de separação do caldo misto das impurezas sólidas, por meio de peneiras (recursos), que podem ter algumas opções: sistema cush-cush, peneira vibratória ou peneira rotativa. É utilizada quando não há separação dos caldos primário e secundário.
- Peneiragem do caldo primário: é a operação de separação do caldo primário das impurezas sólidas, por meio dos recursos citados na operação anterior. É utilizada quando há separação dos caldos primário e secundário.
- Peneiragem do caldo secundário: é a operação de separação do caldo secundário das impurezas sólidas, por meio dos recursos citados na operação acima. É utilizada quando há separação dos caldos primário e secundário.

Tratamento de caldo

Este processo representa a etapa de tratamento do caldo (figura 41) para sua preparação para a fabricação de açúcar e/ou de álcool. A opção de operações neste processo é quanto ao destino do caldo: para fabricação de açúcar ou de álcool. Este processo inicia a formação do índice de recuperação, que faz parte do índice de rendimento industrial.

3º Nível: Tratamento de caldo

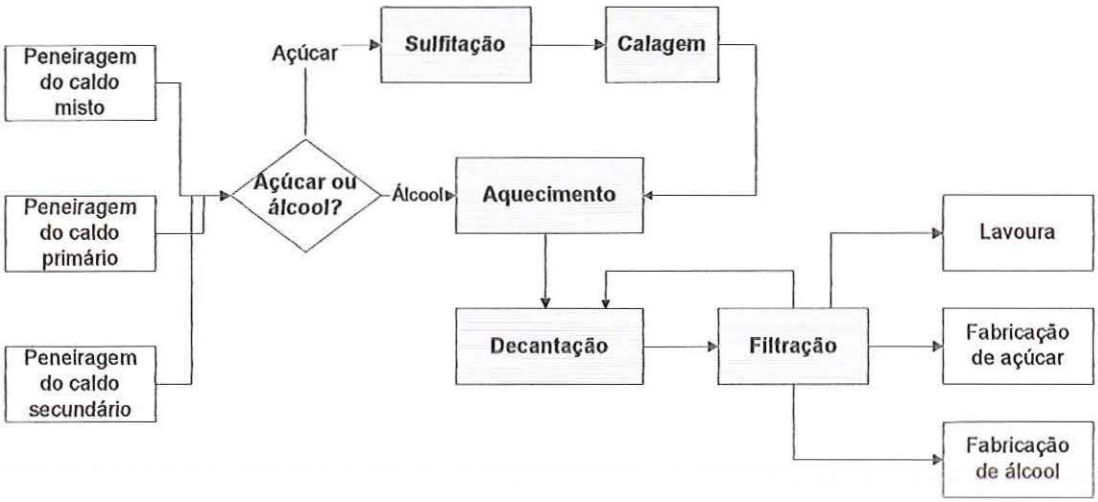

FIGURA 41 – Terceiro nível hierárquico – tratamento de caldo

As operações estão descritas a seguir:

- Sulfitação: representa a operação de adição de SO_2 ao caldo, utilizando a coluna de sulfitação (recurso). É utilizada para a preparação do caldo para fabricação de açúcar. Os parâmetros importantes são: vazão, temperatura e pH do caldo; e a quantidade de SO_2 adicionado.
- Calagem: é a operação de adição de cal ao caldo sulfitado, em tanques de mistura (misturadores). É utilizada para a preparação do caldo para fabricação de açúcar. Os parâmetros importantes são: vazão, temperatura e pH do caldo; e a quantidade de cal adicionada.
- Aquecimento: representa o aquecimento do caldo para auxiliar na operação de decantação, por meio de aquecedores (recursos). É utilizada para a preparação do caldo para fabricação de açúcar e pode ser também usada na fabricação de álcool. Os parâmetros importantes são: vazão, temperatura de entrada do caldo e do vapor.

- Decantação: é a operação de decantação do caldo aquecido para a separação do caldo das impurezas sólidas (lodo), utilizando o decantador (recurso). É utilizada para a preparação do caldo para fabricação de açúcar e de álcool. Um fator importante é o tempo de decantação, que depende da eficiência das operações anteriores. O decantador possui opções de modelo e capacidade.
- Filtração: representa a filtração do lodo resultante da decantação, utilizando o filtro rotativo a vácuo (recurso), que resulta na separação do caldo filtrado, que é retornado para o caldo misto, da torta, que determina uma das principais perdas industriais de sacarose.

Fabricação de açúcar

A fabricação de açúcar (figura 42) é o processo de transformação do caldo decantado para o açúcar cristal. Com a produção de açúcar tem-se o índice de rendimento industrial.

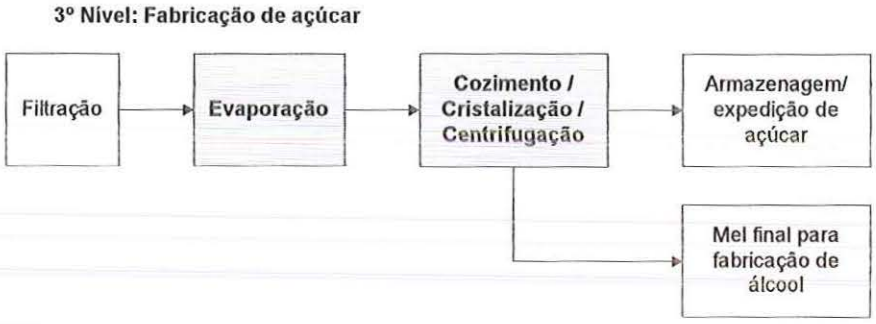

FIGURA 42 – Terceiro nível hierárquico – fabricação de açúcar

As operações são:

- Evaporação: é a operação de evaporação do caldo, para o aumento do brix até atingir valores convenientes para a operação de cozimento, por meio de pré-evaporadores e evaporadores em sistema de múltiplo efeito (recursos). Os parâmetros importantes são: tempo de evaporação, vazão, temperatura e índice de brix do caldo; temperatura do vapor de aquecimento dos evaporadores; e pressão negativa nos evaporadores.
- 1.2.3.2. Cozimento / cristalização / centrifugação: representa a transformação do xarope em açúcar cristal, por meio de cozedores, cristalizadores e turbinas. Nesta operação, existem as opções dos sistemas de 2 ou 3 massas cozidas. Os cozedores podem ter opções de modelo e capacidade. Para os cristalizadores, as opções são de capacidade. No caso das turbinas, elas podem ser contínuas,

para a obtenção de massas, ou descontínuas, para obtenção de açúcar cristal, e podem variar em modelo e capacidade. Um resíduo importante neste processo é o mel final, que é aproveitado como matéria-prima para a fabricação de álcool. Os parâmetros importantes são: tempo de cozimento, temperatura do vapor de aquecimento dos cozedores, pressão negativa nos cozedores, tempo de cristalização e tempo de ciclo das turbinas descontínuas.

Fabricação de álcool

A fabricação de álcool (figura 43) é o processo de transformação do caldo decantado para o álcool. A opção de operação é quanto ao tipo de álcool a ser produzido: hidratado ou anidro.

3º Nível: Fabricação de álcool

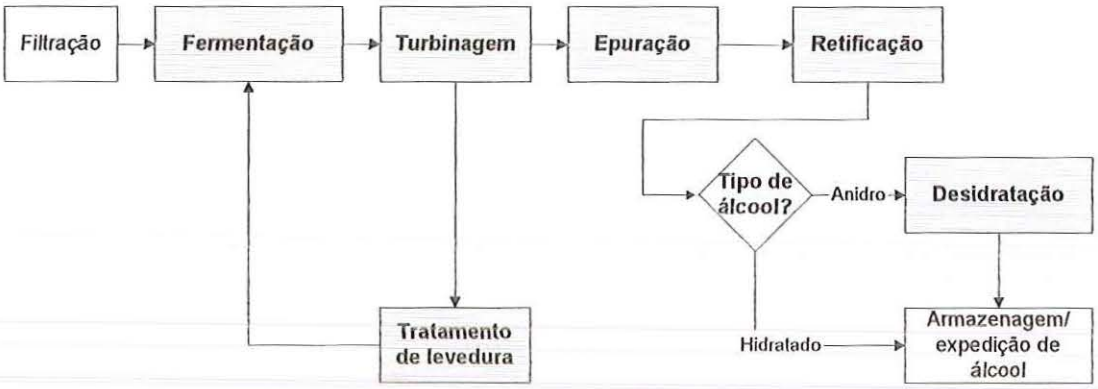

FIGURA 43 – Terceiro nível hierárquico – fabricação de álcool

As operações são:

- Fermentação: é a operação de fermentação do mosto para transformação da sacarose em álcool. Pode ter as opções contínua e descontínua. Para a contínua, o parâmetro importante é o tempo de permanência no conjunto de fermentação (estoque); para a descontínua, é o tempo de permanência na dorna (estoque). Outros parâmetros importantes são: temperatura da fermentação e quantidade de levedura.
- Turbinagem: representa a operação de separação do vinho da levedura, após a fermentação, por meio de turbinas (recursos). Um parâmetro importante é a quantidade de levedura recuperada.
- Epuração: é a operação de destilação que transforma o vinho da fermentação em flegma para a operação de retificação, utilizando a coluna de epuração

(recurso). Um resíduo importante é a vinhaça, que representa uma das perdas no processo de fabricação do álcool, e afeta o índice de rendimento industrial.

- Retificação: é a operação de destilação que transforma o flegma da epuração em álcool hidratado, que serve como combustível para veículos automotores, utilizando a coluna de retificação (recurso).
- Desidratação: é a operação de destilação que transforma o álcool hidratado da retificação em álcool anidro, que serve como aditivo na gasolina para veículos automotores, utilizando a coluna de desidratação (recurso) e um elemento desidratante (ciclo hexano). Um parâmetro importante é a quantidade de ciclo hexano utilizada e recuperada após a operação.
- Tratamento de levedura: representa a operação de tratamento e recuperação qualidade da levedura separada após a turbinagem do vinho fermentado, por meio de turbinas.

Geração de vapor

A geração de vapor (figura 44) é o processo que gera vapor de alta pressão para a geração de energia elétrica e para os processos industriais, a partir do bagaço. As operações são:

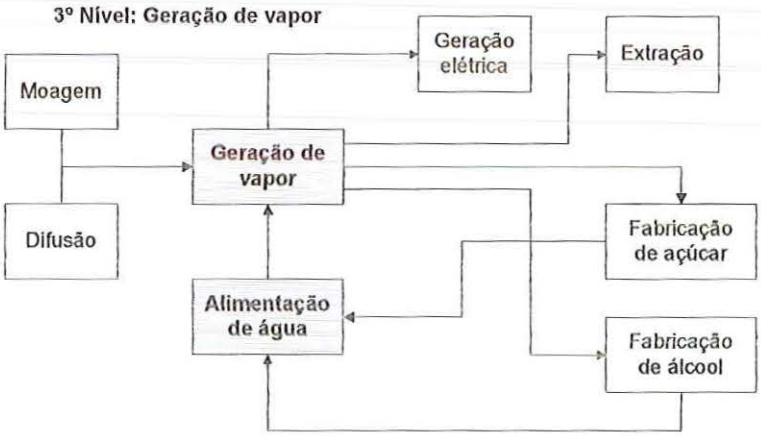

FIGURA 44 – Terceiro nível hierárquico – geração de vapor

- Geração de vapor: é a operação de obtenção de vapor de alta pressão, por meio de caldeiras (recursos) alimentadas por bagaço. As caldeiras podem ter opções de modelo e capacidade. Os resultados importantes desta operação são: a quantidade, pressão e temperatura do vapor gerado. Um resíduo importante é a fuligem resultante da queima do bagaço, que deve ser controlada por motivos ambientais.

- Alimentação de água: representa a operação de tratamento e alimentação de água para a caldeira, por meio: da recuperação do condensado (estoque) resultante da utilização do vapor nos diversos processos industriais; e da captação de água, que deve passar por uma estação de tratamento (recurso) antes de ser utilizada.

5.6. Etapa 6: Implementação e teste dos modelos e interfaces padrões

A implementação dos modelos padrões iniciou-se pela construção de modelos no software Arena®. Nesta fase inicial, os valores "conhecidos" das variáveis de entrada foram inseridos diretamente nos modelos. Isto se deveu à necessidade de verificação do correto funcionamento do modelo em relação ao fluxo das entidades ao longo de sua execução. E, os resultados "conhecidos" das simulações forneceram informações em relação à implementação e execução correta da lógica e dos cálculos, ou seja, a cada implementação verificava-se se os resultados mantinham a ordem de grandeza com relação aos dados "conhecidos".

Em seguida, os modelos foram testados com dados reais coletados nas usinas São Martinho[5], de Pradópolis, SP, e Santa Adélia[6], de Jaboticabal, SP. Estes testes serviram para validar os modelos e identificar o nível de precisão dos resultados.

A fase seguinte foi a do desenvolvimento e implementação das interfaces padrões. Estas interfaces foram desenvolvidas na linguagem de programação Visual Basic®, ferramenta integrada ao ambiente de modelagem e simulação do Arena®. Para cada modelo, foram desenvolvidas interfaces específicas, dada a variedade de tipo e quantidade de variáveis envolvidas em cada modelo.

A programação desenvolvida no Visual Basic® incluiu:

- o planejamento das opções de análise que o ambiente de simulação permite realizar, e
- o formato e os procedimentos para: a entrada dos dados, tanto por meio de interfaces quanto por meio de planilhas Excel®, e gravação de resultados das simulações, também em planilhas Excel®.

---

[5] Usina São Martinho SA – Fazenda São Martinho, s/n – Zona Rural – Rodovia Cunha Bueno – Caixa Posta 18 – CEP 14850-000 – Pradópolis, SP – Tel.: (16) 3981-9005

[6] Usina Santa Adélia SA - Fazenda Santa Adélia – Rodovia SP 326, km 332 – Caixa Postal 54 – CEP 14870-970 – Jaboticabal, SP – Tel.: (16) 3209-2000

A seguir, apresenta-se, como exemplo, os processos de utilização dos modelos padrões Usina (1° nível), Agrícola (2° nível) e Extração (3° nível).

5.6.1. Exemplo do 1° nível: Usina

Os modelos padrões ficam disponíveis para o planejador por meio de atalhos, na área de trabalho do computador, conforme pode ser observado no retângulo da figura 45.

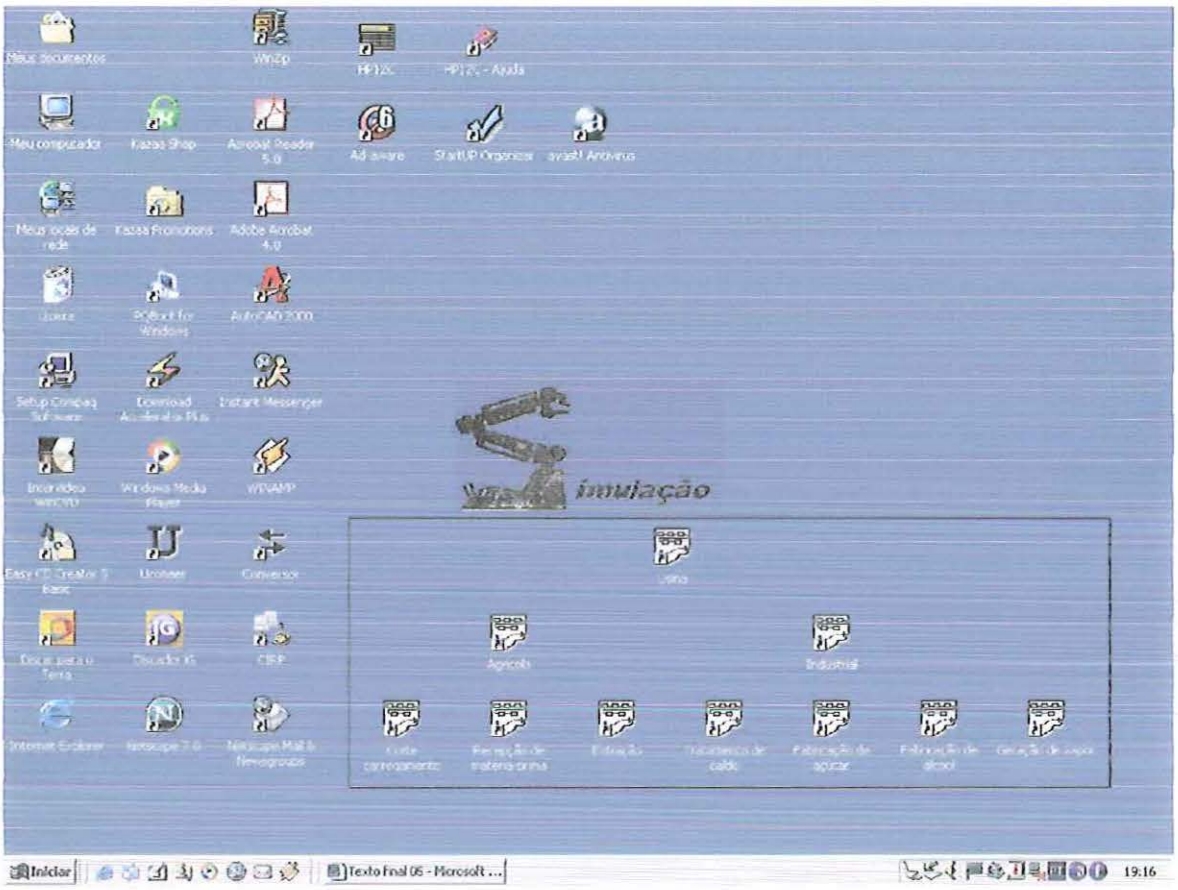

FIGURA 45 – Área de trabalho, com os atalhos para os modelos padrões

Inicialmente, a abertura do modelo apresenta o ambiente de simulação com o modelo padrão (figura 46).

EESC-USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

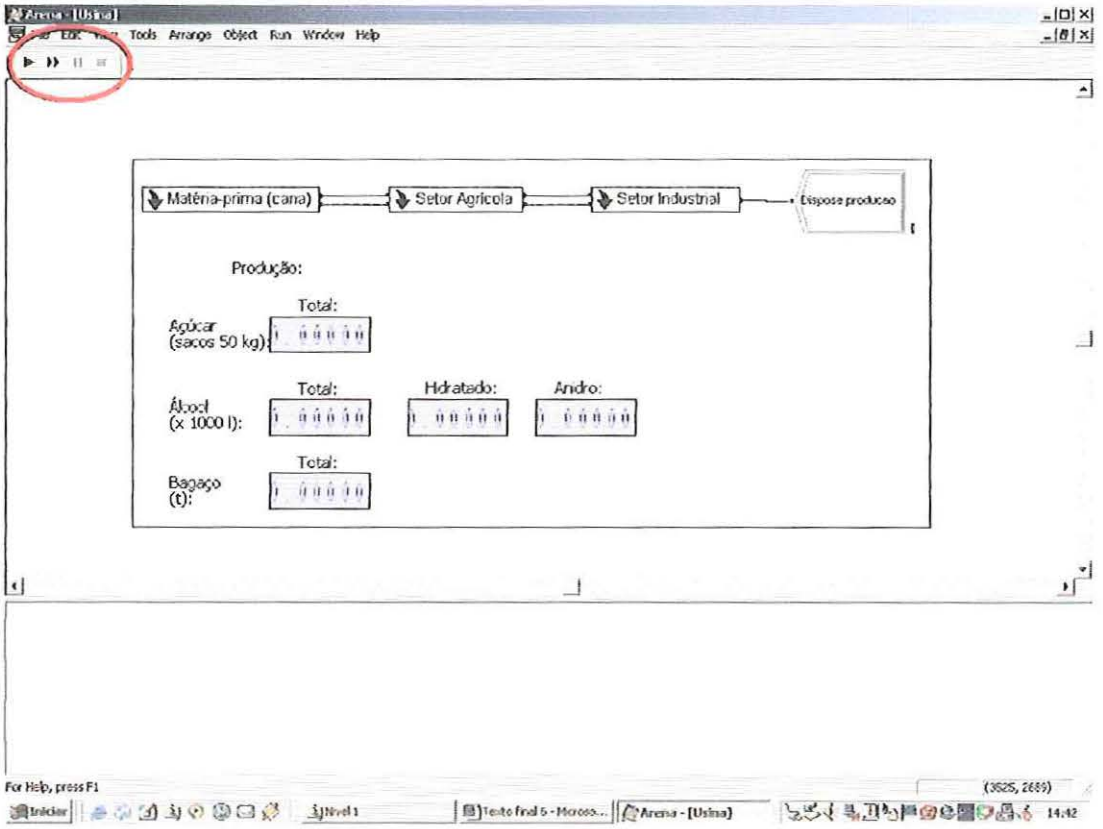

FIGURA 46 – Ambiente de simulação com o modelo Usina

Para interagir com o ambiente, o usuário tem à sua disposição um conjunto de botões, descritos a seguir:

Botão "**Go**": inicia a execução do estudo de simulação.

Botão "**Fast-Forward**": inicia também a execução do estudo de simulação, porém o modelo é executado de forma acelerada, sem exibir as animações.

Botão "**Pause**": provoca uma pausa na execução do modelo. O usuário pode continuar a execução acionando o botão "**Go**" ou "**Fast-Forward**".

Botão "**End**": finaliza a execução do modelo.

Ao acionar o botão "**Go**" ou "**Fast-Forward**", o usuário dá início ao estudo de simulação com o modelo padrão Usina. A primeira tela de interação que aparece é a da

figura 47, onde será feita a escolha do tipo de análise a ser realizada. Esta é a tela inicial de todos os modelos padrões.

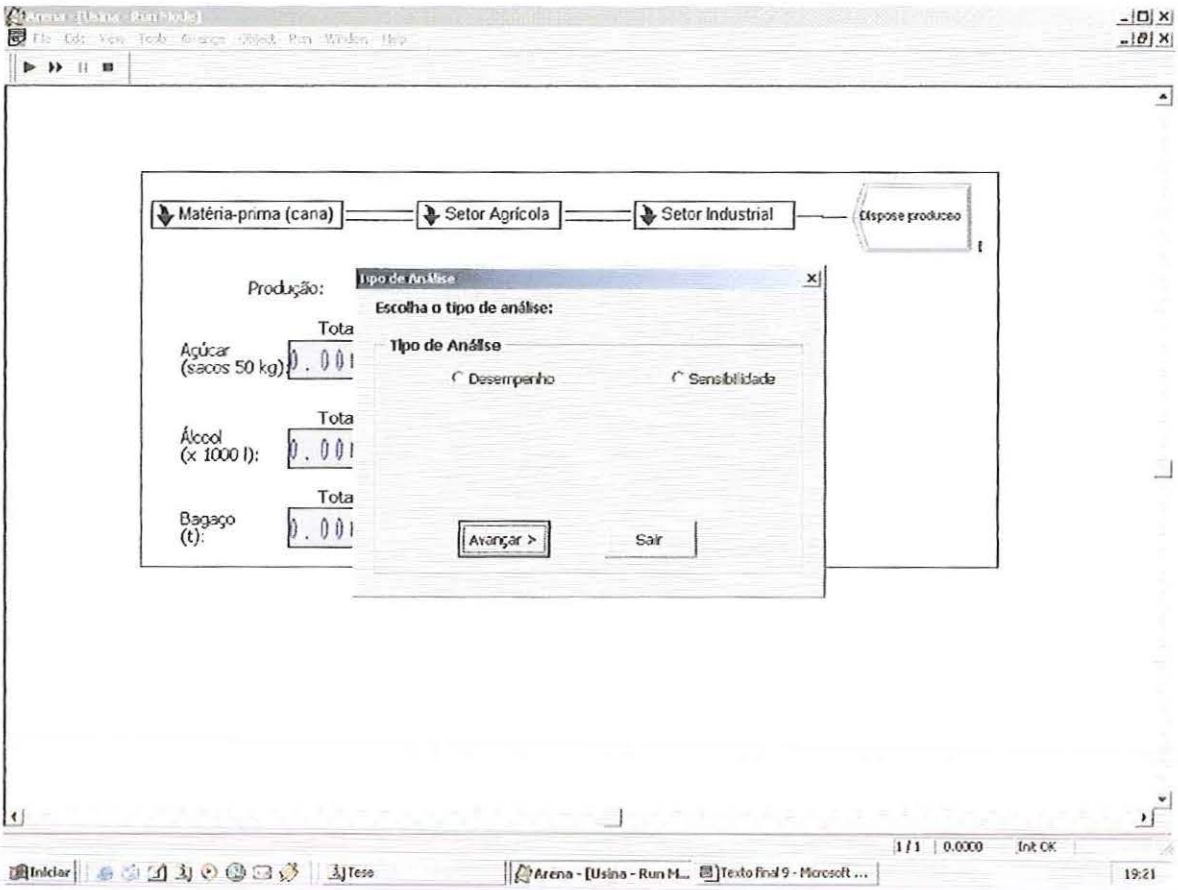

FIGURA 47 – Tela de seleção do tipo de análise

As opções são:

- Análise de desempenho, com entrada manual de dados, ou seja, o usuário digita todos os dados de entrada necessários para o estudo;
- Análise de desempenho, com entrada total ou parcial de dados por meio de leitura de arquivo contendo os dados; e
- Análise de sensibilidade.

Para facilitar a descrição dos experimentos, as análises passarão a ser denominadas:

- Análise de desempenho "manual", quando se estiver referenciando a análise de desempenho com entrada manual de dados.
- Análise de desempenho "arquivo", quando se estiver referenciando a análise de desempenho com entrada de dados por meio de leitura de arquivo.

Para facilitar a compreensão das ilustrações, a partir deste ponto, as figuras serão apresentadas somente com as janelas de interação com o usuário, sem o ambiente de simulação Arena® ao fundo.

Análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Inicialmente, foi selecionada a análise de desempenho "manual", conforme apresentado na figura 48. Após selecionar a análise citada, o usuário aciona o botão "**Avançar >**" para iniciar a configuração dos parâmetros do modelo.

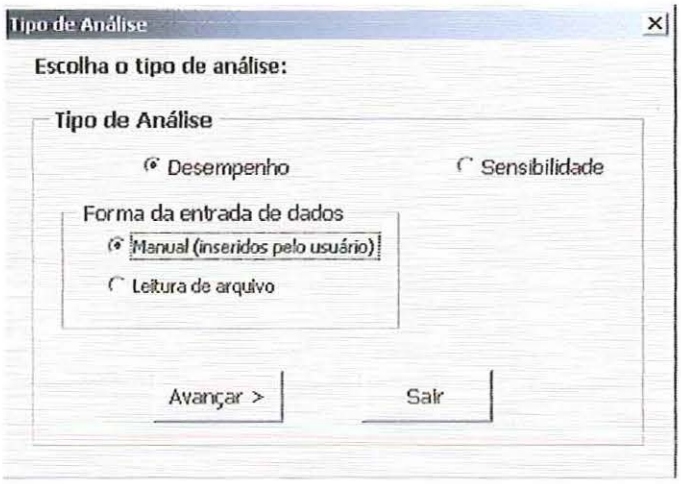

FIGURA 48 – Análise de desempenho "manual"

Para este modelo, existe uma tela de configuração dos valores dos parâmetros a serem avaliados, de acordo com a figura 49.

Nesta tela, o usuário tem a possibilidade de escolher uma distribuição estatística para representar os dados. Assim, para cada parâmetro, existe uma caixa de seleção de que apresenta a opção "Constante", para entrada de valor constante, além de outras opções que representam as distribuições estatísticas que são usadas para gerar valores probabilísticos. A possibilidade de entrada de dados determinísticos ou probabilísticos está disponível em todos os modelos padrões.

Foram realizadas três simulações com o modelo Usina, para a análise de desempenho "manual".

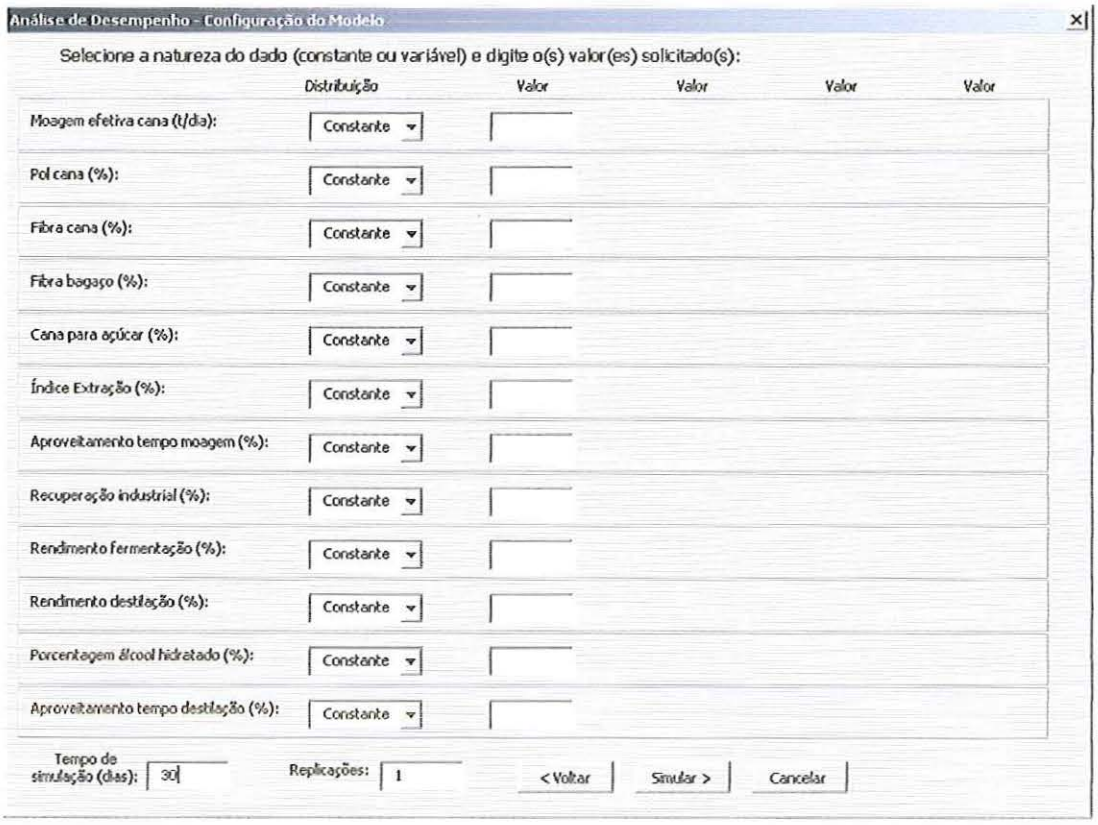

FIGURA 49 – Tela de configuração dos parâmetros para o modelo Usina

A configuração da primeira simulação está representada na figura 45. Nesta simulação, foram utilizados valores constantes, que são os valores médios de um mês de produção da Usina Santa Adélia. Todas as simulações da fase de implementação e teste dos modelos utilizaram dados desta usina.

O tempo de simulação foi de 31 dias, mesmo período dos dados coletados na usina. Com isso, tem-se uma mesma base para comparação dos resultados da simulação com os do sistema real. O número de replicações foi 3, somente para verificar o correto funcionamento da geração de replicações, uma vez que, sendo todos os valores constantes, todas as replicações geram os mesmos resultados.

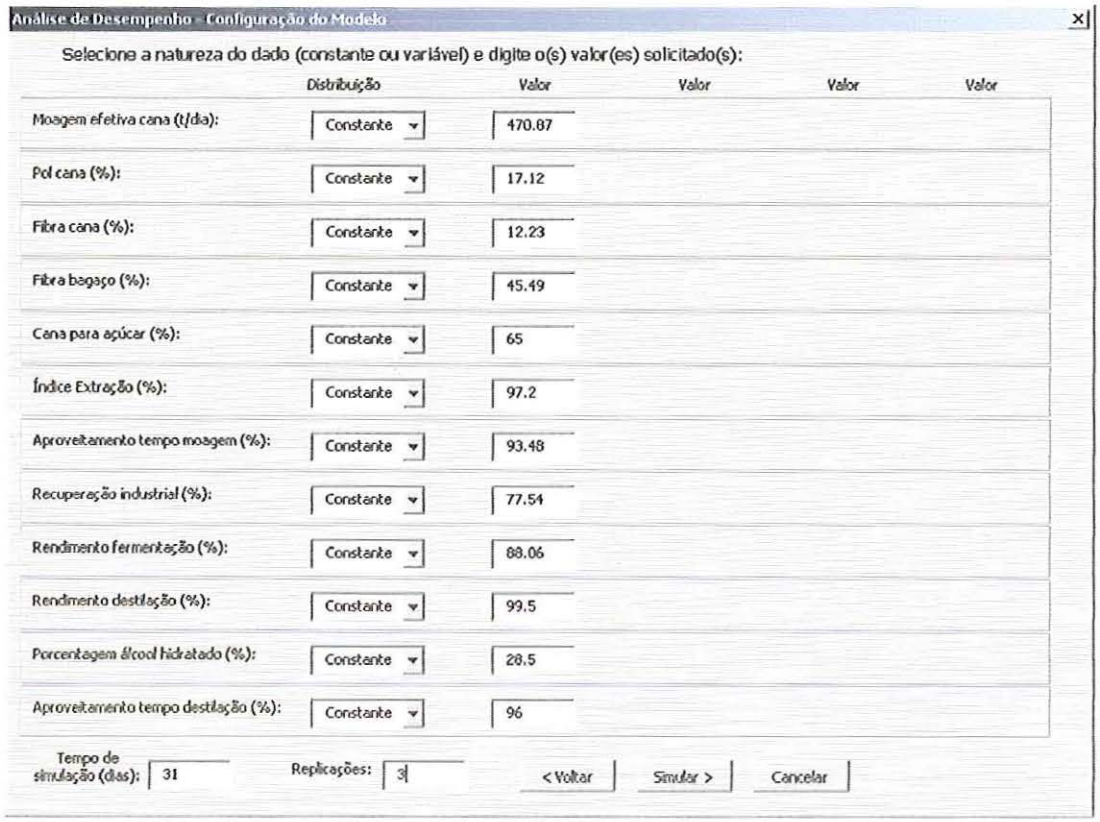

FIGURA 50 – Configuração do modelo Usina para a 1ª análise de desempenho

Completada a configuração do modelo, o usuário aciona o botão "**Simular >**" para iniciar a execução propriamente dita do modelo. Neste ponto, se o usuário iniciou o estudo pelo acionamento do botão "**Go**", ele poderá acompanhar, ao longo da execução, a atualização dos números nos retângulos que representam a produção de açúcar, de álcool hidratado, anidro e total, e de bagaço. A cada replicação, estes números são zerados. Para diminuir ou aumentar a velocidade de execução da simulação, o usuário pode utilizar as teclas "<" (sinal de menor) ou ">" (sinal de maior), respectivamente. Caso o usuário tenha iniciado o estudo pelo acionamento do botão "**Fast-Forward**", os números dos retângulos permanecem zerados ou sem atualização, mostrando que a animação está desligada.

Após a execução de todas as replicações, o ambiente de simulação apresenta a janela de instrução da figura 51, que instrui o usuário a finalizar a simulação pelo acionamento do botão "**End**".

FIGURA 51 – Janela de instrução para a finalização da simulação

O processo de finalização da execução pode ser esclarecido da seguinte forma: após acionar o botão "**OK**" na figura acima, o ambiente de simulação apresenta os resultados da última replicação (figura 52), no ambiente de execução do Arena®. Estes resultados, porém, ainda não estão salvos em arquivo Excel®.

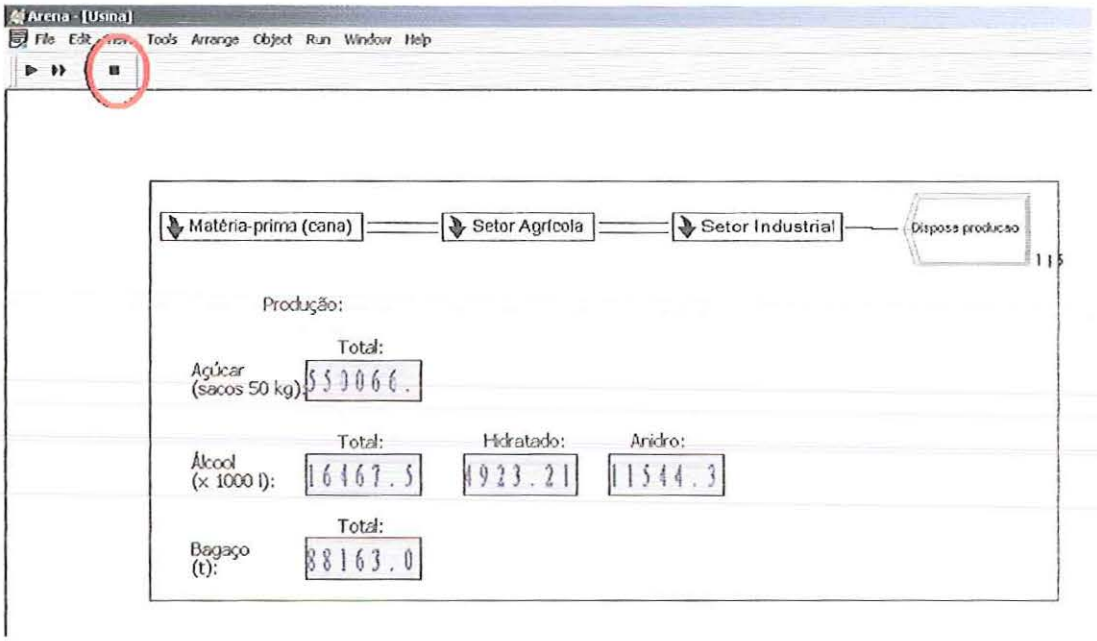

FIGURA 52– Tela do modelo Usina com os resultados da última replicação

Para salvar os resultados, o usuário deve acionar o botão "**End**", assinalado na figura acima. Com isso, surge a janela de instrução da figura 53.

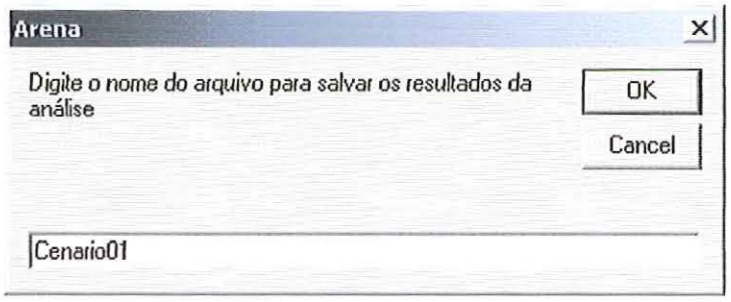

FIGURA 53 – Janela para o salvamento dos resultados da simulação em arquivo Excel®

O usuário, então, pode salvar os resultados da simulação em um arquivo Excel® com um nome adequado. Após digitar o nome e acionar o botão "**OK**", o ambiente de simulação exibe a pasta nomeada "Resultados", de uma planilha Excel®, onde estão gravados os resultados (figura 54). Este procedimento de gravação dos resultados está disponível em todos os modelos padrões e tipos de análise.

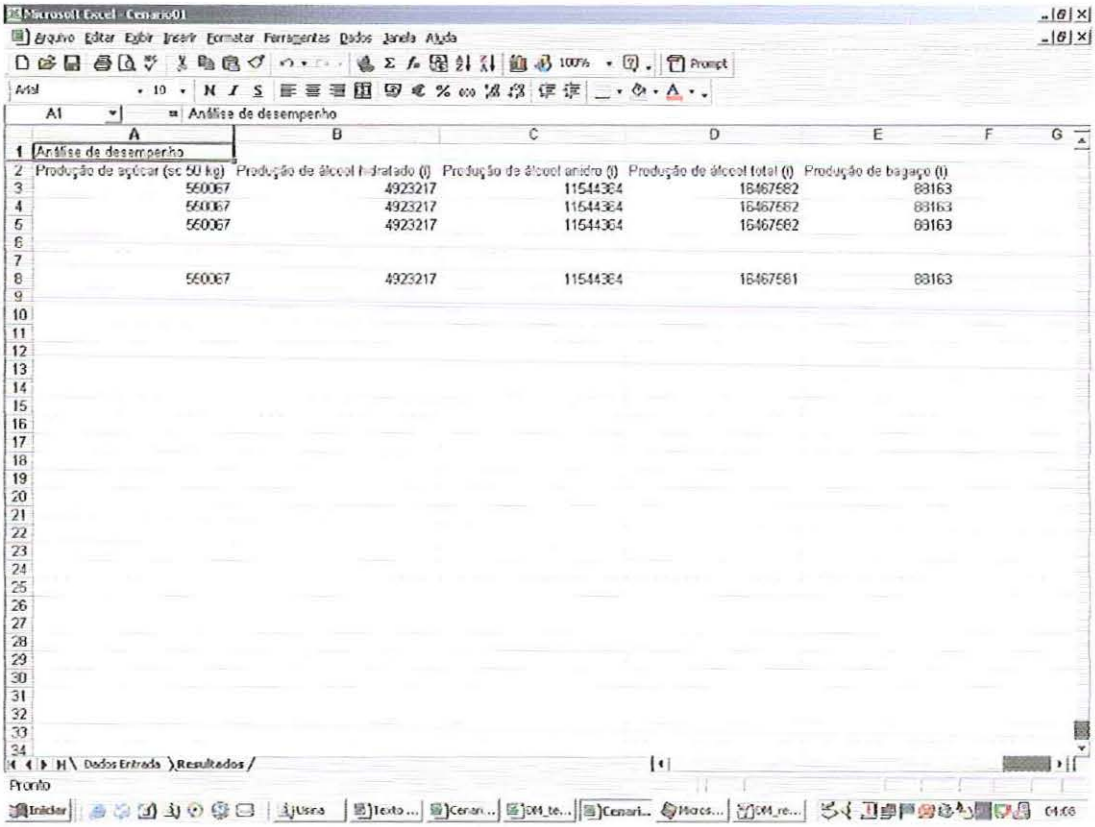

FIGURA 54 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Para este exemplo, no período de 31 dias, os resultados gravados são:

- produção de açúcar,

- produção de álcool hidratado,
- produção de álcool anidro,
- produção de álcool total e
- produção de bagaço.

Ao final dos resultados, o ambiente de simulação calcula a média entre as replicações. Neste caso, os valores de cada replicação e da média são iguais, pois foram utilizados somente valores constantes para todos os parâmetros, em todas as replicações. O procedimento de cálculo e apresentação das médias das replicações está disponível em todos os modelos padrões, para a análise de desempenho "manual".

Os resultados da simulação podem ser comparados com os do sistema real, para se analisar o nível de precisão do modelo padrão, em relação a este tipo de análise. A tabela 9 apresenta esta comparação.

TABELA 9 – Análise dos resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Produção de açúcar (sacos de 50 kg)	550.067	553.102	-0,55
Produção de álcool hidratado (l)	4.923.217	5.041.000	-2,34
Produção de álcool anidro (l)	11.544.364	11.828.000	-2,40
Produção de álcool total (l)	16.467.581	16.869.000	-2,38
Produção de bagaço (t)	88.163	88.422	0,29

Os valores apontam para diferenças de menos de 2,5%. Estas diferenças podem ser explicadas pelo fato de que alguns dados de entrada, especificamente a porcentagem de cana para fabricação de açúcar e a porcentagem de "álcool a 100%" para fabricação de álcool hidratado, são valores calculados pela usina, e não valores medidos.

Como pode ser observado na figura 55, o ambiente de simulação cria, na mesma planilha em que são gravados os resultados da simulação, uma pasta nomeada "Dados Entrada", onde são gravados também os valores dos parâmetros que serviram como entrada para a execução da simulação. Este formato do arquivo de resultados está disponível para todos os modelos padrões, para as análises de desempenho com entrada manual.

	A	B	C	D	E
1	ANÁLISE DE DESEMPENHO				
2	Descrição				
3					
4	Configuração da análise de desempenho				
5	Moagem efetiva de cana (t/h)	470,87			
6	Pol da cana (%)	17,12			
7	Fibra da cana (%)	12,23			
8	Fibra do bagaço (%)	45,49			
9	Porcentagem de cana para açúcar (%)	65			
10	Índice de extração (%)	97,2			
11	Aproveitamento do tempo de moagem (%)	93,48			
12	Recuperação Industrial (%)	77,54			
13	Rendimento da fermentação (%)	88,06			
14	Rendimento da destilação (%)	99,5			
15	Porcentagem de álcool para álcool hidratado (%)	28,5			
16	Aproveitamento do tempo de destilação (%)	96			
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					

Dados Entrada / Resultados /

FIGURA 55 – Dados de entrada da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Na pasta "Dados Entrada" pode ser observada a natureza dos dados de entrada. Neste exemplo, todos os dados de entrada foram considerados constantes, logo, somente a primeira coluna à direita da coluna "Descrição" (coluna B) foi preenchida. As colunas C, D e E são preenchidas quando as entradas de dados são de natureza aleatória.

Assim, no mesmo arquivo estão reunidas todas as informações de entrada e de saída do estudo de simulação realizado. Os dados deste arquivo podem ser recuperados para a realização de outros estudos.

Realizou-se uma segunda análise de desempenho com entrada manual de dados, utilizando o modelo Usina. Desta vez, foram usadas distribuições estatísticas para representar os valores dos parâmetros relacionados à matéria-prima:

- moagem efetiva de cana,
- pol da cana,
- fibra da cana e
- fibra do bagaço.

As distribuições foram geradas a partir do conjunto de dados coletados na usina. Para isso, foi utilizado o "Input Analyzer", uma ferramenta estatística integrada ao Arena®,

que faz a aderência de curvas de distribuições estatísticas a conjuntos de dados, e determina a distribuição que apresenta o melhor ajuste.

Os resultados estão na figura 56.

	A	B	C	D	E
1	Análise de desempenho				
2	Produção de açúcar (sc 50 kg)	Produção de álcool hidratado (l)	Produção de álcool anidro (l)	Produção de álcool total (l)	Produção de bagaço (t)
3	547199	4897550	11484179	16381729	87838
4	549797	4920805	11538709	16459514	87937
5	548884	4912631	11519541	16432172	87947
6	545748	4884561	11453720	16338281	87422
7	548139	4905963	11503905	16409868	88292
8	545946	4886341	11457893	16344234	87546
9	548327	4907652	11507866	16415518	87759
10	551941	4939993	11583703	16523696	88331
11	549549	4918589	11533511	16452099	87853
12	549163	4915132	11525406	16440538	87979
13	549655	4919532	11535724	16455256	87975
14	549430	4917517	11530997	16448513	87912
15	547897	4903797	11498827	16402624	87848
16	551237	4933696	11568936	16502632	88125
17	547930	4904095	11499526	16403621	87995
18	550854	4930269	11560900	16491169	87751
19	550521	4927283	11553898	16481181	87836
20	550686	4928757	11557356	16486113	88107
21	550021	4922807	11543402	16466208	87888
22	547266	4898151	11485587	16383738	87443
23	548565	4909777	11512850	16422627	87900
24	549061	4914221	11523270	16437491	88073
25	551915	4939757	11583149	16522906	88286
26	551401	4935162	11572373	16507535	88239
27	543836	4867450	11413596	16281045	87318
28	549240	4915819	11527017	16442836	88055
29	547435	4899663	11489132	16388795	87877
30	549956	4922229	11542046	16464275	88159
31	548573	4909847	11513012	16422859	87664
32	549754	4920416	11537795	16458211	88057
33					
34					
35	548997	4913649	11521927	16435578	87914

FIGURA 56 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Os dados de entrada estão na figura 57, que mostra a natureza determinística ou aleatória dos dados e os seus parâmetros, de acordo com a distribuição utilizada.

	A	B	C	D	E	F
1	ANÁLISE DE DESEMPENHO					
2	Descrição					
3						
4	Configuração da análise de desempenho					
5	Moagem efetiva de cana (t/h)	Beta	372	124	2,36	0,599
6	Pol da cana (%)	Normal	17,1	0,631		
7	Fibra da cana (%)	Triangular	11,6	12,2	12,8	
8	Fibra do bagaço (%)	Weibull	44	1,86	2,36	
9	Porcentagem de cana para açúcar (%)	Constante	65			
10	Índice de extração (%)	Constante	97,2			
11	Aproveitamento do tempo de moagem (%)	Constante	93,48			
12	Recuperação Industrial (%)	Constante	77,54			
13	Rendimento da fermentação (%)	Constante	88,06			
14	Rendimento da destilação (%)	Constante	99,5			
15	Porcentagem de álcool para álcool hidratado (%)	Constante	28,5			
16	Aproveitamento do tempo de destilação (%)	Constante	96			
17						

FIGURA 57 – Dados de entrada da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Pela tabela 10, que apresenta a comparação entre os resultados da simulação e os do sistema real, pode-se observar que as diferenças, no geral, mantiveram a ordem de grandeza, próxima de 2,5%.

TABELA 10 – Análise dos resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Produção de açúcar (sacos de 50 kg)	548.997	553.102	0,74
Produção de álcool hidratado (l)	4.913.649	5.041.000	2,53
Produção de álcool anidro (l)	11.521.927	11.828.000	2,59
Produção de álcool total (l)	16.435.578	16.869.000	2,57
Produção de bagaço (t)	87.914	88.422	0,57

Finalmente, uma terceira simulação foi realizada, utilizando todos os valores de entrada probabilísticos. Novamente, a caracterização da aleatoriedade dos parâmetros foi determinada a partir de distribuições estatísticas geradas a partir dos dados coletados na usina.

Os resultados da simulação estão na figura 58.

	A	B	C	D	E
1	Análise de desempenho				
2	Produção de açúcar (sc 50 kg)	Produção de álcool hidratado (l)	Produção de álcool anidro (l)	Produção de álcool total (l)	Produção de bagaço (t)
3	498873	4362450	11035151	15397600	83684
4	504434	4436707	10849360	15288067	83926
5	497039	4275068	10709967	14985025	82792
6	506963	4453769	11155125	15608914	84453
7	502487	4299772	10768672	15068444	83551
8	508338	4387663	10764570	15142233	83825
9	505040	4406673	10927942	15334615	83930
10	515583	4407818	11194247	15602065	85255
11	501247	4368047	10908518	15276565	83512
12	495619	4435145	10694553	15129698	82448
13	506559	4267084	10913835	15080919	84028
14	497093	4329599	10747850	15077449	82538
15	507045	4352438	11043847	15396284	83828
16	501816	4429006	11018489	15447495	84221
17	494422	4301135	10902610	15203744	82487
18	503746	4376026	10820431	15196457	83355
19	498819	4382501	11011165	15393666	83177
20	503933	4268026	10702707	14968803	83460
21	501335	4239378	10843123	15082500	83257
22	493272	4362164	10657694	15019858	82210
23	509806	4402967	10997751	15400717	84162
24	496251	4351238	11059739	15410976	83888
25	506838	4371776	11190486	15562261	84278
26	506367	4402223	10845737	15247960	83594
27	493769	4414304	10946450	15360754	83292
28	504720	4327623	10801601	15129224	83610
29	496790	4397242	10861051	15258293	83240
30	503941	4379847	10726566	15106412	83705
31	499298	4414477	10876001	15290478	83377
32	505771	4395721	10882061	15377782	84136
33					
34					
35	502241	4366533	10894843	15261376	83574

FIGURA 58 – Resultados da 3ª análise de desempenho "manual' do modelo Usina

Os dados de entrada na figura 59.

	A	B	C	D	E	F
1	ANÁLISE DE DESEMPENHO					
2	Descrição					
3						
4	Configuração da análise de desempenho					
5	Moagem efetiva de cana (t/h)	Beta	372	124	2,36	0,599
6	Pol da cana (%)	Normal	17,1	0,631		
7	Fibra da cana (%)	Triangular	11,6	12,2	12,8	
8	Fibra do bagaço (%)	Weibull	44	1,66	2,36	
9	Porcentagem de cana para açúcar (%)	Beta	58	42	0,634	3,15
10	Índice de extração (%)	Triangular	96,7	97,3	97,6	
11	Aproveitamento do tempo de moagem (%)	Beta	38	62	1,04	0,219
12	Recuperação Industrial (%)	Beta	37	47	1,97	0,513
13	Rendimento da fermentação (%)	Beta	87,2	1,82	0,594	0,632
14	Rendimento da destilação (%)	Constante	99,5			
15	Porcentagem de álcool para álcool hidratado (%)	Triangular	0	38,7	43	
16	Aproveitamento do tempo de destilação (%)	Beta	72	28	0,365	0,0611
17						

FIGURA 59 – Dados de entrada da 3ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

A figura 59 apresenta o dado Rendimento da destilação como constante. De fato, este parâmetro não é medido na usina em questão, sendo seu valor estimado e fixado pela usina em 99,5%. Assim, também nos estudos de simulação manteve-se este valor como constante.

Para esta simulação, as diferenças sofreram aumentos significativos. Na tabela 11, observa-se, na comparação entre os resultados da simulação e os do sistema real, que a diferença aumentou para mais de 5% em todas as comparações, chegando a 13,38% na produção de álcool hidratado.

TABELA 11 – Análise dos resultados da 3ª análise de desempenho "manual" do modelo Usina

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Produção de açúcar (sacos de 50 kg)	502.241	553.102	9,20
Produção de álcool hidratado (l)	4.366.533	5.041.000	13,38
Produção de álcool anidro (l)	10.894.843	11.828.000	7,89
Produção de álcool total (l)	15.261.376	16.869.000	9,53
Produção de bagaço (t)	83.574	88.422	5,48

Estes resultados podem ser explicados ao se analisar a geração dos valores probabilísticos.

A aleatoriedade dos dados de entrada, neste modelo e nos demais que compõem o ambiente de simulação, é definida segundo distribuições estatísticas, que são ajustadas aos conjuntos de dados de entrada. Para cada ajuste, existe um erro de ajuste associado às diferenças entre os valores dos conjuntos de dados e os possíveis valores da distribuição ajustada. Ferramentas de ajuste, como o "Input Analyzer" do Arena®, possuem a funcionalidade de verificar e determinar o melhor ajuste, ou seja, o que apresenta menor erro de ajuste, entre várias distribuições que são testadas.

Neste modelo, para a segunda e a terceira análise, as distribuições estatísticas utilizadas apresentaram erros de ajuste segundo a tabela 12. Nesta tabela, as fórmulas das distribuições estão escritas de acordo com a sintaxe permitida pelo Arena®.

TABELA 12 – Erros de ajuste nas distribuições estatísticas das análises de desempenho "manual" do modelo Usina

Descrição	Distribuição utilizada	Fórmula da Distribuição	Erro de ajuste
Moagem efetiva de cana (t)	Beta	372 + 124 * BETA(2.36, 0.599)	0,00694
Pol da cana (%)	Normal	NORM(17.1, 0.631)	0,0183
Fibra da cana (%)	Triangular	TRIA(11.6, 12.2, 12.8)	0,0174
Fibra do bagaço (%)	Weibull	44 + WEIB(1.66, 2.36)	0,00521
Porcentagem de cana para açúcar (%)	Beta	58 + 42 * BETA(0.634, 3.15)	0,0422
Índice de extração (%)	Triangular	TRIA(96.7, 97.3, 97.6)	0,0166
Aproveitamento do tempo de moagem (%)	Beta	38 + 62 * BETA(1.04, 0.219)	0,249
Recuperação industrial (%)	Beta	37 + 47 * BETA(1.97, 0.513)	0,0111
Rendimento da fermentação (%)	Beta	87.2 + 1.82 * BETA(0.594, 0.632)	0,0575
Rendimento da destilação (%)	Constante	99.5	-
Porcentagem de "álcool a 100%" para álcool hidratado	Triangular	TRIA(0, 38.7, 43)	0,00804
Aproveitamento do tempo de destilação (%)	Beta	72 + 28 * BETA(0.365, 0.0611)	0,139

Pode-se observar que as distribuições estatísticas ajustadas para o aproveitamento do tempo de moagem e para o aproveitamento do tempo de destilação apresentaram erros de ajuste nitidamente superiores aos das distribuições ajustadas para a moagem efetiva de cana, para a fibra do bagaço e para a porcentagem de "álcool a 100%" para álcool hidratado. Portanto, nem sempre se consegue um nível similar de ajuste para todos os conjuntos de dados envolvidos numa análise.

A inclusão da possibilidade da entrada de dados probabilísticos no ambiente de simulação tem como intuito permitir que as análises de desempenho tenham flexibilidade para manipular dados de natureza aleatória. Porém, devido à possibilidade da ocorrência de propagação de erros em função da possibilidade de ocorrência de diferentes níveis de erros de ajuste das distribuições estatísticas aos conjuntos de dados, deve-se atentar para a quantidade de distribuições que serão usadas quando da configuração de um determinado cenário. O usuário deve considerar a possibilidade da utilização de valores determinísticos quando a variabilidade do parâmetro não for significativa ou quando o conjunto de dados for insuficiente para gerar um ajuste adequado da distribuição estatística.

Assim, para a utilização de entradas de valores probabilísticos nos modelos, é necessária a avaliação de quais parâmetros devem, de fato, serem probabilísticos. A partir daí, para cada parâmetro que será probabilístico, necessita-se da coleta de uma quantidade suficiente de dados para que se obtenha um ajuste adequado da distribuição estatística que representará o parâmetro.

Análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

A segunda opção de análise é a análise de desempenho "arquivo" com entrada de dados por meio de leitura de arquivos Excel®. Como o processo de interação do usuário foi detalhado na explicação da análise de desempenho com entrada manual de dados, e mantém semelhanças com os processos das outras opções de análise, a partir deste ponto são apresentados somente as interfaces e processos de interação específicos para cada análise.

A análise de desempenho "arquivo" inicia-se com a sua seleção na tela de escolha do tipo de análise (figura 60).

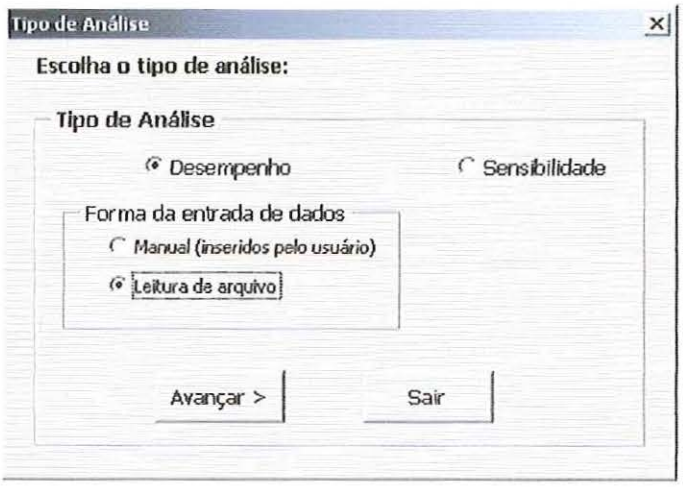

FIGURA 60 – Seleção da análise de desempenho "arquivo"

Quando o usuário aciona o botão "**Avançar >**" na tela acima, o ambiente de simulação lhe apresenta a janela da figura 61. Esta tela solicita ao usuário o horizonte de tempo de simulação para a execução do modelo para este tipo de análise. O horizonte de tempo de simulação pode cobrir até o período de aproximadamente uma safra (180 dias).

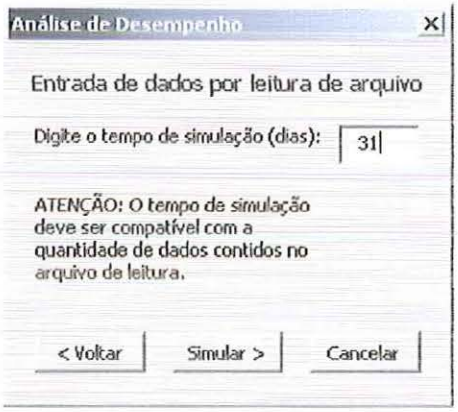

FIGURA 61 – Definição do horizonte de tempo de simulação na análise de desempenho "arquivo"

Para utilizar esta opção de análise, deve previamente ser construída uma planilha Excel® com os dados de entrada. Para este modelo, a planilha é a "Dados Usina", que está representada na figura 62.

Para utilizar este tipo de entrada de dados, o usuário deve observar um aspecto. O horizonte de tempo abrangido pelo estudo de simulação deve ser adequado à quantidade de dados contidos na planilha de entrada de dados. Neste exemplo, a planilha contém dados de 31 dias de produção.

5. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS, MODELOS E INTERFACES PADRÕES

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	USINA												
2	DADOS DE ENTRADA - ANALISE DE DESEMPENHO												
3													
4	Dia	Moagem efetiva (t/h)	Pol cana (%)	Fibra cana (%)	Fibra Bagaço (%)	Cana p/ Açúcar (%)	Índice Extração (%)	Aprov. Tempo Moagem (%)	Recuperação Industrial (%)	Rendimento Fermentação (%)	Rendimento Destilação (%)	Álcool p/ álcool hidratado (%)	Aprov. Tempo Dest. (%)
5	1	478,39	17,44	12,04	45,17	59,78	97,30	100,00	69,34	88,88	99,50	39,26	100,0
6	2	487,75	17,67	12,23	46,23	59,44	97,24	100,00	76,08	88,88	99,50	40,45	100,0
7	3	484,72	17,55	12,28	46,65	59,17	97,30	100,00	79,72	88,88	99,50	44,89	100,0
8	4	492,48	18,19	11,93	46,39	64,84	97,36	100,00	77,82	88,88	99,50	44,91	100,0
9	5	464,33	18,33	12,24	46,72	65,73	97,29	98,96	73,00	88,88	99,50	42,78	96,6
10	6	449,26	18,18	11,98	45,90	58,38	97,35	100,00	70,86	88,03	99,50	44,70	100,0
11	7	453,52	17,11	11,81	46,08	64,97	97,50	97,08	79,72	88,03	99,50	39,11	95,2
12	8	470,28	17,26	11,93	45,71	63,91	97,48	55,69	48,13	88,03	99,50	43,33	73,0
13	9	493,95	16,79	11,69	45,07	64,77	97,39	100,00	83,97	88,03	99,50	37,42	100,0
14	10	495,24	16,51	12,20	45,36	62,50	97,34	100,00	78,00	88,03	99,50	38,78	100,0
15	11	495,91	16,57	12,29	44,91	62,93	97,26	99,51	75,11	88,03	99,50	36,45	100,0
16	12	473,98	17,12	12,35	46,61	67,87	97,45	94,58	76,40	88,03	99,50	25,01	88,4
17	13	466,58	16,85	11,79	44,89	66,01	97,16	93,54	80,55	88,57	99,50	27,78	86,3
18	14	420,21	16,10	11,79	45,25	74,81	97,39	96,46	77,99	88,57	99,50	14,72	98,0
19	15	492,70	17,22	11,96	44,05	65,88	97,25	100,00	76,16	88,57	99,50	26,34	100,0
20	16	484,25	17,32	12,17	44,66	63,03	97,12	97,78	79,09	88,57	99,50	25,30	100,0
21	17	476,55	17,65	12,07	44,66	64,52	97,19	89,65	76,54	88,57	99,50	15,43	89,4
22	18	483,91	17,89	12,28	44,84	66,13	97,07	100,00	135,25	88,57	99,50	30,13	100,0
23	19	483,03	17,48	12,73	45,56	61,72	96,94	99,86	76,25	88,57	99,50	30,44	100,0
24	20	464,30	17,24	12,44	45,43	62,16	96,75	99,10	75,08	88,57	99,50	25,88	100,0
25	21	474,81	17,32	12,64	45,14	63,38	96,91	100,00	81,33	87,34	99,50	29,33	100,0
26	22	473,75	16,70	12,59	45,35	62,01	96,89	100,00	83,53	87,34	99,50	31,45	100,0
27	23	482,33	16,86	12,51	45,32	62,39	96,95	100,00	76,88	87,34	99,50	28,55	100,0
28	24	480,81	16,77	12,41	45,86	63,29	97,22	91,11	68,34	87,34	99,50	25,40	100,0
29	25	482,38	16,77	12,64	45,43	64,24	96,87	100,00	79,99	87,34	99,50	36,19	100,0
30	26	471,99	16,89	12,57	44,66	63,50	96,94	99,79	82,44	87,34	99,50	32,52	100,0
31	27	372,29	15,06	12,20	45,16	63,68	96,87	38,13	113,51	87,34	99,50	13,82	76,2

Dados / Resultados / Plan3 / Plan4

FIGURA 62 – Dados de entrada para a 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

Assim, se o usuário definir um horizonte de simulação de 31 dias, o ambiente de simulação utilizará exatamente a quantidade total de informações da planilha. Caso o horizonte de simulação seja definido para um período de 20 dias, por exemplo, o ambiente utilizará as 20 primeiras linhas da planilha e desprezará as demais. No caso do horizonte de simulação ser definido para um período de 40 dias, o ambiente utilizará normalmente as 31 linhas de dados da planilha para os 31 primeiros dias de simulação, e iniciará novamente a leitura das linhas de dados, a partir da primeira até a nona, para completar os 40 dias de simulação. Assim, os últimos 9 dias de resultados da simulação ficarão sendo iguais aos 9 primeiros.

Em seqüência, após definir o tempo de simulação e acionar o botão "**Simular >**" na figura 61, a execução do modelo padrão é iniciada. Esta análise executa somente uma replicação, pois as demais replicações utilizam exatamente os mesmos dados e, conseqüentemente, apresentam os mesmos resultados.

Após o término da execução do modelo, o usuário é instruído a digitar um nome para a planilha onde são salvos os resultados da simulação (figura 63). Esta etapa é importante, pois o ambiente de simulação, para este tipo de análise, utiliza a planilha de entrada de dados original ("Dados Usina") para salvar, em outra pasta, os resultados da simulação.

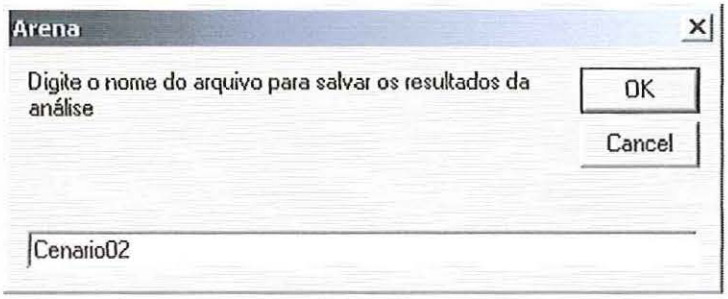

FIGURA 63 – Janela de instrução para gravação de resultados

Com isso, os dados de entrada e os resultados da simulação ficam armazenados no mesmo arquivo, assim como na análise de desempenho com entrada manual de dados. Se o usuário escolher sempre um nome específico e particular para os seus arquivos de resultados e que seja diferente de "Dados Usina", ele mantém intacto o arquivo original de entrada de dados.

Esta manutenção é importante, pois o ambiente de simulação procura sempre, para este modelo padrão, o arquivo com o nome "Dados Usina" para realizar a leitura de dados e, então, executar a simulação.

Na seqüência, após a digitação do nome do arquivo onde são guardados os resultados da simulação e após acionar o botão "**OK**", o usuário pode observar a apresentação da pasta "Resultados" (figura 64), com os resultados coletados durante a simulação.

Para esta análise, são coletados os resultados diários da execução da simulação. Estes resultados são importantes para a validação do modelo. No final do conjunto de 31 resultados, correspondentes aos 31 dias, são apresentados o total da simulação e a média diária.

	A	B	C	D	E	F
1	Análise de desempenho					
2	Produção de açúcar (sc 50 kg)	Produção de álcool hidratado (l	Produção de álcool anidro (l	Produção de álcool total (l)	Produção de bagaço (t)	
3	16153	292514	423044	715557	3060	
4	18193	313729	431780	745509	3097	
5	18736	346151	397183	743334	3062	
6	21120	314247	360266	674512	3040	
7	18877	264899	331174	596072	2889	
8	15788	334342	386608	720950	2814	
9	18260	216566	315164	531729	2708	
10	6507	113707	138991	252698	1640	
11	21083	240709	376233	616942	3075	
12	18620	261565	385952	647518	3197	
13	18046	242949	395986	638935	3241	
14	18615	120075	336553	456628	2851	
15	18229	132382	321722	454105	2751	
16	17795	52507	284415	336922	2535	
17	19871	168666	440756	609422	3211	
18	19054	169452	467516	636969	3097	
19	17373	81576	417998	499574	2771	
20	36080	195057	422729	617786	3181	
21	18460	216524	462465	678989	3235	
22	17197	170950	457668	628618	3024	
23	19716	191946	432360	624306	3191	
24	19055	205336	418362	623698	3157	
25	18154	189909	444191	634101	3195	
26	14931	149397	410109	559506	2845	
27	19333	227497	374906	602403	3221	
28	19375	205237	398059	603297	3182	
29	7186	17776	103564	121339	920	
30	10149	0	239	239	2206	
31	10451	0	257968	257968	2090	
32	18553	0	565704	565704	2984	
33	18146	86456	533898	620354	3086	
34						
35	549006	5522122	11493561	17015682	88555	
36	17710	178133	370760	548893	2857	

FIGURA 64 – Resultados da 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

A comparação entre os resultados da simulação e os do sistema real é apresentada na tabela 13.

TABELA 13 – Análise dos resultados para a 1ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Produção de açúcar (sacos de 50 kg)	549.006	553.102	-0,74
Produção de álcool hidratado (l)	5.204.639	5.041.000	3,35
Produção de álcool anidro (l)	11.790.305	11.828.000	-0,32
Produção de álcool total (l)	16.994.942	16.869.000	0,75
Produção de bagaço (t)	88.555	88.422	0,15

A tabela mostra que os resultados apresentam diferenças menores que 1%. Somente a produção de álcool apresentou uma diferença da ordem de 3,35%.

Para verificar se esta diferença ocorreu em função de erro de lógica no modelo ou em função dos parâmetros cujos valores foram calculados e não medidos, realizou-se novamente a análise, com a modificação do conjunto de valores da porcentagem de "álcool a 100%" para fabricação de álcool hidratado. Os valores deste parâmetro foram diminuídos para 98% dos valores da primeira análise.

Os resultados obtidos com a nova análise de desempenho, com alteração dos valores do "álcool a 100%" para fabricação de álcool hidratado, estão apresentados na figura 65.

	A	B	C	D	E
1	Análise de desempenho				
2	Produção de açúcar (sc 50 kg)	Produção de álcool hidratado (l)	Produção de álcool anidro (l)	Produção de álcool total (l)	Produção de bagaço (t)
3	16153	270182	443916	714098	3060
4	18193	289778	454166	743944	3097
5	18736	319725	421882	741607	3062
6	21120	290256	382689	672945	3040
7	18877	244676	350076	594751	2889
8	15788	308818	410465	719283	2814
9	18260	200032	330617	530649	2708
10	6507	105026	147105	252131	1640
11	21083	222333	393409	615742	3075
12	18620	241596	404617	646213	3197
13	18046	224401	413322	637723	3241
14	18615	110908	345121	456029	2851
15	18229	122276	331168	453444	2751
16	17795	48498	288161	336660	2535
17	19871	155789	452792	608581	3211
18	19054	156516	479608	636124	3097
19	17373	75348	423820	499168	2771
20	36080	180165	436648	616813	3181
21	18460	199994	477915	677909	3235
22	17197	157899	469866	627766	3024
23	19716	177292	446057	623349	3191
24	19055	189660	433014	622674	3157
25	18154	175411	457743	633154	3195
26	14831	137992	420769	558761	2845
27	19333	210129	391139	601268	3221
28	19375	189569	412704	602273	3182
29	7186	16419	104832	121251	920
30	10149	0	239	239	2206
31	10451	0	257868	257868	2090
32	18553	0	565704	565704	2984
33	18146	79856	540068	619923	3086
34					
35	549006	5100545	11887598	16988144	88555
36	17710	164534	383471	548005	2857
37					

FIGURA 65 – Resultados da 2ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

Observando-se a tabela 14, que apresenta a comparação entre os resultados na nova análise de desempenho descrita acima e os resultados do sistema real, o valor da diferença da produção de álcool hidratado diminuiu de 3,35% para 1,18%, aproximando-se da ordem de grandeza das demais diferenças. Com isso, observa-se que pequenas modificações nos dados de entrada podem gerar alterar significativamente o nível de precisão dos resultados das simulações.

TABELA 14 – Análise dos resultados para a 2ª análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Produção de açúcar (sacos de 50 kg)	549.006	553.102	-0,74
Produção de álcool hidratado (l)	5.100.545	5.041.000	1,18
Produção de álcool anidro (l)	11.887.598	11.828.000	0,50
Produção de álcool total (l)	16.988.144	16.869.000	0,71
Produção de bagaço (t)	88.555	88.422	0,15

Análise de sensibilidade do modelo Usina

Para finalizar o estudo do modelo padrão Usina, tem-se a análise de sensibilidade. A opção por este tipo de análise é apresentada na figura 66.

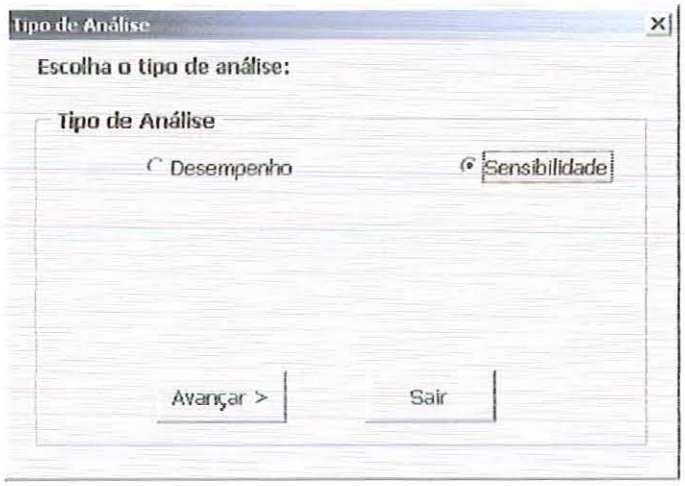

FIGURA 66 – Seleção da análise de sensibilidade

Após a escolha da análise de sensibilidade e do acionamento do botão "**Avançar >**", o ambiente de simulação apresenta a tela de configuração da figura 67.

Nesta tela, são apresentados os fatores que serão analisados. Para este exemplo, os fatores são:

- pol da cana,
- fibra da cana,

- fibra do bagaço e
- índice de extração.

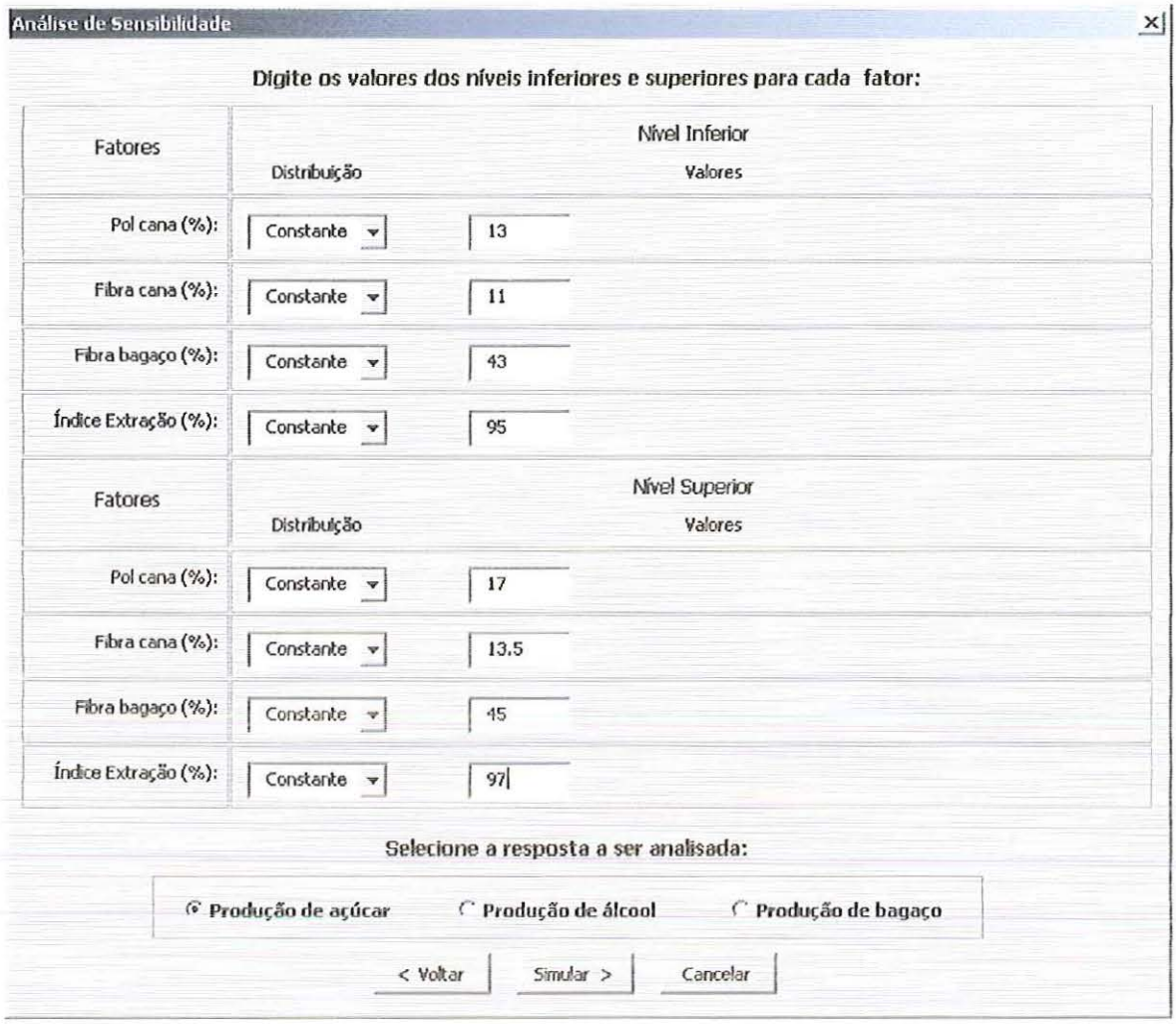

FIGURA 67 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo Usina

A interface solicita a digitação dos valores inferiores e superiores de cada fator, permitindo que tais valores sejam constantes ou probabilísticos, conforme explicado nos exemplos da análise de desempenho com entrada manual de dados.

O usuário pode, também, escolher a resposta de interesse para a análise. Para cada resposta, ele deve executar a análise novamente. Neste exemplo, foi escolhida a produção de açúcar.

Após o preenchimento dos valores necessários para a execução do modelo padrão, o usuário deve acionar o botão "**Avançar >**". Com isso, inicia-se a execução das 32 replicações, que correspondem às 2 replicações de cada uma das 16 combinações possíveis entre os níveis inferiores e superiores de cada fator. Com isso, tem-se o

planejamento fatorial 2^4 completo. Este planejamento está disponível para todos os modelos padrões, na análise de sensibilidade.

Após a finalização das 32 replicações, o ambiente de simulação instrui o usuário a salvar os resultados da análise com um nome específico (figura 68).

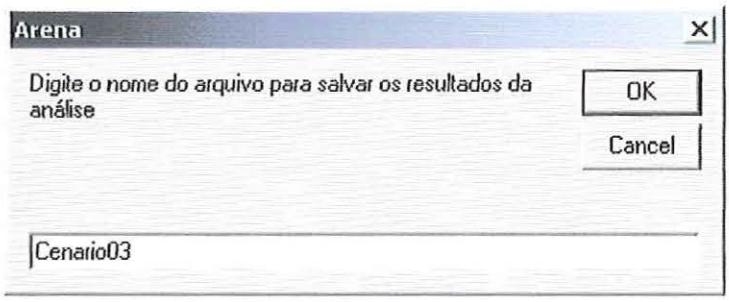

FIGURA 68 – Janela para gravação de resultados

Executada a gravação, o ambiente de simulação apresenta os resultados da análise de sensibilidade numa planilha Excel®, conforme a figura 69. Esta análise fica gravada na pasta "Analise". Este tipo de análise identifica qual(is) fator(es) afetam a resposta de interesse, neste caso, a produção de açúcar.

	A	B	C	D	E	F	G
1	ANALISE DE SENSIBILIDADE - Significância dos fatores						
2							
3	Nível de significância 5%						
4							
5	Efeitos principais e de interação					Efeito	
6	E1	Pol da cana				Significativo	Ver análise abaixo.
7	E2	Fibra da cana				Não significativo	
8	E3	Fibra do bagaço				Não significativo	
9	E4	Índice de extração				Significativo	Ver análise abaixo.
10	E12	Pol da cana	Fibra da cana			Não significativo	
11	E13	Pol da cana	Fibra do bagaço			Não significativo	
12	E14	Pol da cana	Índice de extração			Significativo	
13	E23	Fibra da cana	Fibra do bagaço			Não significativo	
14	E24	Fibra da cana	Índice de extração			Não significativo	
15	E34	Fibra do bagaço	Índice de extração			Não significativo	
16	E123	Pol da cana	Fibra da cana	Fibra do bagaço		Significativo	
17	E124	Pol da cana	Fibra da cana	Índice de extração		Não significativo	
18	E134	Pol da cana	Fibra do bagaço	Índice de extração		Significativo	
19	E234	Fibra da cana	Fibra do bagaço	Índice de extração		Não significativo	
20	E1234	Pol da cana	Fibra da cana	Fibra do bagaço	Índice de extração	Não significativo	

FIGURA 69 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Usina

O quadro apresentado na figura 69 identifica quais efeitos principais e de interação são significativos, num nível de significância de 5%. Neste exemplo, são significativos:

- o efeito principal da pol da cana e do índice de extração;
- o efeito de interação de 2 fatores entre a pol da cana e o índice de extração;
- o efeito de interação de 3 fatores entre a pol da cana, a fibra da cana e a fibra do bagaço, e entre a pol da cana, a fibra do bagaço e o índice de extração.

Alguns dos efeitos significativos já eram esperados, outros trazem novas informações. Os efeitos principais da pol da cana e do índice de extração já eram esperados como sendo significativos, pois:

- a pol da cana representa a quantidade efetiva de sacarose disponível.
- o índice de extração determina a quantidade efetiva que se dispõe de sacarose no caldo, após o esmagamento da cana.

As duas, portanto, contribuem de forma direta para a produção de açúcar.

As interações de 2 e de 3 fatores não são simples de se notar ou de se analisar. Parece ser intuitivo que, como a pol da cana e o índice de extração contribuem de forma proporcionalmente direta para a produção de açúcar, a interação entre os 2 fatores também tenha um efeito significativo. Isto, porém, só pode ser confirmado pela execução do planejamento fatorial. No caso das interações de 3 ou mais fatores, somente o planejamento fatorial pode apontar se elas são significativas ou não.

Para uma melhor compreensão de como os efeitos principais atuam na resposta, o ambiente de simulação apresenta uma análise quantitativa dos efeitos principais (figura 70). Assim, o efeito principal da pol da cana é da ordem de, no máximo, 28,55% no aumento da produção de açúcar, quando o seu valor passa de 14% para 18%. E o efeito principal do índice de extração, quando seu valor passa de 95% para 97,5%, é da ordem de, no máximo, 2,6% no aumento da produção de açúcar.

22	EFEITOS PRINCIPAIS	
23	**E1**	**Produção de açúcar**
24	Inferior	421528,66
25	Superior	541870,06
26	Variação máxima (%)	28,55
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35	**E4**	**Produção de açúcar**
36	Inferior	475528,27
37	Superior	487870,45
38	Variação máxima (%)	2,60

FIGURA 70 – Análise quantitativa dos efeitos significativos principais da análise de sensibilidade do modelo Usina

Para os efeitos das interações, este trabalho restringe-se à identificação das suas significâncias. Os efeitos das interações podem ocorrer em função das diversas combinações entre 2, 3 ou 4 fatores, no caso do planejamento fatorial 2^4. Para a análise

quantitativa dos efeitos das interações, necessita-se de métodos estatísticos específicos, que não são abordados neste trabalho.

Na planilha de resultados da análise de sensibilidade, o ambiente de simulação grava os resultados de todas as 32 replicações executadas, na pasta "Resultados" (figura 71).

	A	C	D	E	F	R	S
1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Resultados dos experimentos						
2							
3	Legenda:	-1 Nível inferior					
4		+1 Nível superior					
5							
6	Fatores:	1 Pol da cana					
7		2 Fibra da cana					
8		3 Fibra do bagaço					
9		4 Índice de extração				Produção de açúcar	
10						Replicações	
11	Experimento	1	2	3	4	1	2
12	1	-1	-1	-1	-1	415762	416348
13	2	1	-1	-1	-1	535305	535305
14	3	-1	1	-1	-1	416348	416348
15	4	1	1	-1	-1	534552	534552
16	5	-1	-1	1	-1	416348	415762
17	6	1	-1	1	-1	534552	535305
18	7	-1	1	1	-1	416348	415762
19	8	1	1	1	-1	535305	534552
20	9	-1	-1	-1	1	426704	426704
21	10	1	-1	-1	1	549392	549392
22	11	-1	1	-1	1	426704	426704
23	12	1	1	-1	1	548619	548619
24	13	-1	-1	1	1	427305	427305
25	14	1	-1	1	1	548619	548619
26	15	-1	1	1	1	427305	426704
27	16	1	1	1	1	548619	548619
28							

FIGURA 71 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Usina

Os fatores e os níveis inferiores e superiores utilizados na análise, são gravados na pasta "Fatores" (figura 72). Desta forma, todas as informações da análise de sensibilidade estão reunidas numa mesma planilha. Esta estrutura de gravação de resultados para a análise de sensibilidade está disponível para todos os modelos padrões.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Níveis dos fatores									
2										
3				Nível inferior (-1)				Nível superior (+1)		
4					Variável				Variável	
5		Descrição	Constante	Mínimo	Moda	Máximo	Constante	Mínimo	Moda	Máximo
6	FATOR 1	Pol da cana	14				18			
7	FATOR 2	Fibra da cana	11				15			
8	FATOR 3	Fibra do bagaço	45				55			
9	FATOR 4	Índice de extração	95				97,5			
10										

FIGURA 72 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Usina

A forma de interação e os procedimentos utilizados na relação do usuário com o ambiente de simulação são os mesmos para todos os modelos padrões. Assim, a descrição dos exemplos seguintes enfoca a análise dos resultados dos experimentos, e considera que os detalhes da interação entre o usuário e o ambiente de simulação são os mesmos descritos até o momento, neste item.

5.6.2. Exemplo do 2° nível: Agrícola

No modelo padrão Agrícola (figura 73), o objetivo é analisar o sistema de transporte, fundamental para o alcance do objetivo do setor agrícola de fornecer a quantidade necessária de cana no tempo adequado.

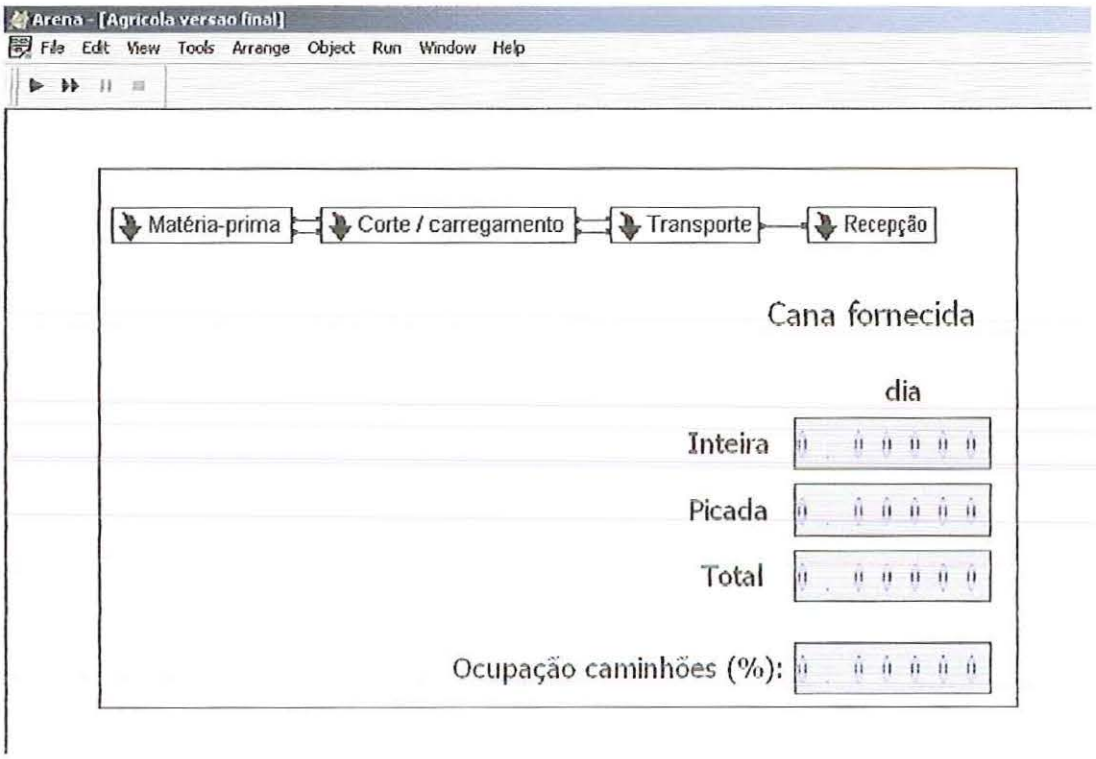

FIGURA 73 – Modelo padrão Agrícola

Para isso, são observadas as seguintes medidas de desempenho:

- Média diária de cana inteira fornecida;
- Média diária de cana picada fornecida;
- Média diária de cana total fornecida;
- Taxa de ocupação das unidades de transporte.

Análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

Dentro da mesma seqüência de análises desenvolvidas no item anterior, a primeira análise que pode ser realizada é a análise de desempenho "manual".

Ao iniciar a análise, a primeira tela de configuração de dados é a que está representada na figura 74.

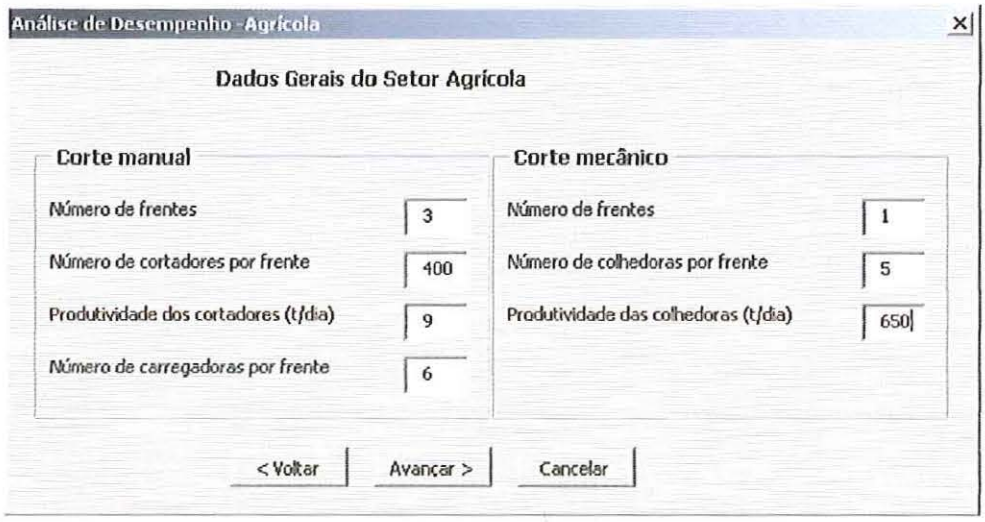

FIGURA 74 – Configuração de dados gerais do modelo Agrícola

No exemplo, a usina possui 3 frentes de corte manual e 1 frente de corte mecânico.

São os dados gerais sobre:

- frentes de corte manuais: número de frentes, quantidade de cortadores, produtividade dos cortadores e número de carregadoras;
- frentes de corte mecânico: número de frentes, número de colhedoras, produtividade das colhedoras.

Após o preenchimento dos dados, o usuário aciona o botão "**Avançar >**" e encontra a segunda tela de configuração do modelo (figura 75).

Nesta tela são configurados os parâmetros relativos aos:

- tipos de carregamento utilizados no sistema de carregamento;
- tipos e quantidades de unidades de transporte utilizados no sistema de transporte.

Neste exemplo, a usina utiliza o sistema de reboque no carregamento do corte manual, com 27 treminhões. Para o corte mecânico, utiliza-se o sistema de transbordo com 8 treminhões.

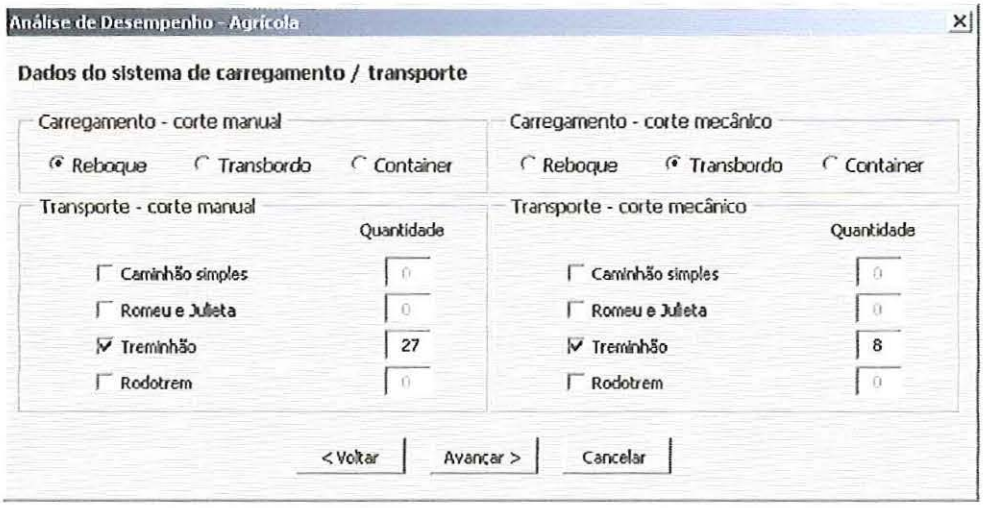

FIGURA 75 – Configuração dos sistemas de carregamento e transporte do modelo Agrícola

Na seqüência, tem-se a terceira tela de configuração do modelo, representada na figura 76.

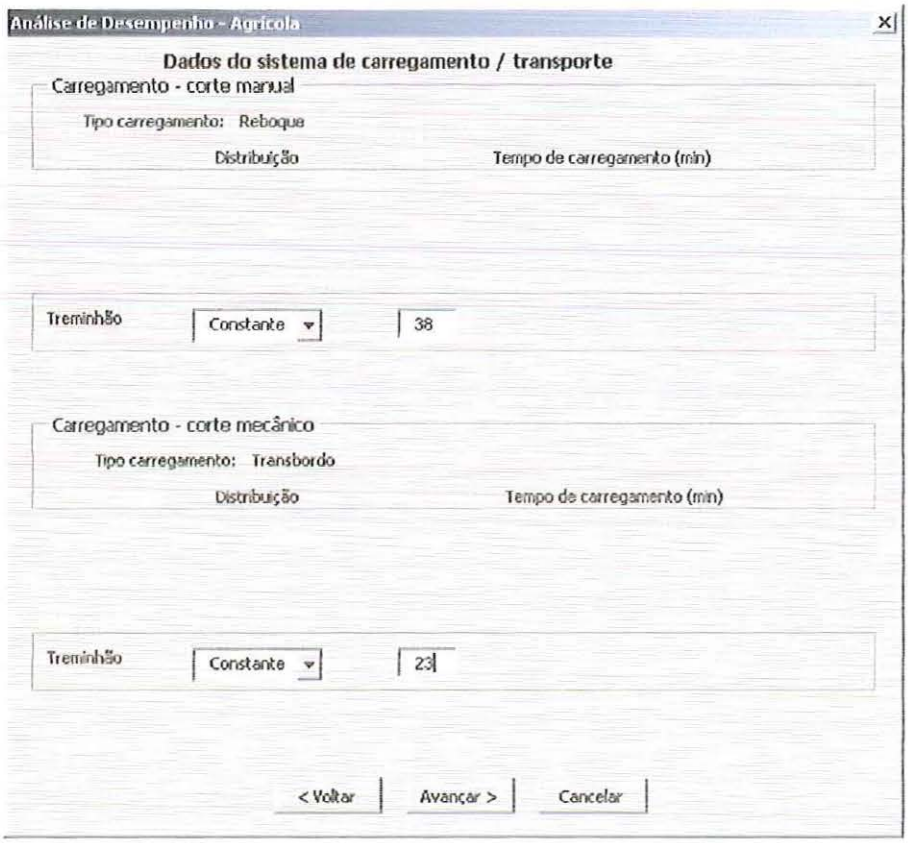

FIGURA 76 – Configuração dos tempos de carregamento do modelo padrão Agrícola

Esta tela solicita os dados sobre:

- tempos de carregamento para cada tipo de unidade de transporte, nas frentes de corte manual;
- tempos de carregamento para cada tipo de unidade de transporte, nas frentes de corte mecânico.

Finalmente, a quarta e última tela de configuração do modelo (figura 77) solicita os dados sobre:

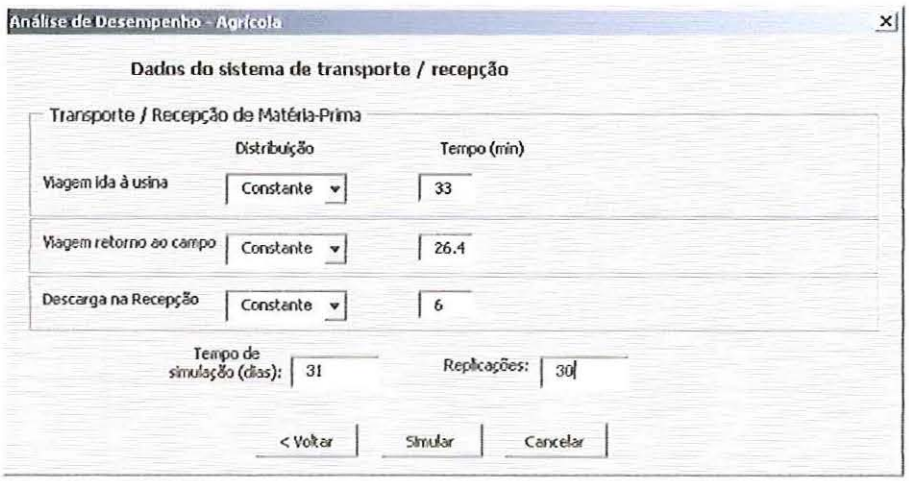

FIGURA 77 – Configuração dos tempos de transporte e descarregamento do modelo Agrícola

- tempos de viagem das unidades de transporte até a usina;
- tempos de viagem das unidades de transporte de volta ao campo;
- tempos de descarregamento da carga na recepção de matéria-prima.

Nesta mesma tela, o usuário define o tempo de simulação e o número de replicações. Neste exemplo, o horizonte de tempo de simulação foi de 31 dias e o número de replicações foi de 30.

A princípio, não seriam necessárias tantas replicações neste exemplo, uma vez que todos os dados são constantes. Porém, o modelo traz um aspecto de aleatoriedade em relação à carga transportada pelas unidades de transporte. Cada tipo de unidade possui capacidades de carga diferentes, e a carga efetivamente transportada em cada viagem sofre variações.

Estas variações estão consideradas no modelo, na forma de distribuições triangulares em torno do valor nominal da capacidade de carga de cada tipo de unidade de transporte. A distribuição triangular foi escolhida em função de serem conhecidos os limites inferiores e superiores de carga de cada tipo de unidade de transporte, e em função de que

ela é recomendada para quando não se possui uma quantidade adequada de dados, como é o caso deste exemplo. Caso haja disponibilidade de uma quantidade adequada de dados, pode-se ajustar outro tipo de distribuição à capacidade de carga das unidades de transporte, antes da utilização do modelo.

Desta forma, é adequada a execução de um certo número de replicações para ser observar o comportamento do modelo sob esta condição de aleatoriedade na carga efetiva transportada por viagem.

Este aspecto de aleatoriedade do modelo pode ser observado na figura 78, que apresenta os resultados da primeira análise de desempenho "manual".

	A	B	C	D
1	Análise de desempenho			
2	Cana inteira (t)	Cana picada (t)	Cana total (t)	Ocupação dos caminhões (%)
3	8089	2453	10541	70,40
4	8088	2449	10537	70,56
5	8093	2454	10547	70,81
6	8092	2453	10545	70,52
7	8086	2454	10540	70,89
8	8089	2451	10541	70,77
9	8088	2452	10539	70,21
10	8092	2453	10546	70,64
11	8092	2451	10543	70,52
12	8090	2453	10543	70,85
13	8092	2450	10543	70,33
14	8090	2453	10542	70,65
15	8090	2449	10539	70,41
16	8088	2451	10540	70,68
17	8087	2453	10540	70,63
18	8085	2451	10537	70,85
19	8088	2452	10540	70,84
20	8092	2450	10542	70,57
21	8088	2454	10542	70,61
22	8093	2452	10544	71,27
23	8089	2453	10541	70,33
24	8089	2451	10541	70,58
25	8089	2455	10544	70,78
26	8092	2453	10545	70,74
27	8087	2454	10541	70,71
28	8085	2454	10539	70,41
29	8089	2454	10543	70,83
30	8090	2453	10542	70,55
31	8092	2454	10546	70,61
32	8089	2451	10540	70,44
33				
34				
35	8089	2452	10542	70,63

FIGURA 78 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

Nesta figura, os valores de cada linha representam os valores médios diários de fornecimento de cana, além da taxa de ocupação das unidades de transporte. Ao final do relatório, o ambiente de simulação calcula a média dos resultados diários para cada medida de desempenho.

Conforme explicado no exemplo anterior, os dados de entrada para a execução da análise estão na mesma planilha, na pasta "Dados" (figura 79).

A comparação dos resultados da simulação com os do sistema real está apresentada na tabela 15. Observa-se, nesta tabela, que as diferenças mantiveram-se abaixo da ordem de 2%.

	A	B	C
1	ANALISE DE DESEMPENHO		
2	Descrição		
3			
4	Número de frentes de corte manual	3	
5	Número de cortadores por frente	400	
6	Produtividade dos cortadores (t/dia)	9	
7	Número de carregadoras por frente	6	
8	Número de frentes de corte mecânico	1	
9	Número de colhedoras por frente	5	
10	Produtividade das colhedoras (t/dia)	650	
11			
12	Sistema de carregamento para corte manual	Reboque	
13	Sistema de carregamento para corte mecânico	Transbordo	
14			
15	Número de caminhões simples para corte manual	0	
16	Número de Romeu e Julieta para corte manual	0	
17	Número de treminhões para corte manual	27	
18	Número de rodotrens para corte manual	0	
19			
20	Número de caminhões simples para corte mecânico	0	
21	Número de Romeu e Julieta para corte mecânico	0	
22	Número de treminhões para corte mecânico	8	
23	Número de rodotrens para corte mecânico	0	
24			
25	Tempo de carregamento de caminhão simples no corte manual (min)	Constante	0
26	Tempo de carregamento de Romeu e Julieta no corte manual (min)	Constante	0
27	Tempo de carregamento de treminhão no corte manual (min)	Constante	38
28	Tempo de carregamento de rodotrem no corte manual (min)	Constante	0
29	Tempo de carregamento de caminhão simples no corte mecânico (mi	Constante	0
30	Tempo de carregamento de Romeu e Julieta no corte mecânico (min)	Constante	0
31	Tempo de carregamento de treminhão no corte mecânico (min)	Constante	22
32	Tempo de carregamento de rodotrem no corte mecânico (min)	Constante	0
33			
34	Tempo de transporte até a usina (min)	Constante	33
35	Tempo de retorno ao campo (min)	Constante	26,4
36	Tempo de descarga na recepção (min)	Constante	6

FIGURA 79 – Dados de entrada para a 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

TABELA 15 – Análise dos resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Média diária de cana inteira fornecida (t)	8.089	7.941	1,86
Média diária de cana picada fornecida (t)	2.452	2.480	1,12
Média diária de cana total fornecida (t)	10.542	10.421	1,16
Taxa de ocupação das unidades de transporte (%)	70,63	70,00	0,90

O nível de precisão de 2%, neste modelo, pode ser explicado pelo fato de que os dados relativos aos tempos de carregamento foram estimados.

A usina possui conjuntos de dados de tempo de diversos processos e atividades no carregamento de cana. Porém, não possui dados sobre os tempos de espera em filas (por exemplo, de unidades de transporte aguardando para serem carregadas). Assim, existe uma estimativa média do tempo total consumido pela unidade de transporte entre a sua chegada na frente de corte e a sua partida em direção à usina. Mas esta estimativa sofre influência de alguns fatores, especialmente o tempo de espera na fila.

Outro parâmetro estimado é o tempo de transporte. Existe uma estimativa de tempo gasto nas viagens de ida até a usina e de retorno ao campo, que é calculada em função do número de viagens realizadas pela unidade de transporte e o seu tempo disponível de trabalho. Esta estimativa pode ser afetada por fatores como: tempos de parada da unidade de transporte, velocidade de deslocamento.

A seguir, a título de teste, realizou-se uma segunda análise de desempenho "manual", utilizando-se valores probabilísticos para os tempos de carregamento, transporte e descarregamento. Os resultados desta segunda análise de desempenho "manual" estão na figura 80.

	A	B	C	D
1	Análise de desempenho			
2	Cana inteira (t)	Cana picada (t)	Cana total (t)	Ocupação dos caminhões (%)
3	8342	2427	10770	70,03
4	8582	2317	10900	72,49
5	8581	2555	11135	72,29
6	8317	2180	10496	71,21
7	8040	2242	10282	69,72
8	8347	2290	10637	71,40
9	8627	2262	10889	73,39
10	8354	2501	10855	71,35
11	8041	2216	10257	68,76
12	8317	2409	10726	70,76
13	8583	2285	10868	70,98
14	8086	2407	10493	71,84
15	8314	2378	10692	69,96
16	8572	2409	10981	71,78
17	8043	2491	10534	70,24
18	8587	2371	10959	71,54
19	8047	2426	10473	70,46
20	8068	2447	10515	71,67
21	8575	2462	11037	72,30
22	8312	2447	10760	70,40
23	8068	2379	10447	70,10
24	8065	2366	10431	69,51
25	8601	2397	10998	72,25
26	8089	2402	10491	70,15
27	8336	2381	10717	70,68
28	8045	2207	10251	69,09
29	8576	2464	11040	71,81
30	8312	2342	10653	70,29
31	8582	2334	10916	71,40
32	8045	2519	10564	68,97
33				
34				
35	8315	2377	10692	70,89
36				

FIGURA 80 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

A segunda análise foi realizada com o intuito de analisar a possibilidade de propagação de erros em função da utilização das distribuições estatísticas, fato comentado no exemplo anterior. Neste exemplo, foram utilizadas distribuições triangulares.

Na falta de um conjunto de dados sobre os tempos de carregamento e de transporte, foram utilizados, como valores mínimos, modas e máximos para as distribuições triangulares, valores em torno das médias estimadas na análise anterior. Os dados utilizados encontram-se na figura 81.

	A	B	C	D	E
1	ANALISE DE DESEMPENHO				
2	Descrição				
3					
4	Número de frentes de corte manual	3			
5	Número de cortadores por frente	400			
6	Produtividade dos cortadores (t/dia)	9			
7	Número de carregadoras por frente	6			
8	Número de frentes de corte mecânico	1			
9	Número de colhedoras por frente	5			
10	Produtividade das colhedoras (t/dia)	650			
11					
12	Sistema de carregamento para corte manual	Reboque			
13	Sistema de carregamento para corte mecânico	Transbordo			
14					
15	Número de caminhões simples para corte manual	0			
16	Número de Romeu e Julieta para corte manual	0			
17	Número de treminhões para corte manual	27			
18	Número de rodotrens para corte manual	0			
19					
20	Número de caminhões simples para corte mecânico	0			
21	Número de Romeu e Julieta para corte mecânico	0			
22	Número de treminhões para corte mecânico	8			
23	Número de rodotrens para corte mecânico	0			
24					
25	Tempo de carregamento de caminhão simples no corte manual (min)	Constante	0		
26	Tempo de carregamento de Romeu e Julieta no corte manual (min)	Constante	0		
27	Tempo de carregamento de treminhão no corte manual (min)	Triangular	35	38	40
28	Tempo de carregamento de rodotrem no corte manual (min)	Constante	0		
29	Tempo de carregamento de caminhão simples no corte mecânico (min)	Constante	0		
30	Tempo de carregamento de Romeu e Julieta no corte mecânico (min)	Constante	0		
31	Tempo de carregamento de treminhão no corte mecânico (min)	Triangular	21	22	25
32	Tempo de carregamento de rodotrem no corte mecânico (min)	Constante	0		
33					
34	Tempo de transporte até a usina (min)	Triangular	30	33	36
35	Tempo de retorno ao campo (min)	Triangular	25	26,4	28
36	Tempo de descarga na recepção (min)	Triangular	5	6	7

FIGURA 81 – Dados de entrada para a 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

Analisando a tabela 16, que apresenta uma comparação entre os resultados da segunda análise de desempenho "manual" com os do sistema real, observa-se que houve um aumento nas diferenças em relação à análise anterior, para mais de 4%.

As duas análises de desempenho descritas acima comprovam que a utilização de distribuições estatísticas para a geração de valores probabilísticos pode ocasionar aumentos nas diferenças entre resultados simulados e reais por causa de possíveis propagações de erros em função dos erros de ajuste distribuições estatísticas aos conjuntos de dados, conforme foi comentado no exemplo anterior.

Neste modelo, esta propagação de erros pode ter se somado à utilização de dados estimados sobre os tempos de carregamento e transporte.

TABELA 16 – Análise dos resultados da segunda análise de desempenho "manual" do modelo Agrícola

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Média diária de cana inteira fornecida (t)	8.315	7.941	4,71
Média diária de cana picada fornecida (t)	2.377	2.480	-4,15
Média diária de cana total fornecida (t)	10.692	10.421	2,60
Taxa de ocupação das unidades de transporte (%)	70,89	70,00	1,27

Análise de desempenho "arquivo" do modelo Usina

A falta de dados mais precisos sobre os tempos de carregamento e de transporte afetou também a análise de desempenho com entrada de dados por meio de leitura de arquivo. Neste caso, foi realizada, a título de teste, uma análise de desempenho com dados de entrada lidos de um arquivo cujos valores foram gerados aleatoriamente pela função "Aleatório" do Excel®, em torno dos valores médios da primeira análise de desempenho com entrada manual de dados.

Os resultados desta análise estão na figura 82 e os dados de entrada estão na figura 83.

	A	B	C	D
1	Análise de desempenho			
2	Cana inteira (t)	Cana picada (t)	Cana total (t)	Ocupação dos caminhões (%)
3	7748	2294	10042	72,80
4	7918	2382	10300	73,44
5	7965	2405	10370	71,86
6	7996	2417	10413	71,23
7	8004	2402	10406	70,62
8	8012	2394	10407	70,44
9	7995	2376	10371	70,34
10	8002	2390	10392	70,52
11	8040	2401	10441	70,58
12	8073	2400	10473	70,37
13	8109	2398	10507	70,50
14	8124	2382	10506	70,54
15	8140	2374	10514	70,84
16	8136	2379	10515	70,73
17	8116	2374	10490	70,73
18	8112	2378	10490	70,59
19	8123	2381	10505	70,51
20	8137	2372	10509	70,57
21	8150	2380	10530	70,53
22	8172	2383	10555	70,56
23	8180	2388	10568	70,64
24	8177	2382	10559	70,72
25	8172	2371	10543	70,67
26	8176	2367	10543	70,66
27	8174	2371	10545	70,60
28	8166	2373	10539	70,54
29	8168	2373	10541	70,60
30	8163	2373	10537	70,54
31	8172	2376	10548	70,66
32	8172	2379	10551	70,64
33	8168	2378	10546	70,56
34				
35				
36	8095	2381	10476	70,81

FIGURA 82 – Resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo padrão Agrícola

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	AGRICOLA											
2	DADOS DE ENTRADA - ANÁLISE DE DESEMPENHO											
3		Tempos - Corte manual (min)				Tempos - Corte mecânico (min)				Tempos transporte (min)		
4	N.	Carreg. caminhão simples	Carreg. Romeu e Julieta	Carreg. Treminhão	Carreg. Rodotrem	Carreg. caminhão simples	Carreg. Romeu e Julieta	Carreg. Treminhão	Carreg. Rodotrem	Viagem até usina	Retorno ao campo	Descarga na recepção
5	1	0,00	0,00	37,0	0,00	0,00	0,00	23,8	0,00	32,4	25,9	5,75
6	2	0,00	0,00	40,0	0,00	0,00	0,00	23,9	0,00	33,0	27,4	6,23
7	3	0,00	0,00	39,6	0,00	0,00	0,00	21,9	0,00	34,1	26,1	5,80
8	4	0,00	0,00	36,0	0,00	0,00	0,00	23,0	0,00	30,9	26,7	6,86
9	5	0,00	0,00	39,5	0,00	0,00	0,00	23,6	0,00	33,9	25,2	5,86
10	6	0,00	0,00	39,0	0,00	0,00	0,00	22,4	0,00	34,1	25,5	6,20
11	7	0,00	0,00	36,8	0,00	0,00	0,00	21,4	0,00	30,2	25,6	5,09
12	8	0,00	0,00	38,6	0,00	0,00	0,00	22,7	0,00	35,2	27,1	5,75
13	9	0,00	0,00	36,1	0,00	0,00	0,00	23,2	0,00	33,0	25,7	5,74
14	10	0,00	0,00	37,5	0,00	0,00	0,00	21,1	0,00	33,7	25,0	5,11
15	11	0,00	0,00	38,5	0,00	0,00	0,00	21,9	0,00	30,8	26,0	5,47
16	12	0,00	0,00	36,4	0,00	0,00	0,00	22,4	0,00	31,1	25,3	5,94
17	13	0,00	0,00	38,3	0,00	0,00	0,00	23,7	0,00	30,5	26,9	6,23
18	14	0,00	0,00	37,0	0,00	0,00	0,00	22,7	0,00	35,4	27,1	5,76
19	15	0,00	0,00	36,2	0,00	0,00	0,00	23,6	0,00	34,8	25,3	6,33
20	16	0,00	0,00	39,3	0,00	0,00	0,00	22,2	0,00	34,9	27,0	5,99
21	17	0,00	0,00	39,3	0,00	0,00	0,00	22,2	0,00	32,1	27,8	6,81
22	18	0,00	0,00	36,8	0,00	0,00	0,00	24,2	0,00	33,9	27,6	6,85
23	19	0,00	0,00	38,3	0,00	0,00	0,00	24,1	0,00	33,0	25,3	6,11
24	20	0,00	0,00	37,4	0,00	0,00	0,00	23,4	0,00	34,9	25,2	6,81
25	21	0,00	0,00	38,4	0,00	0,00	0,00	21,6	0,00	32,5	27,8	5,47
26	22	0,00	0,00	39,6	0,00	0,00	0,00	22,1	0,00	34,1	27,6	5,97
27	23	0,00	0,00	38,9	0,00	0,00	0,00	21,5	0,00	33,7	27,1	5,23
28	24	0,00	0,00	36,1	0,00	0,00	0,00	21,4	0,00	33,6	27,8	5,01
29	25	0,00	0,00	39,9	0,00	0,00	0,00	24,1	0,00	35,1	26,9	5,69
30	26	0,00	0,00	37,4	0,00	0,00	0,00	23,0	0,00	34,3	25,6	5,46
31	27	0,00	0,00	38,0	0,00	0,00	0,00	23,3	0,00	30,2	26,8	5,80

FIGURA 83 – Dados de entrada para a análise de desempenho "arquivo" do modelo padrão Agrícola

A tabela 17 apresenta a comparação entre os resultados da simulação e os do sistema real. Pode-se notar que, no geral, esta simulação apresentou menores diferenças que a segunda análise de desempenho com entrada manual. Somente o fornecimento de cana picada apresentou uma diferença mais expressiva, na ordem de 4,00%.

TABELA 17 – Análise de resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Agrícola

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Média diária de cana inteira fornecida (t)	8.095	7.941	1,94
Média diária de cana picada fornecida (t)	2.381	2.480	-4,00
Média diária de cana total fornecida (t)	10.476	10.421	0,53
Taxa de ocupação das unidades de transporte (%)	70,81	70,00	1,16

Isto pode ser explicado pela possibilidade de propagação de erro por causa do erro de ajuste da distribuição triangular aos dados relativos ao tempo de carregamento dos treminhões no corte mecânico, que afeta diretamente o fornecimento de cana picada. A propagação não ocorreu na geração dos valores para os demais parâmetros que influenciam de forma direta os outros resultados.

Análise de sensibilidade do modelo Agrícola

Finalmente, concluindo os testes do modelo padrão Agrícola, realizou-se a análise de sensibilidade.

Os fatores analisados foram:

- tempo de carregamento da unidade de transporte no corte manual;
- tempo de carregamento da unidade de transporte no corte mecânico;
- tempo de viagem da unidade de transporte até a usina;
- tempo de retorno da unidade de transporte ao campo.

Para este exemplo, a resposta de interesse escolhida foi a quantidade de cana total fornecida.

A tela de configuração para esta análise está na figura 84, que mostra os valores inferiores e superiores para cada fator, e a resposta escolhida.

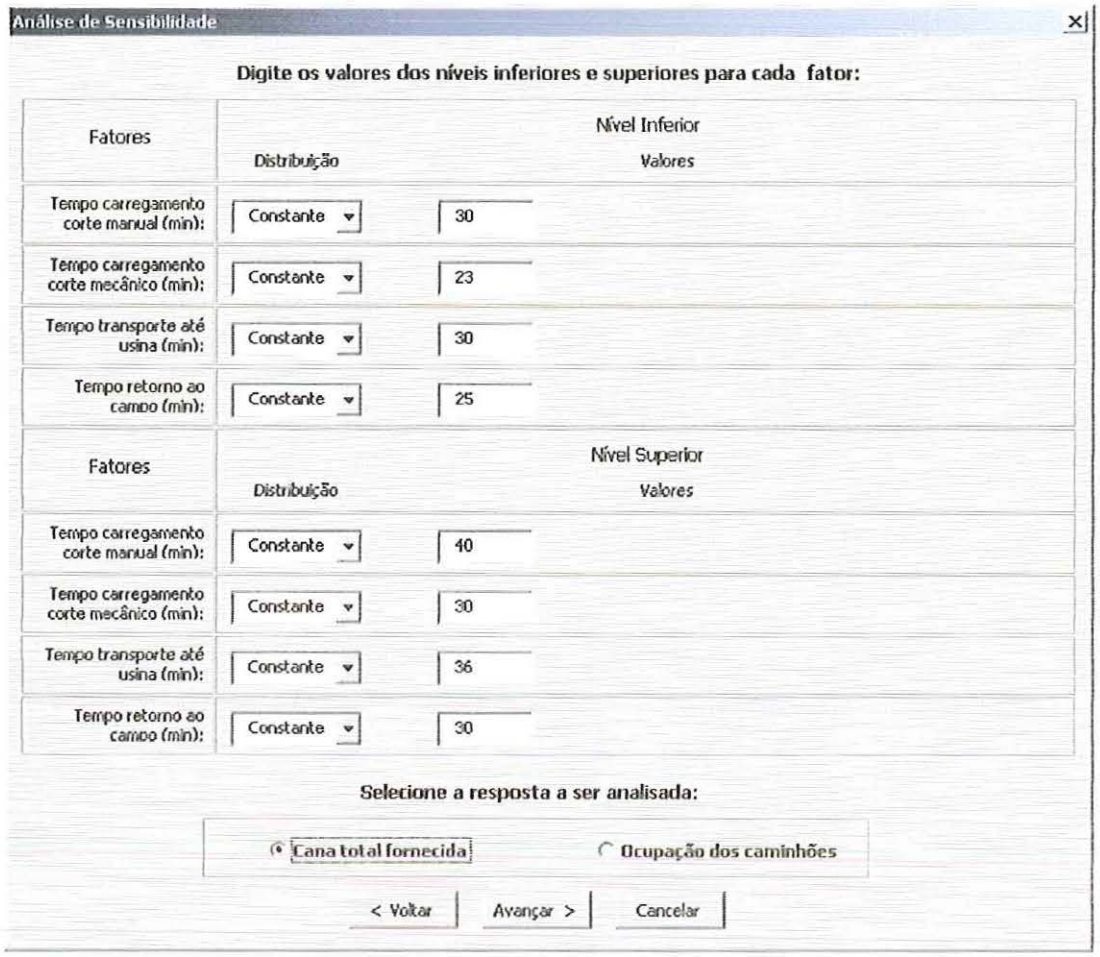

FIGURA 84 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo padrão Agrícola

Após a execução do modelo, o ambiente de simulação apresentou os resultados conforme a figura 85.

Da figura 85, nota-se que são significativos:

- o efeito principal do tempo de carregamento da unidade de transporte no corte manual, e
- o efeito principal do tempo de transporte da unidade de transporte até a usina.

	A	B	C	D	E	F	G
1	ANALISE DE SENSIBILIDADE - Significância dos fatores						
2							
3	Nível de significância 5%						
4							
5	Efeitos principais e de interação					Efeito	
6	E1	Tempo carreg. corte man. (min)				Significativo	Ver análise abaixo
7	E2	Tempo carreg. corte mec. (min)				Significativo	Ver análise abaixo.
8	E3	Tempo transp. até usina (min)				Não significativo	
9	E4	Tempo retorno ao campo (min)				Não significativo	
10	E12	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo carreg. corte mec. (min)			Não significativo	
11	E13	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo transp. até usina (min)			Não significativo	
12	E14	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo retorno ao campo (min)			Não significativo	
13	E23	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo transp. até usina (min)			Não significativo	
14	E24	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo retorno ao campo (min)			Não significativo	
15	E34	Tempo transp. até usina (min)	Tempo retorno ao campo (min)			Não significativo	
16	E123	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo transp. até usina (min)		Não significativo	
17	E124	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo retorno ao campo (min)		Não significativo	
18	E134	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo transp. até usina (min)	Tempo retorno ao campo (min)		Não significativo	
19	E234	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo transp. até usina (min)	Tempo retorno ao campo (min)		Não significativo	
20	E1234	Tempo carreg. corte man. (min)	Tempo carreg. corte mec. (min)	Tempo transp. até usina (min)	Tempo retorno ao campo (min)	Não significativo	
21							

FIGURA 85 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Agrícola

A figura 86 apresenta a análise quantitativa dos efeitos principais significativos. Assim, o aumento do tempo de carregamento no corte manual de 30 para 40 minutos, provoca uma diminuição no fornecimento total de cana da ordem de, no máximo, 12,97%.

22	EFEITOS PRINCIPAIS	
23	E1	Cana total fornecida
24	Inferior	11314,69
25	Superior	9846,76
26	Variação máxima (%)	-12,97
27	E2	Cana total fornecida
28	Inferior	10854,46
29	Superior	10306,99
30	Variação máxima (%)	-5,04
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		

FIGURA 86 – Análise quantitativa dos efeitos significativos na análise de sensibilidade do modelo Agrícola

O aumento do tempo de transporte até a usina de 23 para 30 minutos, provoca uma diminuição no fornecimento de cana da ordem de, no máximo, 5,04%.

As figuras 87 e 88 apresentam, respectivamente, os resultados das replicações e os valores inferiores e superiores da cada fator na análise de sensibilidade.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Resultados dos experimentos

Legenda: -1 Nível inferior
+1 Nível superior

Fatores:
1 Tempo carreg. corte man. (min)
2 Tempo carreg. corte mec. (min)
3 Tempo transp. até usina (min)
4 Tempo retorno ao campo (min)

					Cana total fornecida	
					Replicações	
Experimento	1	2	3	4	1	2
1	-1	-1	-1	-1	11589,14	11587,85
2	1	-1	-1	-1	10121,39	10126,00
3	-1	1	-1	-1	11044,68	11039,75
4	1	1	-1	-1	9567,14	9575,27
5	-1	-1	1	-1	11592,24	11586,82
6	1	-1	1	-1	10121,14	10118,35
7	-1	1	1	-1	11041,65	11042,07
8	1	1	1	-1	9572,21	9571,65
9	-1	-1	-1	1	11592,58	11585,17
10	1	-1	-1	1	10123,85	10122,61
11	-1	1	-1	1	11041,04	11042,85
12	1	1	-1	1	9572,34	9574,90
13	-1	-1	1	1	11579,95	11586,35
14	1	-1	1	1	10120,46	10117,49
15	-1	1	1	1	11040,39	11042,55
16	1	1	1	1	9575,23	9568,15

FIGURA 87 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Agrícola

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Níveis dos fatores

	Descrição		Nível inferior (-1) Valores		Nível superior (+1) Valores
FATOR 1	Tempo carreg. corte man. (min)	Constante	30	Constante	40
FATOR 2	Tempo carreg. corte mec. (min)	Constante	23	Constante	30
FATOR 3	Tempo transp. até usina (min)	Constante	30	Constante	36
FATOR 4	Tempo retorno ao campo (min)	Constante	25	Constante	30

FIGURA 88 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Agrícola

5.6.3. Exemplo do 3º nível: Extração

O exemplo do 3º nível de modelos padrões a ser apresentado é do modelo padrão Extração, representado na figura 89. O objetivo deste modelo é analisar o comportamento do sistema de extração em relação à sua eficiência no compromisso entre alta capacidade de moagem, elevada extração e geração de bagaço em condições adequadas para a geração de vapor.

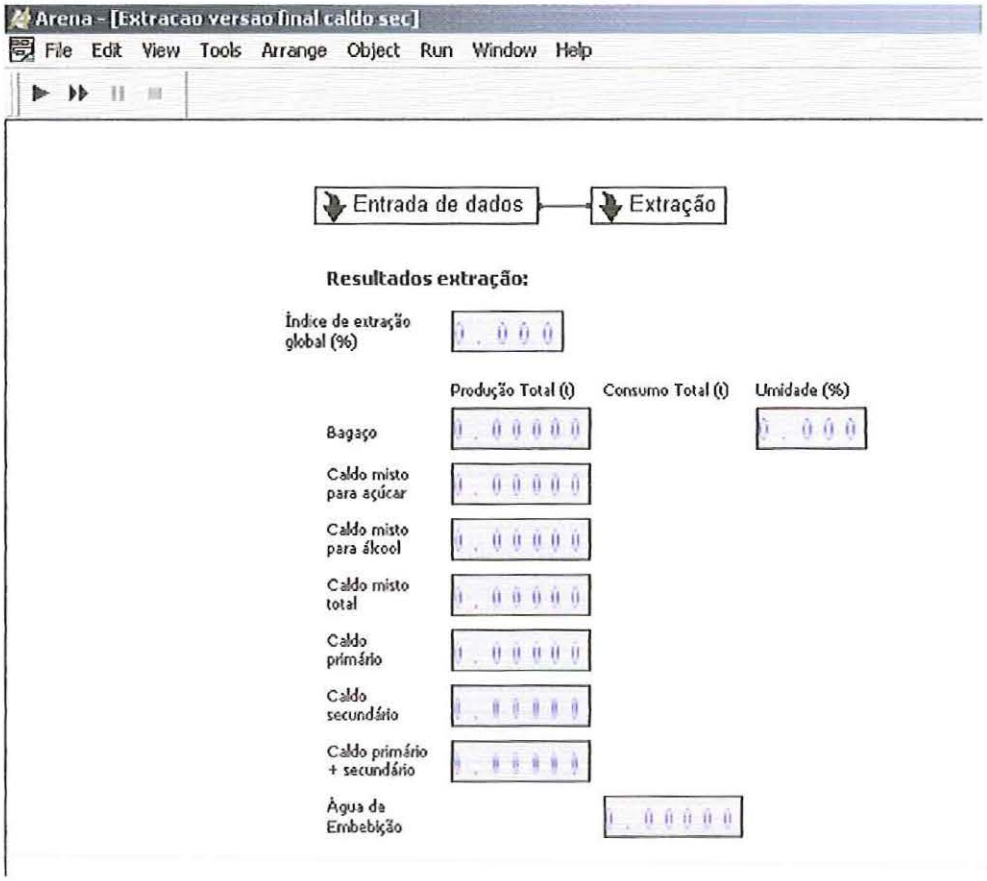

FIGURA 89 – Modelo padrão Extração

Para isso, são observadas as seguintes medidas de desempenho:

- Índice de extração;
- Produção de bagaço;
- Umidade do bagaço;
- Produção de caldo misto (quando não há separação de caldos);
- Produção de caldo primário (quando há separação de caldos);
- Produção de caldo secundário (quando há separação de caldos);
- Produção de caldo total (quando há separação de caldos);
- Consumo de água de embebição.

Análise de desempenho "manual" do modelo Extração

A primeira análise realizada foi a análise de desempenho "manual". A primeira tela de configuração está representada na figura 90, que solicita a escolha do tipo de extração e se há separação de caldos (no caso do sistema de moagem).

No exemplo, a usina utiliza a moagem e a separação de caldos.

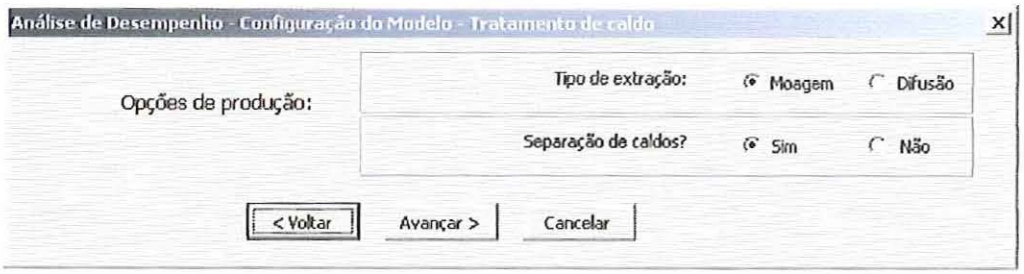

FIGURA 90 – Configuração inicial do modelo Extração

A segunda tela de configuração para o modelo Extração depende da escolha do tipo de extração. Para a opção de moagem, as variáveis a serem configuradas estão representadas na figura 91.

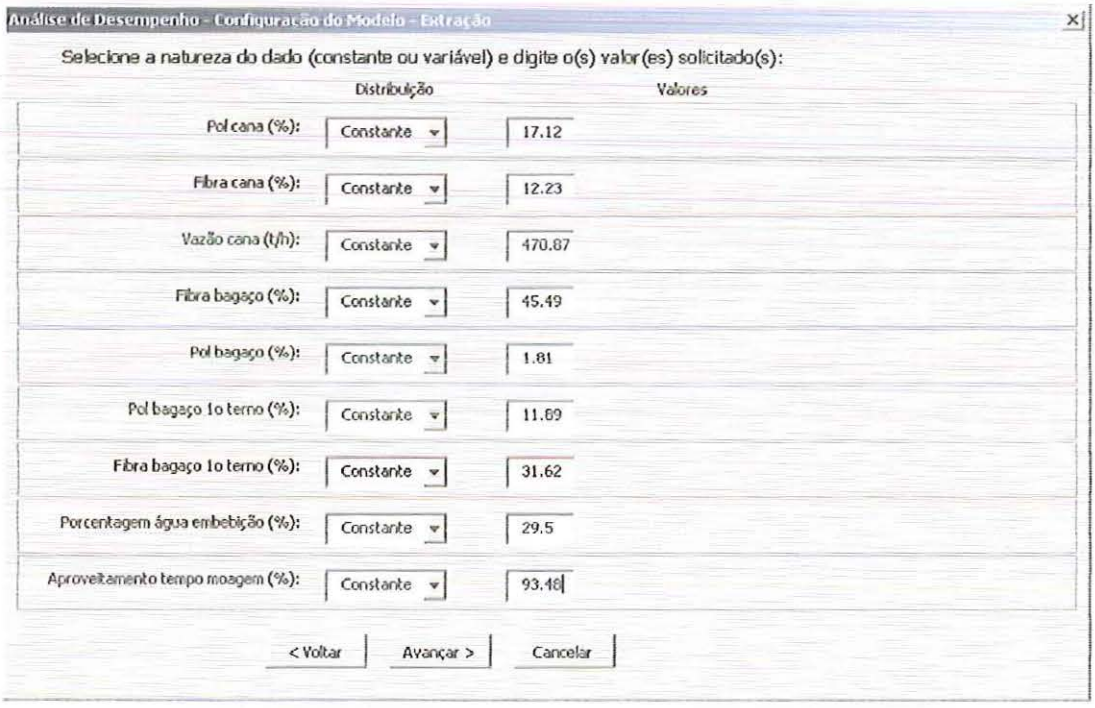

FIGURA 91 – Configuração para opção de moagem do modelo Extração

A seguir, a terceira tela de configuração depende da escolha de separação de caldos. Para o sistema de extração com separação de caldos, como é o exemplo, as variáveis a serem configuradas estão na figura 92.

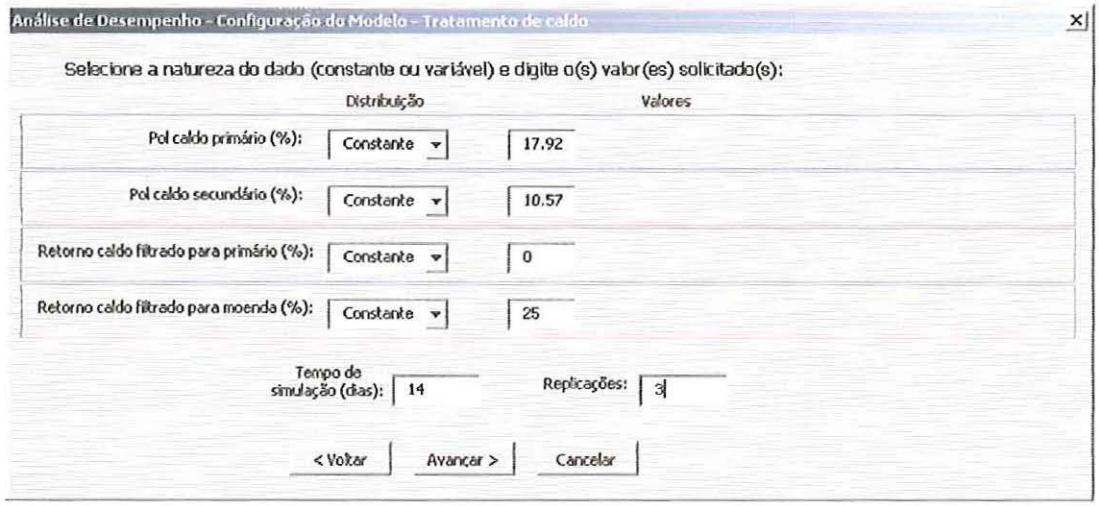

FIGURA 92 – Configuração para opção de separação de caldos do modelo Extração

Após as configurações, o ambiente de simulação executa a corrida do modelo. Os resultados da primeira análise de desempenho "manual" estão na figura 93, e os dados de entrada estão relacionados na figura 94.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Análise de desempenho						
2	Índice Extração (%)	Produção bagaço (t)	Umidade bagaço (%)	Produção caldo primário (t)	Produção caldo secundário (t)	Produção caldo total (t)	Consumo água embebição (t)
3	97,15	39760	52,70	103334	102169	205503	43627
4	97,15	39760	52,70	103334	102169	205503	43627
5	97,15	39760	52,70	103334	102169	205503	43627
6							
7							
8	97,15	39760	52,70	103334	102169	205503	43627

FIGURA 93 – Resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

	A	B	C	D	E
1	ANÁLISE DE DESEMPENHO				
2	Descrição				
3					
4	Pol cana (%):	17,12			
5	Fibra cana (%):	12,23			
6	Vazão cana (t/h):	470,87			
7	Fibra bagaço (%):	45,49			
8	Pol bagaço (%):	1,81			
9	Pol bagaço 1o terno (%):	11,89			
10	Fibra bagaço 1o terno (%):	31,62			
11	Porcentagem água embebição (%):	29,5			
12	Aproveitamento tempo moagem (%):	93,48			
13					
14	Pol caldo primário (%):	17,92			
15	Pol caldo secundário (%):	10,57			
16	Retorno caldo filtrado para primário (%):	0			
17	Retorno caldo filtrado para moenda (%):	25			

FIGURA 94 – Dados de entrada da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

A tabela 18 apresenta a comparação entre os resultados da simulação e os do sistema real. Observa-se que o resultado relativo à produção de caldo primário, apresentou diferença de mais de 7%, influenciando a diferença relativa à produção de caldo total, que atingiu 4,38%.

TABELA 18 – Análise de resultados da 1ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Índice de extração (%)	97,15	97,20	0,05
Produção de bagaço (t)	39.760	39.928	0,42
Umidade do bagaço (%)	52,70	52,17	1,01
Produção de caldo primário (t)	103.334	111.202	7,07
Produção de caldo secundário (t)	102.169	103.718	1,49
Produção de caldo total (t)	205.503	214.920	4,38
Consumo de água de embebição (t)	43.627	43.680	0,12

Esta diferença podem ser explicada por 2 fatos.

Em primeiro lugar, as variáveis "pol do bagaço do 1° terno" e "fibra do bagaço do 1° terno" possuem somente 4 dados, relativos a 31 dias de produção. Com isso, a média dos

dados, utilizada para a execução do modelo, pode não representar adequadamente os valores ocorridos destas variáveis no período da coleta.

Além disso, a variável "retorno de caldo filtrado para moenda" não é medida, sendo estimada e fixada, pela usina, no valor de 25%. Também neste caso, este valor pode não representar o conjunto de valores ocorridos no período.

Para testar a possível influência destas variáveis nos resultados, realizou-se uma segunda análise de desempenho "manual", alternando-se os valores para:

- pol do bagaço do 1° terno: de 11,85% para 10,85%, ou seja, diminuição de 1%;
- fibra do bagaço do 1° terno: de 32,21% para 33,71%, ou seja, aumento de 1,5%;
- retorno de caldo filtrado para moenda: de 25% para 26,5%, ou seja, aumento de 1,5%.

Os resultados da segunda análise de desempenho "manual" estão na figura 95 e os dados de entrada estão na figura 96.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Análise de desempenho						
2	Índice Extração (%)	Produção bagaço (t)	Umidade bagaço (%)	Produção caldo primário (t)	Produção caldo secundário (t)	Produção caldo total (t)	Consumo água embebição (t)
3	97,15	39760	52,70	108101	102621	210721	43627
4	97,15	39760	52,70	108101	102621	210721	43627
5	97,15	39760	52,70	108101	102621	210721	43627
6							
7							
8	97,15	39760	52,70	108101	102621	210721	43627
9							

FIGURA 95 – Resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

	A	B	C	D	E
1	ANÁLISE DE DESEMPENHO				
2	Descrição				
3					
4	Pol cana (%):	17,12			
5	Fibra cana (%):	12,23			
6	Vazão cana (t/h):	470,87			
7	Fibra bagaço (%):	45,49			
8	Pol bagaço (%):	1,81			
9	Pol bagaço 1o terno (%):	10,89			
10	Fibra bagaço 1o terno (%):	33,12			
11	Porcentagem água embebição (%):	29,5			
12	Aproveitamento tempo moagem (%):	93,48			
13					
14	Pol caldo primário (%):	17,92			
15	Pol caldo secundário (%):	10,57			
16	Retorno caldo filtrado para primário (%):	0			
17	Retorno caldo filtrado para moenda (%):	26,5			
18					

FIGURA 96 – Dados de entrada da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

A tabela 19 apresenta a comparação entre os resultados obtidos na simulação e os do sistema real, para a segunda análise de desempenho "manual". A diferença relativa à produção de caldo primário, como pode ser observado na tabela, diminuiu para menos de 2,8%, afetando a diferença relativa à produção de caldo total, que diminuiu para 1,95%. Além disso, a diferença relativa à produção de caldo secundário apresentou uma pequena alteração, passando de 1,49% para 1,06%.

TABELA 19 – Análise de resultados da 2ª análise de desempenho "manual" do modelo Extração

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Índice de extração (%)	97,15	97,20	0,05
Produção de bagaço (t)	39.760	39.928	0,42
Umidade do bagaço (%)	52,70	52,17	1,01
Produção de caldo primário (t)	108.101	111.202	2,79
Produção de caldo secundário (t)	102.621	103.718	1,06
Produção de caldo total (t)	210.721	214.920	1,95
Consumo de água de embebição (t)	43.627	43.680	0,12

Assim, em relação à primeira análise, as diferenças citadas acima sofreram uma diminuição da ordem de 4% na produção de caldo primário, de 0,5% na produção de caldo secundário e de 2,5% na produção de caldo total, para uma variação de 1% a 1,5% nas variáveis comentadas na primeira análise ("pol do bagaço do 1º terno", "fibra do bagaço do 1º terno" e "retorno de caldo filtrado para moenda"). Isto mostra a influência destas variáveis nos resultados de produção de caldo primário, secundário e total. Com isso, observa-se a necessidade de uma maior quantidade de dados para estas variáveis, para que o modelo possa apresentar resultados consistentes.

Análise de desempenho "arquivo" do modelo Extração

A seguir, realizou-se uma análise de desempenho "arquivo" para se avaliar os resultados obtidos na primeira análise de desempenho "manual".

5. METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DOS EXPERIMENTOS, MODELOS E INTERFACES PADRÕES

A análise foi realizada com os dados fornecidos pela usina, cujas médias das variáveis correspondem aos valores médios utilizados na primeira análise de desempenho "manual".

Os resultados desta análise de desempenho "arquivo" estão na figura 97, e o arquivo com os dados de entrada está representado na figura 98.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Análise de desempenho							
2	Indice Extração (%)	Produção bagaço (t)	Umidade bagaço (%)	Produção caldo primário (t)	Produção caldo secundário (t)	Produção caldo total (t)	Consumo água embebição (t)	
3	97,15	2851	52,69	7389	7333	14722	3126	
4	97,15	2880	52,72	7464	7396	14860	3149	
5	97,17	2883	52,68	7484	7412	14896	3154	
6	97,16	2851	52,71	7399	7324	14724	3120	
7	97,17	2846	52,70	7391	7309	14700	3113	
8	97,17	2848	52,70	7387	7311	14697	3115	
9	97,17	2845	52,70	7381	7307	14689	3114	
10	97,16	2854	52,68	7406	7329	14736	3124	
11	97,16	2856	52,67	7407	7338	14745	3130	
12	97,15	2858	52,71	7407	7329	14736	3125	
13	97,16	2845	52,69	7381	7307	14688	3113	
14	97,16	2873	52,70	7436	7376	14812	3141	
15	97,15	2860	52,72	7394	7328	14722	3119	
16	97,16	2853	52,74	7368	7309	14677	3114	
17								
18		40003		103696	102709	206405	43758	
19	97,16	2857	52,70	7407	7336	14743	3126	

FIGURA 97 – Resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Extração

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	USINA															
2	ANALISE DE DESEMPENHO - LEITURA DE DADOS															
3	Extração															
4	N	Pol cana (%)	Fibra cana (%)	Vazão cana (t/h)	Fibra bagaço (%)	Pol bagaço (%)	Pol bagaço to. Terno (%)	Fibra bagaço to Terno (%)	Água embebição (%)	Aproveitamento tempo moagem (%)	Caldo para açúcar (%)	Pol caldo misto (%)	Pol caldo primário (%)	Pol caldo secundário (%)	Caldo filt. (%)	Vazão caldo filt. p/moenda (%)
6	1	17,44	12,04	478,39	45,17	1,89	10,81	36,80	29,14	100,00	48,60	0,00	18,20	10,47	0,00	25,00
6	2	17,67	12,23	487,75	46,23	1,89	10,81	36,80	28,88	100,00	48,33	0,00	18,68	10,87	0,00	25,00
7	3	17,55	12,28	484,72	46,65	1,94	10,81	36,80	28,97	100,00	48,10	0,00	18,60	10,82	0,00	25,00
8	4	18,19	11,93	492,48	46,39	1,90	11,49	31,77	29,82	100,00	52,67	0,00	18,90	10,67	0,00	25,00
9	5	18,33	12,24	484,33	46,72	1,90	11,49	31,77	30,59	98,98	52,37	0,00	18,75	10,70	0,00	25,00
10	6	18,18	11,98	449,26	45,90	1,92	11,49	31,77	31,29	100,00	47,53	0,00	19,14	10,86	0,00	25,00
11	7	17,11	11,81	453,52	46,08	1,76	11,49	31,77	30,50	97,08	52,78	0,00	18,16	9,86	0,00	25,00
12	8	17,26	11,93	470,28	45,71	1,74	11,49	31,77	29,63	55,69	51,93	0,00	18,58	10,37	0,00	25,00
13	9	16,79	11,69	493,95	45,07	1,82	11,49	31,77	28,98	100,00	52,57	0,00	17,83	10,20	0,00	25,00
14	10	16,51	12,20	495,24	45,36	1,73	11,49	31,77	28,69	100,00	50,67	0,00	16,98	10,02	0,00	25,00
15	11	16,57	12,29	495,91	44,91	1,66	12,61	29,94	29,77	99,51	51,04	0,00	17,75	10,60	0,00	25,00
16	12	17,12	12,35	473,99	46,61	1,66	12,61	29,94	29,60	94,58	55,00	0,00	17,36	10,08	0,00	25,00
17	13	16,85	11,79	466,58	44,89	1,77	12,61	29,94	28,86	93,54	53,47	0,00	17,46	10,60	0,00	25,00
18	14	16,10	11,79	420,21	45,25	1,70	12,61	29,94	27,40	96,46	50,49	0,00	16,56	9,90	0,00	25,00
19	15	17,22	11,96	492,70	44,05	1,84	12,61	29,94	27,74	100,00	53,38	0,00	18,14	11,28	0,00	25,00
20	16	17,32	12,17	484,25	44,66	1,93	12,61	29,94	28,60	97,70	51,16	0,00	18,44	10,84	0,00	25,00
21	17	17,65	12,07	476,55	44,66	1,82	12,61	29,94	29,38	89,65	52,32	0,00	18,34	10,88	0,00	25,00
22	18	17,89	12,28	483,91	44,84	1,95	11,77	30,65	29,71	100,00	53,62	0,00	18,94	11,63	0,00	25,00
23	19	17,48	12,73	493,03	45,56	1,96	11,77	30,65	29,84	99,86	50,08	0,00	18,32	11,07	0,00	25,00
24	20	17,24	12,44	484,30	45,43	1,99	11,77	30,65	30,62	99,10	50,46	0,00	17,87	10,57	0,00	25,00
25	21	17,32	12,64	474,81	45,14	1,96	11,77	30,65	30,39	100,00	51,42	0,00	17,71	10,24	0,00	25,00
26	22	16,70	12,59	473,75	45,35	1,88	11,77	30,65	30,50	100,00	50,34	0,00	18,10	10,46	0,00	25,00
27	23	16,86	12,51	482,33	45,32	1,85	11,77	30,65	29,66	100,00	50,63	0,00	17,45	10,06	0,00	25,00
28	24	16,77	12,41	480,81	45,86	1,72	11,77	30,65	29,66	91,11	51,33	0,00	17,81	10,66	0,00	25,00
29	25	16,77	12,64	482,38	45,43	1,82	12,55	31,89	29,62	100,00	52,06	0,00	17,37	10,47	0,00	25,00
30	26	16,09	12,57	471,99	44,66	1,91	12,55	31,89	29,90	99,79	51,47	0,00	17,37	10,60	0,00	25,00
31	27	15,06	12,20	372,28	45,16	1,64	12,55	31,89	32,20	38,13	51,55	0,00	16,52	10,28	0,00	25,00
32	28	16,81	12,10	433,51	45,97	1,66	12,55	31,89	28,67	80,56	99,98	0,00	17,77	9,94	0,00	25,00
33	29	17,19	12,62	462,09	46,18	1,67	12,55	31,89	30,87	68,96	55,12	0,00	17,41	11,10	0,00	25,00

FIGURA 98 – Dados de entrada da análise de desempenho "arquivo"do modelo Extração

Pela tabela 20, que apresenta a comparação entre os resultados obtidos na simulação e os do sistema real, observa-se que, embora as diferenças tenham sofrido uma

pequena diminuição em relação à primeira análise de desempenho com entrada manual de dados, a produção de caldo primário e a produção de caldo total continuam apresentando diferenças (6,75% e 3,96%, respectivamente) superiores às demais medidas de desempenho.

TABELA 20 – Análise de resultados da análise de desempenho "arquivo" do modelo Extração

Descrição	Resultados		
	Simulação	Real	Diferença (%)
Índice de extração (%)	97,16	97,20	0,04
Produção de bagaço (t)	40.003	39.928	0,19
Umidade do bagaço (%)	52,70	52,17	1,01
Produção de caldo primário (t)	103.696	111.202	6,75
Produção de caldo secundário (t)	102.709	103.718	0,97
Produção de caldo total (t)	206.405	214.920	3,96
Consumo de água de embebição (t)	43.758	43.680	0,18

Novamente, estes resultados podem ser explicados pelo número insuficiente de dados sobre as variáveis "pol do bagaço do 1° terno" e "fibra do bagaço do 1° terno", e pela estimativa da variável "retorno de caldo filtrado para moenda", descritos anteriormente.

Análise de sensibilidade do modelo Extração

Finalizando-se os testes do modelo padrão Extração, foi realizada a análise de sensibilidade.

Os fatores analisados foram:

- pol da cana;
- fibra da cana;
- pol do bagaço;
- fibra do bagaço.

Para este exemplo, a resposta de interesse escolhida foi a produção de caldo total.

A tela de configuração para esta análise está na figura 99, que mostra os valores inferiores e superiores para cada fator, e a resposta escolhida.

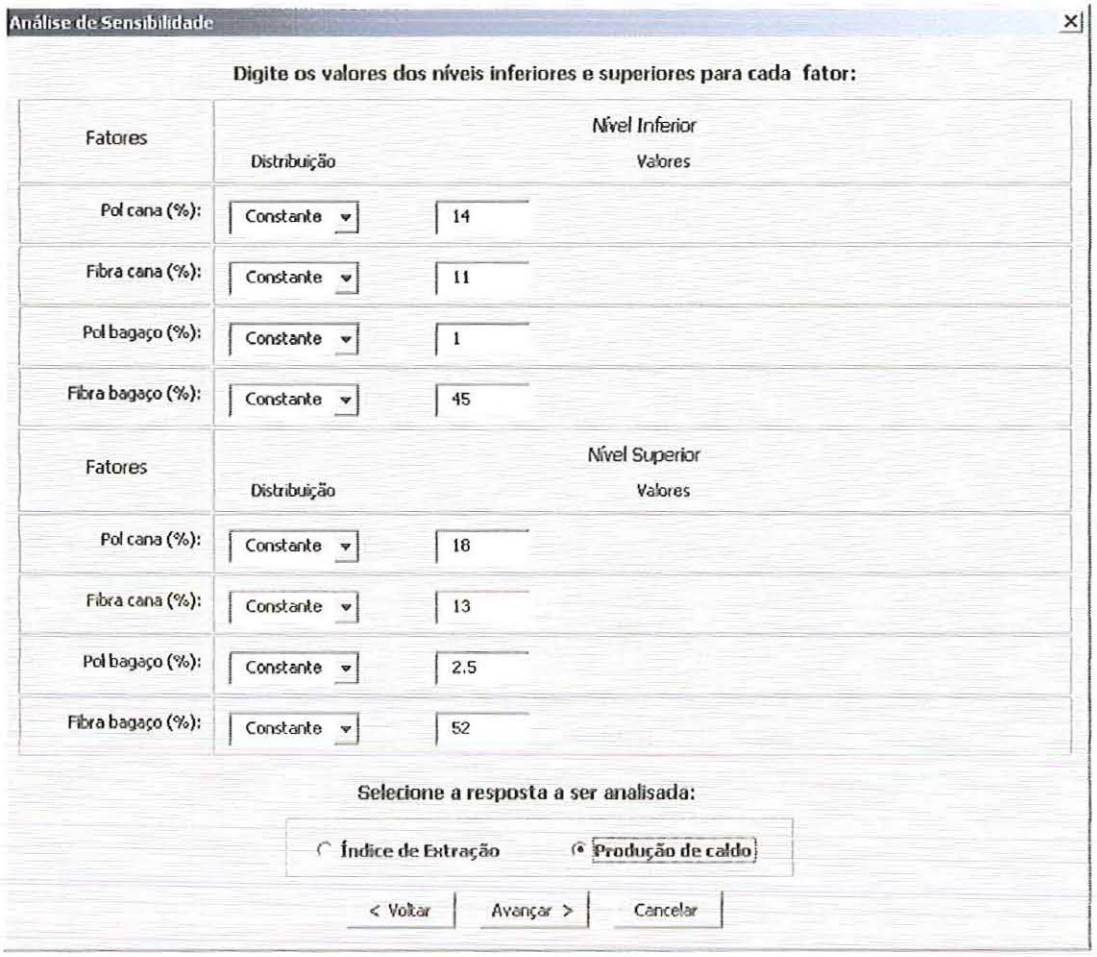

FIGURA 99 – Configuração da análise de sensibilidade do modelo Extração

Após a execução do modelo, o ambiente de simulação apresentou os resultados conforme a figura 100.

Da figura 100, nota-se que são significativos:

- o efeito principal do pol da cana;
- o efeito principal do pol do bagaço;
- o efeito principal do da fibra do bagaço; e
- o efeito de interação entre a fibra da cana e a fibra do bagaço.

	A	B	C	D	E	F	G
1	ANALISE DE SENSIBILIDADE - Significância dos fatores						
2							
3	Nível de significância: 5%						
4							
5	Efeitos principais e de interação					Efeito	
6	E1	Pol cana (%):				Significativo	Ver análise abaixo.
7	E2	Fibra cana (%):				Significativo	Ver análise abaixo.
8	E3	Pol bagaço (%):				Não significativo	
9	E4	Fibra bagaço (%):				Significativo	Ver análise abaixo.
10	E12	Pol cana (%):	Fibra cana (%):			Não significativo	
11	E13	Pol cana (%):	Pol bagaço (%):			Não significativo	
12	E14	Pol cana (%):	Fibra bagaço (%):			Não significativo	
13	E23	Fibra cana (%):	Pol bagaço (%):			Não significativo	
14	E24	Fibra cana (%):	Fibra bagaço (%):			Significativo	
15	E34	Pol bagaço (%):	Fibra bagaço (%):			Não significativo	
16	E123	Pol cana (%):	Fibra cana (%):	Pol bagaço (%):		Não significativo	
17	E124	Pol cana (%):	Fibra cana (%):	Fibra bagaço (%):		Não significativo	
18	E134	Pol cana (%):	Pol bagaço (%):	Fibra bagaço (%):		Não significativo	
19	E234	Fibra cana (%):	Pol bagaço (%):	Fibra bagaço (%):		Não significativo	
20	E1234	Pol cana (%):	Fibra cana (%):	Pol bagaço (%):	Fibra bagaço (%):	Não significativo	
21							

FIGURA 100 – Resultados qualitativos da análise de sensibilidade do modelo Extração

A figura 101 apresenta a análise quantitativa dos efeitos principais significativos. Assim, o aumento da pol da cana de 14% para 18%, provoca um aumento na produção de caldo total da ordem de, no máximo, 23,40%.

21		
22	EFEITOS PRINCIPAIS	
23	E1	Produção de caldo
24	Inferior	118127,09
25	Superior	145774,31
26	Variação máxima (%)	23,40
27	E2	Produção de caldo
28	Inferior	133220,37
29	Superior	130681,03
30	Variação máxima (%)	-1,91
31		
32		
33		
34		
35	E4	Produção de caldo
36	Inferior	129728,04
37	Superior	134173,36
38	Variação máxima (%)	3,43
39		

FIGURA 101 – Análise quantitativa dos efeitos significativos da análise de sensibilidade do modelo Extração

O aumento da fibra da cana de 11% para 13%, provoca uma diminuição na produção de caldo total da ordem de, no máximo, 1,91%.

E, por fim, o aumento da fibra do bagaço de 45% para 52%, provoca um aumento na produção de caldo total da ordem de, no máximo, 3,43%.

As figuras 102 e 103 apresentam, respectivamente, os resultados das replicações e os valores inferiores e superiores da cada fator na análise de sensibilidade.

	A	C	D	E	F	R	S
1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Resultados dos experimentos						
2							
3	Legenda:	-1 Nível inferior					
4		+1 Nível superior					
5							
6	Fatores:	1 Pol cana (%):					
7		2 Fibra cana (%):					
8		3 Pol bagaço (%):					
9		4 Fibra bagaço (%):				Produção de caldo	
10						Replicações	
11	Experimento	1	2	3	4	1	2
12	1	-1	-1	-1	-1	117385	117374
13	2	1	-1	-1	-1	144983	145030
14	3	-1	1	-1	-1	114428	114447
15	4	1	1	-1	-1	142092	142125
16	5	-1	-1	1	-1	117373	117347
17	6	1	-1	1	-1	145015	144959
18	7	-1	1	1	-1	114432	114467
19	8	1	1	1	-1	142089	142104
20	9	-1	-1	-1	1	121427	121443
21	10	1	-1	-1	1	149060	149073
22	11	-1	1	-1	1	119260	119275
23	12	1	1	-1	1	146899	146940
24	13	-1	-1	1	1	121422	121473
25	14	1	-1	1	1	149072	149090
26	15	-1	1	1	1	119243	119237
27	16	1	1	1	1	146958	146901
28							

FIGURA 102 – Resultados das replicações da análise de sensibilidade do modelo Extração

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE - Níveis dos fatores											
2												
3					Nível inferior (-1)					Nível superior (+1)		
4					Valores					Valores		
5		Descrição										
6	FATOR 1	Pol cana (%):	Constante	14				Constante	18			
7	FATOR 2	Fibra cana (%):	Constante	11				Constante	13			
8	FATOR 3	Pol bagaço (%):	Constante	1				Constante	2,5			
9	FATOR 4	Fibra bagaço (%):	Constante	45				Constante	52			
10												

FIGURA 103 – Fatores da análise de sensibilidade do modelo Extração

6. CONCLUSÕES

6.1. Comentários e conclusões

Este trabalho procurou contribuir tecnologicamente no sentido de desenvolver um conjunto de experimentos, modelos e interfaces padrões para o apoio ao planejamento da produção em usinas sucroalcooleiras, baseado na técnica de simulação, com a finalidade de fornecer, como opção de análise do processo produtivo sucroalcooleiro, um ambiente de simulação que abordasse os diversos setores e processos agrícolas e industriais. A base de desenvolvimento de tal ambiente teve como justificativa a necessidade de se disponibilizar uma ferramenta de apoio ao planejamento da produção, mas que necessita de um complexo conjunto de conhecimentos para ser desenvolvida até o ponto de poder ser aplicada por um planejador com conhecimentos limitados em simulação e/ou em programação computacional.

O ambiente de simulação deveria permitir a execução de simulações para análises de desempenho e de sensibilidade, em diferentes escopos, desde a usina com um todo, passando pelos setores agrícola e industrial, até os processos de corte / carregamento, transporte, recepção de matéria-prima, extração, tratamento de caldo, fabricação de açúcar, fabricação de álcool e geração de vapor.

Para o desenvolvimento do projeto, foi proposta a utilização de uma metodologia de pesquisa baseada em 6 etapas:

- Estudo e modelagem conceitual dos sistemas envolvidos;
- Análise de adequação da simulação aos objetivos dos modelos;
- Estudo das ferramentas de simulação;
- Estudo de compatibilidade entre os modelos de atividades e os recursos das ferramentas de simulação;
- Definição dos experimentos, modelos e interfaces padrões;
- Implementação e teste dos modelos e interfaces padrões.

Pode-se afirmar que o trabalho alcançou os objetivos propostos, pois:

- nos capítulos 4 e 5 são especificados o ambiente de simulação, os experimentos, os modelos e as interfaces padrões
- todos os modelos especificados foram implementados e testados, como apresentado no item 5.6.
- nos capítulos 3 e 5, são apresentadas informações sobre o comportamento dos diversos parâmetros envolvidos.

A seguir, são apresentadas algumas considerações sobre o conjunto do trabalho desenvolvido:

- O ambiente de simulação pode ser utilizado sem a necessidade de aquisição da licença do software Arena®, pois a versão gratuita do software permite que modelos desenvolvidos em softwares licenciados possam ser executados. Ou seja, com a versão gratuita o usuário pode utilizar o ambiente e executar as opções de cenários que desejar, bem como salvar os resultados das execuções dos cenários. Na interação com o ambiente, o usuário não necessita conhecer conceitos de modelagem no Arena® nem de programação no VBA®.
- A facilidade de utilização, por meio de interfaces amigáveis e que permitem a manipulação dos parâmetros em cada modelo, também pode ser citada como uma característica relevante do ambiente de simulação.
- Em relação à precisão dos modelos padrões, a opção de análise de desempenho com entrada de dados por meio de leitura de arquivo pode ser utilizada inicialmente para se determinar a precisão de um determinado modelo padrão, pela comparação entre os resultados da simulação e os resultados da usina em estudo. Assim, tal precisão deve ser considerada na análise dos outros cenários e estudos que envolvam o modelo padrão em questão.
- O ambiente de simulação foi desenvolvido com o intuito de auxiliar o analista no planejamento da produção, porém, não é uma ferramenta com o propósito de tomar decisões de forma autônoma. O ambiente de simulação experimenta uma modificação ou alternativa e retorna resultados. Porém, a experiência e a capacidade de análise dos profissionais de planejamento são fundamentais para entender o que representa a modificação sugerida, sua viabilidade e suas implicações técnicas e econômicas.
- Além da aplicação no setor de planejamento da produção, o ambiente pode ser utilizado no treinamento de funcionários. Por meio da simulação de diversos cenários, por meio das análises de desempenho e de sensibilidade, os

funcionários podem adquirir conhecimentos sobre as influências e interrelações entre os diversos parâmetros na determinação da produção de açúcar, álcool e bagaço, e assim, identificar pontos relevantes em que podem atuar de forma mais efetiva para melhorar a produção.

Após as considerações acima, é adequado o comentário de alguns pontos.

O nível de precisão dos resultados das análises desenvolvidas pelo ambiente de simulação, em relação aos resultados do sistema real, pode ser aprimorado por meio da melhoria nos métodos de medição e pelo aumento na amostragem dos dados.

Para a aplicação do ambiente de simulação a uma usina, é indicada, numa fase anterior, a realização de um efetivo trabalho de coleta de dados, que englobe várias safras, de modo que o ambiente possa ser alimentado com informações precisas, e retorne resultados nos quais a usina e seus funcionários confiem.

O levantamento estatístico é indicado pois, mesmo quando ocorre um ajuste adequado de uma distribuição a um determinado conjunto de dados de uma safra, ela pode não ser a distribuição característica do fenômeno envolvido.

A forma eficiente de utilizar as entradas com valores probabilísticos, por meio de distribuições estatísticas, é estudar o fenômeno, a fim de se definir uma distribuição característica. Isto é feito pelo levantamento de dados de várias safras, em que as condições gerais de clima e tecnologia utilizada sejam suficientemente semelhantes para que não influenciem a análise estatística.

Outro aspecto importante é em relação à disponibilidade de dados na usina. O setor sucroalcooleiro possui empresas em níveis de desenvolvimento e automação muito variados. Desta forma, pode ser muito variável a quantidade de dados disponíveis e que são de interesse para a utilização do ambiente de simulação. Neste ponto, cabe lembrar novamente que, quanto melhor o nível das informações a serem alimentadas no ambiente de simulação, melhores e mais confiáveis serão seus resultados.

Em relação ao desenvolvimento do projeto, a metodologia adotada foi adequada, pois cobriu todas as necessidades do projeto e as etapas inicialmente planejadas foram executadas. Neste ponto, uma ressalva deve ser comentada. A coleta de dados sofreu diversos atrasos, chegando a influenciar o cronograma de desenvolvimento, apesar de não comprometer os objetivos do trabalho, e resultaram na necessidade de um constante replanejamento destas atividades. Apenas com o objetivo de se cumprir os prazos acadêmicos, reduziu-se a quantidade de medidas de desempenho a serem calculadas e apresentadas nas execuções dos modelos, visando uma diminuição do número de dados a serem coletados, especificamente aqueles a serem coletados durante a safra.

O conjunto dos 10 modelos padrões que compõem o ambiente de simulação desenvolvido neste trabalho estão disponíveis na página eletrônica do Laboratório de Simulação de Sistemas Discretos da EESC-USP: http://www.simulacao.eesc.sc.usp.br. Nesta página eletrônica estão disponíveis, também: a versão eletrônica desta tese; a versão gratuita do software de simulação Arena®, necessário para a execução dos modelos; e o manual de instruções para utilização do ambiente de simulação.

6.2. Sugestões para futuros trabalhos

As sugestões para trabalhos futuros estão relacionadas com as possibilidades de melhorias, desdobramentos e aprimoramentos em diversos aspectos deste trabalho, que estão relacionados a seguir:

- Inclusão de opção de escolha dos fatores na análise de sensibilidade.
- Desdobramento do trabalho com a inclusão dos ciclos de vapor e de água.
- Desenvolvimento de modelos padrões do 4° nível, englobando sistemas de controle das atividades.
- Aumento da abrangência do trabalho, com a inclusão dos setores de plantio e de armazenagem e distribuição do açúcar, do álcool e do bagaço.
- Análise estatística de dados englobando diversas safras, para a determinação de distribuições estatísticas características para os diversos fenômenos envolvidos no sistema produtivo sucroalcooleiro.
- Estudo e inclusão de ferramenta de análise quantitativa de efeitos de interações identificados como significativos nas análises de sensibilidade.

ANEXO A – ANÁLISE DOS SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

TABELA 21 – Critérios para seleção de software de simulação – modelo

CRITÉRIO: MODELO				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Estrutura para customização	5	5	3	3
Interface amigável (menus, botões de seleção, caixas de diálogo)	5	5	5	5
Desenvolvimento gráfico do modelo	4	5	4	4
Desenvolvimento do modelo por código	4	4	5	5
Assistência na modelagem ("lembretes", caixas de diálogo)	5	5	5	5
Documentação ao longo do desenvolvimento do modelo	5	5	5	5
Construção hierárquica do modelo	5	5	3	4
Modularidade	5	5	4	4
Acesso ao código fonte	5	4	5	5
Interface com linguagem de programação	5	5	5	5
Suporte dos conceitos de programação	5	5	5	5
Biblioteca de funções internas e definidas pelo usuário	5	5	5	5
Programação de atributos e variáveis globais	5	5	5	5
Documentação do código	5	5	5	5
Comprimento das linhas no editor de código	4	4	5	5

CRITÉRIO: MODELO				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Integração com outros aplicativos	5	5	4	5
Média ponderada		4,82	4,56	4,69

TABELA 22 – Critérios para seleção de software de simulação – entrada

CRITÉRIO: ENTRADA				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Formas variadas de entrada de dados	5	5	5	5
Interface para entrada de dados	5	5	5	5
Distribuições estatísticas padrões	5	5	5	5
Distribuições estatísticas definidas pelo usuário	4	5	4	5
Ajuste de dados	5	5	0	5
Teste de ajuste de dados	5	5	0	5
Geração de números aleatórios	4	5	5	5
Integração com outros aplicativos	5	5	4	5
Média ponderada		5,00	3,32	5,00

TABELA 23 – Critérios para seleção de software de simulação – saída

CRITÉRIO: SAÍDA				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Relatórios padrões	5	5	5	5
Relatórios personalizados	5	5	5	5
Disponibilidade de resultados antes do final da simulação	3	5	5	5
Relatórios resumidos para execuções múltiplas	3	5	5	5

CRITÉRIO: SAÍDA				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Saída para arquivo, impressora, "plotter" ou outro software	5	5	4	5
Acesso aos arquivos de saída	5	5	5	5
Integração com outros aplicativos	5	5	4	5
Apresentação de gráficos estatísticos dos resultados finais	5	5	5	5
Apresentação dinâmica dos gráficos estatísticos dos resultados ao longo da execução	4	5	5	5
Análise estatística dos dados de saída	5	5	5	5
Média ponderada		5,00	4,78	5,00

TABELA 24 – Critérios para seleção de software de simulação – execução

CRITÉRIO: EXECUÇÃO				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Planejamento de experimentos	5	5	5	5
Execuções múltiplas independentes automáticas	5	5	5	5
Reinicialização de estatísticas durante a execução	5	5	5	5
Execuções automáticas por lote	4	5	4	5
Determinação automática do comprimento das corridas	4	3	5	3
Período de "warm-up"	4	4	5	4
Especificação de valores iniciais de variáveis e atributos para inicialização do modelo em estado não-vazio	3	5	5	5
Controle da velocidade de execução do modelo	3	5	5	5
Pontos de interrupção para correções no modelo	3	5	4	5
Módulo executável do modelo	2	5	5	5
Média ponderada		4,68	4,82	4,68

TABELA 25 – Critérios para seleção de software de simulação – animação

CRITÉRIO: ANIMAÇÃO				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Interface amigável (menus, botões de seleção, caixas de diálogo)	5	5	5	5
Assistência na animação ("lembretes", caixas de diálogo)	5	5	5	5
Biblioteca de ícones padrões	5	5	5	5
Criação/importação de novos ícones	5	5	4	5
Ícones tridimensionais e/ou coloridos	2	3	5	3
Modificação na cor e tamanho dos ícones	4	5	5	5
Cópia de ícones	5	5	5	5
Editor para criação de arranjo físico da tela	4	5	5	5
Arranjo físico múltiplo	4	5	4	5
Alternância entre telas	4	5	4	4
Tela virtual	5	5	5	5
Documentação da animação	4	5	5	5
Execução concorrente com a animação	5	5	5	5
Execução sem animação	5	5	5	5
Controle da velocidade da animação	4	5	5	5
Personalização de vistas	5	5	3	5
Ampliações e reduções das vistas da animação	4	5	5	5
Rotação e modificação de ícones durante a execução	3	2	5	2
Indicação de estado dos elementos pela mudança de cor	4	5	5	5
Média ponderada		4,82	4,83	4,77

TABELA 26 – Critérios para seleção de software de simulação – testabilidade

CRITÉRIO: TESTABILIDADE				
Critério	Peso	Arena®	AutoMod®	ProModel®
Mensagens e correções interativas de erros	5	5	5	5
Auxílio e tutorial on-line	4	5	5	5
Função "step"	4	4	4	4
Arquivo de listas de entidades e parâmetros do modelo	4	5	5	5
Gerador conceitual do modelo	5	3	0	0
Apresentação dinâmica dos valores de variáveis, atributos e funções	5	5	5	5
Apresentação do estado dos elementos e dos eventos	5	5	5	5
Apresentação dos caminhos do fluxo de trabalho	4	5	5	5
Apresentação do movimento das entidades ao longo dos caminhos	4	5	5	5
Média ponderada		4,66	4,29	4,29

TABELA 27 – Critérios para seleção de software de simulação – eficiência

CRITÉRIO: EFICIÊNCIA				
Critério	Peso	Arena®	AutoMod®	ProModel®
Robustez	5	5	5	5
Confiabilidade	5	5	5	5
Cadeia de modelos	5	4	4	4
Fusão de modelos	5	5	4	5
Biblioteca de módulos reutilizáveis e modelos genéricos pré-existentes	5	4	4	4
Estrutura para projeto de novos elementos reutilizáveis definidos pelo usuário	5	5	4	5

CRITÉRIO: EFICIÊNCIA				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Multi-processamento	5	5	5	5
Interação na execução, alteração e verificação do modelo	5	5	5	5
Políticas de formação de filas	5	5	5	5
Velocidade de compilação	4	5	5	5
Limitação do tamanho do modelo	5	5	5	5
Limitação do número de elementos	4	5	5	5
Limitação do número de ícones apresentados	4	5	5	5
Definição e tamanho dos nomes de entidades	3	5	5	5
Especificação das unidades de medida de tempo e distância	5	5	5	5
Saída para o sistema operacional dentro do pacote	4	5	5	5
Média ponderada		4,86	4,73	4,86

TABELA 28 – Critérios para seleção de software de simulação – usuário

CRITÉRIO: USUÁRIO				
Critério	**Peso**	**Arena®**	**AutoMod®**	**ProModel®**
Modelagem híbrida	5	4	4	4
Portabilidade (possibilidade de execução de modelos em máquinas diferentes)	5	5	5	5
Versão em rede	5	5	5	5
Experiência prévia em simulação e software	4	5	5	5
Média ponderada		4,74	4,74	4,74

ANEXO B – QUESTIONÁRIO DE CONSULTA ÀS USINAS

Pesquisa sobre o padrão das usinas socroalcooleiras do estado de São Paulo

PARTE AGRÍCOLA

	USINAS:		Santo Ângelo	São Martinho	Santa Fé	Ester	Dedini
Plantio	Área Plantada		7.481 h.a	63.433,35 h.a	14.500 h. a	15.641,33 h. a	22.62,57 h. a
	Porcentagem de Área Própria		63.41%	53,38%	36%	8.239,14 / 52,68%	20,66%
	Classificação	A	X	33%	-	X	10%
		B		37%	-	80 a 95	40%
		C	X	6%	-	70 a 80	30%
		D	X	18%	-	60 a 70	10%
		E	X	6%	X	Abaixo 60	10%
Corte	Porcentagem de Corte Mecanizado		63,8%	82%	38%	36%	50%
	Área Total com Potencial para Corte Mecanizado		80%	89%	85%	65%	60%
	Número de Frentes		2	5 (mecanizado) 3 (manual)	4	6	3
	Composição	Pessoas	60 man/mec	78 mecanizado 350 manual	350	45 a 350	200
		Tratores	5 man/mec	10 mecanizado 04 manual	4	1 a 5	10
		Colhedoras	5 mecanizado	08 mecanizado 0 manual	3	4	3
		Carregadeiras	-	0 mecanizado 5 manual	6	2 a 6	3
		Veículos de Manutenção	-	01 mecanizado 01 manual	2	1	1
		Veículos de Abastecimento	-	01 mecanizado 01 manual	2	1	1
		Caminhões	-	12 mecanizado 12 manual	16	5 a 13	7

Pesquisa sobre o padrão das usinas socroalcooleiras do estado de São Paulo							
Carregamento	Tipos	Trator Transbordo	X	X	X	X	X
		Trator Reboque	X	X	X	X	X
		Container	-	-	-	-	-
		Carregadora	-	X	-	-	-
		Outros	-	-	-	-	-
Transporte	Caminhões	Simples	X	-	-	X	X
		Romeu e Julieta	X	X	X	X	X
		Treminhão	-	X	-	X	-
		Rodotrem	-	X	X	-	X
		Outros	-	-	-	Tetraminhão	-
	Manutenção em Caminhões e Máquinas	Preventiva	-	X	X	X	X
		Preditiva	-	X	-	-	-
		Corretiva	-	X	X	X	-
Recepção	Cana é Armazenada	Sim	Raramente	-	-	X	-
		Não	-	X	X	-	X
	Tipo de Armazenamento	Pátio	-	-	-	X	-
		Barracão	X	-	-	-	-
		Outros	-	-	Reboques	-	-
	Descarregamento	Hilo	X	-	X	X	X
		Balanção	-	-	-	-	-
		Tombador Hidráulico	X	X	-	-	-
		Outros	-	Ponte rolante	-	-	-
	Lavagem da Cana	Sim	X	-	X	X	X
		Não	-	X	-	-	-
Extração	Quantidade	Picador	1	1	1	2	1
		Desfibrador Horizontal	1	1	1	1	-
		Desfibrador Vertical	-	Não tem	-	Não conheço este tipo no Brasil	1
		Moendas	1	3	1	1	1
		Ternos de Moenda	6	6	5	6	6
	Tipo de Embebição	2° terno	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo
		3° terno	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo
		4° terno	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo	Caldo
		Penúltimo	Caldo	Água	Caldo	Caldo	Caldo
		Último	Água	-	Caldo	Água	Água
	Controle de Perda de Sacarose	Lavagem	X	X	-	-	X
		Vinhaça	-	X	X	X	X
		Torta (Filtro)	X	X	X	X	X
		Melaço	-	X	-	-	X
		Não há controle	-	-	-	-	-
		Outros	Bagaço	Bagaço	Bagaço	Bagaço	-

Pesquisa sobre o padrão das usinas socroalcooleiras do estado de São Paulo

PARTE INDUSTRIAL

Características		Quantidade de Equipamentos					Capacidade Total do Processo				
	USINAS	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini
EQUIPAMENTOS	Coluna(s) de Sulfitação	2	3	1	1	1	200 M³/hr.	1350 M³/hr.	350 T.C.H.	400 M³/h	500 M³/h
	Tanque(s) de Cal	2	2	2	2	2	15 M³	30 M³	25.000 M³	12 M³	60 M³
	Decantador(es)	2	10	2	4	5	450 M³	4850 M³	1025 M³	400 M³	2470 M³
	Aquecedor(es)	14	11 conjuntos 3 caixas	12	9	16	1070 M²	4800 M²	2075 M²	300 M²	600 M²/h
	Pré-Evaporador(es)	1	9 unidades	2	4	4	1500 M²	27.000 M²	4000 M²	2000M²	500 M²/h
	Evaporador(es)	4	4 conjuntos	1	1	1	2490 M²	25.300 M²	5550 M²	1 conj de 8 reboilers, sendo 3x720 m² (2° ef), 3x620 m² (3° ef) e 2x510 m² (4° ef)	500 M²/h
	Cozedor(es)	5	6 Massa "A" 5 Massa "B" 4 Massa"C"	6	7	9	1180 hl	9000 M³ Vol. Massa	3050 hL	6x 50 M³ + 1x 20 M³	360 M³
	Cristalizador(es)	9	6 Massa "A" 11Massa "B" 7 Massa "C"	11	12	16	2000 hl	1368 M³	5200 hL	6x 60 M³ "A" + 6x 60 M³ "B"	640 M³
	Centrífuga(s) Contínua(s)	4	6 Konti 6 9 Konti 10 2 Konti 14	6	4	10	25 TON DE MASSA/hr.	194 t.m/h	52000 Kg/h	Konti 10	65 t/h
	Centrífuga(s) Descontínua(s)	2	12 fz - 100 1mac - 2250	9	7	9	1750 KG de massa/CICLO	328,5 t.m/h	17.000 sc/d	1 MAC 1250 + 6 P650, todas MAUSA	122,4 t/h
	Secador(es) de Açúcar	1	3	1	1	2	300 SACAS / hr.	135,4 t.aç/h	15.000 sc/d	700 t/d de açúcar	42 t/h
	Dorna(s) de Fermentação	9	6	8	7	12	1800 M³	12.000 M³	1.600 M³	400 M³	4800 M³
	Centrífuga(s) de Vinho	4	12	5	6	4	160 M³/ hr	1920 M³/h	160 M³/h	3 SCM50 + 2SCM60 + 1DX 304	260 M³/h

PARTE INDUSTRIAL

	Características	Quantidade de Equipamentos					Capacidade Total do Processo				
	USINAS	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini
EQUIPAMENTOS	Secador(es) de levedura	-	1	-	-	-	-	1,66 tL/h	-	-	-
	Aparelho(s) de Destilação c/ colunas A e B	1	4	-	2	-	8 M³/h	840 M³/d	-	1x 120 + 1x 15 M³/dia	-
	Aparelho(s) de Destilação c/ colunas A, B e C	-	5	1	-	2	-	930 M³/d	180 M³/h	-	400 M³/dia
	Peneira Molecular	-	1	-	-	-	-	600 M³/d	-	-	

PARTE INDUSTRIAL

	Características	Total por Safra				
	USINAS	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini
SUB-PRODUTOS	Torta de Filtro	30.000 t	218.271 t	20.882 t	43.000 t	100.800 t
	Melaço	40.000 t	32.794 M³	-	-	126.000 t
	Vinhaça	340.000 M³	2.461.458 M³	173.142 M³	500.000 M³	620.000 M³
	Bagaço	180.000 t	1.572.470 t	259.886 t	360.000 Kg	600.000 t
	Óleo Fúsel	70 M³	345.467 L	-	-	-
	Levedura	-	3.758 t	-	-	-

PARTE INDUSTRIAL

	Características	Quantidades				
	USINAS	Sto Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini
Geração de Energia	Número de Caldeiras	1	8	2	3	4
	Produção de Vapor Total	100 t	2.809.539 t	140 t/h	180 t/h	280 t/h
	Produção de Energia Elétrica Total	3,6 MW	73.645.280 KWH	11.114 MWH	6,5 MW	10.000 kwh
	Produção de Energia Elétrica para Consumo Interno	2,8 MW	60.604.324 KWH	11.114 MWH	6,0 MW	8.500 kwh
	Produção de Energia Elétrica para Cogeração	Não possui contrato	13.040.956 KWH	0	0,5 MW	1500 kwh

PARTE INDUSTRIAL					
Tipo de Processo					
Características	LEGENDA: Contínuo "C" - Batelada "B"				
USINAS	S Ângelo	S Martinho	Sta Fé	Ester	Dedini
Coluna(s) de Sulfitação	C	C		C	C
Tanque(s) de Cal	C	C		C	B
Decantador(es)	C	C		C	C
	C	C		C	
Aquecedor(es)	C	C		C	C
Pré-Evaporador(es)	C	C		C	C
Evaporador(es)	B	B		C	B
Cozedor(es)	C	C		C	B
Cristalizador(es)	C	C		C	B
Centrífuga(s) Contínua(s)	B	B		B	B
Centrífuga(s) Descontínua(s)	C	C		C	C
Secador(es) de Açúcar	C	C		C	B
Dorna(s) de Fermentação	B	B		C	C
Centrífuga(s) de Vinho	C	C		C	-
Secador(es) de levedura	C	C	-	-	-
Aparelho(s) de Destilação c/ colunas A e B	C	C	-	C	-
Aparelho(s) de Destilação c/ col. A, B e C	C	C	-	-	C
Peneira Molecular	-	C	-	-	-

Pesquisa sobre o padrão das usinas sucroalcooleiras do estado de São Paulo

PARTE INDUSTRIAL

	Questões:	Do Plantio até o descarregamento/ abastecimento, qual a etapa mais crítica para o planejamento e tomada de decisão?
USINAS	Santo Ângelo	Período da distribuição da área para plantio e escolha da variedade
	São Martinho	Planejamento Reforma e o Perfil Varietal visando o Planejamento da Colheita
	Santa Fé	A etapa mais crítica é a colheita, pois nesta etapa que estão as maiores perdas físicas de colmos, perdas de peso por evaporação, perda de açúcares por deterioração, inversões de sacarose e inclusões de impurezas nos processos de produção.
	Ester	-
	Dedini	-

	Questões:	Com relação ao preparo da cana, quais os equipamentos utilizado?
USINAS	Santo Ângelo	-
	São Martinho	Picador/ Desfibrador/ Tambor Nivelador
	Santa Fé	-
	Ester	1 Jogo de facas niveladoras tipo MF4, 1 jogo facas Cop 8 e 1 Desfibrador tipo Cop 5
	Dedini	Picador e Desfibrador tipo DH-1 - DEDINI

	Questões:	Com relação à extração, qual o processo utilizado?
USINAS	Santo Ângelo	Esmagamento por tandem de moenda e embebição composta.
	São Martinho	Moenda
	Santa Fé	-
	Ester	1 Conjunto de moendas 37" x 78", 6 ternos, todos com rolo de pressão
	Dedini	Moenda Convencional

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKOFF, R. L.; SASIENE, M. W. (1979). *Pesquisa operacional.* Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.

ALVES, M. R. P. A. (1997). Logística agroindustrial. In: BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial.* São Paulo, Atlas, Cap. 4, p. 139-214.

BANKS, J. (1998). Principles of simulation. In: BANKS, J., coord. (1998). *Handbook of simulation* – principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, John Wiley & Sons, Chapter 1, p. 3-30.

BANKS, J.; GIBSON, R. R. (1997). Selecting simulation software. *IEE Solutions*, May, p. 30-32.

BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial.* São Paulo, Atlas, Cap. 1, p. 23-48.

BRAGA, J. (1999). Copersucar reduz custos com simulação. *Revista Tecnologística*, v. 4, n. 39, p. 16-23, fev.

BURBIDGE, J. L. (1981). *Planejamento e controle da produção.* São Paulo, Atlas.

CAMARÃO, P. C. B. (1989). *Glossário de informática.* LTC, Rio de Janeiro, p. 182.

CAMARGO, C. A. et al. (1990). *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool:* manual de recomendações. São Paulo, IPT, publicação 1817, Apênd. A, p. 411-507.

CHIAVENATO, I. (1990). *Iniciação ao planejamento e controle da produção.* São Paulo, Makron Books.

CONHEÇA a Copersucar União – Exportação (2004). *Copersucar União.* http://www.copersucar.com.br (22 ago.).

COPERSUCAR (1987a). *Destilação.* Piracicaba, SP, COPERSUCAR. /Apostila/ fev.

COPERSUCAR (1987b). *Fermentação.* Piracicaba, SP, COPERSUCAR. /Apostila/ fev.

COPERSUCAR (1993). Alimentação de cana. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL, 5., Piracicaba, SP. *Anais.* Piracicaba, SP, COPERSUCAR. p. 8-13.

COPERSUCAR (1999). *Fundamentos dos processos de fabricação de açúcar e álcool.* Piracicaba, SP, COPERSUCAR, ago. (Série Industrial, 20).

CORNELL, G. (1993). *The Visual Basic 3 for Windows handbook.* Berkeley, McGraw-Hill.

DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A. (1990). *Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana.* Piracicaba, SP, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", publicação n. 54354.

EID, F. (1996). Progresso técnico na agroindústria sucroalcooleira. *Informações Econômicas, SP*, v. 26, n. 5, p. 29-36, mai.

FERREIRA, A. B. H. (1986). *Novo dicionário da Língua Portuguesa.* 2ª. ed., 32ª. imp. Nova Fronteira, Rio de Janeiro, p. 101-102.

FREITAS FILHO, P. J. (2001). *Introdução à modelagem e simulação de sistemas* – com aplicações em Arena. Florianópolis, SC, Visual Books.

GERELLE, E. G. R.; STARK, J. (1988). *Integrated manufacturing:* strategy, planning, and implementation. McGraw-Hill.

GORDON, G. (1978). *System Simulation*, 2nd ed. New Jersey, Englewood Cliffs, Prentice Hall, p. 423.

HAHN, M. H.; RIBEIRO, R. V. (1999). Heuristic guided simulator for the operational planning of the transport of sugar cane. *Journal of the Operational Research Society*, n. 50, p. 451-459.

HIGGINS, A. J.; MUCHOW, R. C.; RUDD, A. V.; FORD, A. W. (1998). Optimising harvest date in sugar production: a case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. *Field Crops Research*, n. 57, p. 153-162.

HLUPIC, V.; IRANI, Z.; PAUL, R. J. (1999). Evaluation framework simulation software. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 15, p. 366-382.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S. (2001). *Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa.* Rio de Janeiro, Objetiva, p. 183.

HUGOT, E. (1997). *Manual da engenharia açucareira.* 1ª ed. em português, v. I e II. Mestre Jou.

IANNONI, A. P.; MORABITO, R. (2002). Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. *Gestão & Produção*, v. 9, n. 2, p. 107-128, ago.

KEATING, B. A.; ROBERTSON, M. J.; MUCHOW, R. C.; HUTH, N. I. (1999). Modelling sugarcane production systems I. Development and performance of the sugarcane module. *Field Crops Research*, n. 61, p. 253-271.

LAW, A. M. (1986). Introduction to simulation: a powerful toll for analysing complex manufacturing systems. *Industrial Engineering*, p. 46- 63, May.

LAW, A. M.; HAIDER, S. W. (1989). Selecting simulation software for manufacturing applications: practical guidelines & software survey. *IE*, May, p. 33-46.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis*, 2nd ed. New York, McGraw-Hill.

LAW, A. M.; MCCOMAS, M. G. (1990). *Secrets of successful simulation studies*, Ind. Eng., 22:47-48, 51-53, 72, May.

LISSON, S. N.; ROBERTSON, S. N.; KEATING, B. A.; MUCHOW, R. C. (2000). Modelling sugarcane production systems II. Analysis of system performance and methodology issues. *Field Crops Research*, n. 68, p. 31-48.

LOBÃO, E. DE C.; PORTO, A. J. V. (1997). Proposta para sistematização de estudos de simulação. (CD ROM). In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 17., Gramado, RS. *Anais*. Out.

LOPES, M. B. (1995). *Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar*. Piracicaba. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

MACEDO, I. DE C. (1998). *Legislação ambiental e inovações tecnológicas na agroindústria canavieira*. http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto5.html. (20 mar.).

MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. (1993). Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation. *Computers in Industry*, n. 21, p. 331-334.

MEADE, G. P.; CHEN, J. C. P. (1977). *Cane sugar handbook:* a manual for cane sugar manufactures and their chemists. 10. ed. New York, John Wiley.

MILAN, M. (1992). Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brazil. Silsoe. 226 p. Thesis (Ph. D.) – Cranfield Institute of Technology.

MUCHOW, R. C.; HIGGINS, A. J.; RUDD, A. V.; FORD, A. W. (1998). Optimising harvest date in sugar production: a case study for the Mossman mill region in Australia II. Sensitivity to crop age and crop class distribution. *Field Crops Research*, n. 57, p. 243-251.

NELSON, R. (1994). *Visual Basic for Windows versão 3:* guia autorizado Microsoft. São Paulo, Makron Books.

NIKOUKARAN, J.; HLUPIC, V.; PAUL, R. J. (1998). Criteria for simulation software evaluation. In: Winter Simulation Conference, 1998. *Proceedings*, p. 399-406.

NONATO, S. A. (1999). *Utilização de redes de Petri para avaliação de sistemas computacionais*. São Carlos. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo.

NUNES, M. H. Moagem da cana. In: *CURSO de controle de operação de moendas. /s.* i./Apostila/ p. 66-85.

NUNES, M. H. Sistema de embebição. In: *CURSO de controle de operação de moendas. /s.* i./Apostila/ p. 106-117.

PEGDEN, C. D.; SHANNON, R. E.; SADOWSKI, R. P. (1991). *Introduction to simulation with SIMAN.* New York, McGraw-Hill.

PIEKARSKI, A. E. T. (1998). *Uma proposta de Reengenharia para o Ambiente de Simulação Automático (ASiA).* São Carlos. 159 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo.

PORTO, A. J. V. (2000). *Simulação de sistemas discretos*. Disciplina do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP. São Carlos, SP. /Notas de aulas/.

PORTUGAL, A. D. (1998). A importância estratégica da prospecção tecnológica para o SNPA. In: CASTRO, A. M. G. de et al. *Cadeias produtivas e sistemas naturais* – prospecção tecnológica, Brasília, DF, EMBRAPA-SPI / EMBRAPA-DSP. Cap. 1, p. 09-20.

PRICE, R. N.; HARRELL, C. R. (1999). Simulation modeling and optimization using ProModel. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings*, p. 208-214.

PRITCHETT, A. R.; LEE, S.; HUANG, D.; GOLDSMAN, D. (2000). Hybrid-system simulation for National Airspace System safety analysis. In: Winter Simulation Conference, 2000. *Proceedings*, p. 1132-1142.

PRITSKER, A. A. B. (1994). *Introduction to simulation and SLAM II*, 4th ed. New York, John Wiley & Sons.

PRITSKER, A. A. B. (1998). Principles of simulation modeling. In: BANKS, J., coord. (1998). *Handbook of simulation* – principles, methodology, advances, applications, and practice. New York, John Wiley & Sons, Chapter 2, p. 31-51.

ROHRER, M. (1999). AutoMod product suite tutorial (AutoMod, Simulator, AutoStat) by AutoSimulations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings*, p. 220-226.

SADOWSKI, D.; BAPAT, V. (1999). The Arena product family: enterprise modeling solutions. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. *Proceedings*, p. 159-166.

SAITO, J. R. (2000). *Análise das cadeias agroindustriais utilizando simulação computacional baseada na metodologia System Dynamics*: um estudo de caso. São Carlos. 83 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos.

SATO, M. S. Recepção e manuseio de cana. In: *CURSO de controle de operação de moendas*. /s. i./Apostila/ p. 8-19.

SHANNON, R. E. (1975). *Systems simulation*. NJ, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

SCHMIDT, J. W.; TAYLOR, R. E. (1970). *Simulation and analysis of industrial systems*. Richard D. Irwin, Homewood, Ill.

SIPRELLE, A. J.; PHELPS, R. A. (1997). Simulation of bulk flow and high speed operations. In: Winter Simulation Conference, 1997. *Proceedings*, p. 706-710.

SLACK, N.; CHAMBERS, S; HARLAND, C. (1997). *Administração da produção*. São Paulo, Atlas.

STURROCK, D. T.; DRAKE, G. R. (1996). Simulation for high-speed processing. In: Winter Simulation Conference, 1996. *Proceedings*, p. 432-436.

UM MERCADO de R$ 36 bilhões (2004). *ProCana.com*. http://www.jornalcana.com.br/Conteudo/ Conheca%20°%20Setor.asp (22 ago.).

UNICA (2004). Ranking – Evolução da produção brasileira. *Informação UNICA*, n. 58, p. 4-5, mar/abr.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (1992). Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz". Publicação interna n. 56932. *Curso de modelagem e simulação de processos na produção de açúcar, álcool e derivados*. Piracicaba, set.

VIAN, C. E. F.; EID, F.; SCOPINHO, R. A.; SILVA, P. R. C. (1997). Estratégias de crescimento em destilarias de álcool e usinas açucareiras: estudos de caso em nove empresas paulistas. *Informações Econômicas, SP*, v. 27, n. 9, p. 07-25, set.

VILLARIN, E. (2004). *Modelagem e análise de sistemas supervisórios híbridos*. São Paulo. 339 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F.; MORAES, S.; MARINO, M. K.; MAMONE, A.; SZASZ, A. H. (1998). Sistema agroindustrial da cana-de-açúcar / Sistema agroindustrial da soja. In: FARINA, E. M. E. Q.; ZYLBERSZTAJN, D. (Coord.). *Competitividade no agribusiness brasileiro*. São Paulo: PENSA/FIA/FEA/USP. Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial (PENSA) / Fundação Instituto de Administração (FIA) / Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade (FEA). 194 p.

WIDMER, J. L. (1991). Operação de veículos combinados longos (VCL's) no Brasil - implicações sobre a infra-estrutura. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, VI, São Paulo, SP, *Anais*, nov.

YAMADA, M. C. (1999). *Modelagem das cadeias produtivas da indústria sucroalcooleira visando a aplicação em estudos de simulação.* São Carlos. 164 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

OBRAS CONSULTADAS

BANKS, J. et al. (1995). *Discret-event system simulation*, 2. ed. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.

BARROS, T. C.; PERKUSICH, A. (1998). Simulation of the continuous dynamics of batch control systems based on Petri nets. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, San Diego, CA, USA. *Proceedings*, v. 1, p. 680-685.

CABRAL, P. (1998). Energia, dependência externa e auto-suficiência. *Agroindústria canavieira e o novo ambiente institucional*. Instituto de Economia, Unicamp, SP. http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto7.html (20 mar.).

CARPINETTI, L. C. R. *Planejamento e análise de experimentos*. São Carlos, SP. Área de Engenharia de Produção – Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP. São Carlos, SP. /Apostila/.

CARNEVALLI, W. T. (1981). *Processo de destilação*. Piracicaba, Conger S. A. /Apostila/.

COMPLETE OVERVIEW OF PETRI NET TOOLS DATABASE (2000). http://www.daimi.au.dk/PetriNets/tools/complete_db.html (15 jul.).

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. (2001). *Manual de instruções*. São Paulo, 1999. http://www.orplana.com.br/manual.htm (23 mar.).

COPERSUCAR (1995). *Agrícola Informa nº 17*. Piracicaba, SP, COPERSUCAR. /Boletim técnico/ fev.

COPERSUCAR (2001a). *Manual de métodos analíticos* - controle químico da fermentação. (CD ROM) Piracicaba, SP.

COPERSUCAR (2001b). Manual de controle químico da fabricação de açúcar. (CD ROM) Piracicaba, SP.

DELGADO, A. A., coord. (1975). *Tecnologia dos produtos agropecuários* - tecnologia do açúcar e das fermentações industriais. Piracicaba, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", publicação n. 2828.

DESROCHERS, A. A.; AL-JAAR, R. Y. (1994). *Applications of Petri nets in manufacturing systems:* modeling, control, and performance analysis. New York, IEEE.

FANNI, A.; GIUA, A. (1998). Discrete event representation of qualitative models using Petri nets. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS. *Proceedings*, v. 28, n. 6, p. 770-780, Dec.

FERREIRA, A. T. (1998). O papel do setor sucroalcooleiro na economia brasileira. *Agroindústria canavieira e o novo ambiente institucional.* Instituto de Economia, Unicamp, SP. http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto8.html (20 mar.).

GONÇALVES FILHO, E. V.; PORTO, A. J. V. (2001). *Estatística aplicada.* Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Mecânica – EESC – USP. São Carlos, SP. /Apostila/.

GUERREIRO, M. A.; ANDRIETTA, S. R.; MAUGERI, F. (1997). Expert system for the design of an industrial fermentation plant for the production of alcohol. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, v. 68, n. 2, p. 163-170.

HLUPIC, V.; PAUL, R. J. (1996). Methodological approach to manufacturing simulation software selection. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v. 9, n. 1, p. 49-55.

HLUPIC, V.; PAUL, R. J. (1999). Guidelines for selection of manufacturing simulation software. *IIE Transactions*, v. 31, p. 21-29.

IANONNI, A. P. (2000). *Análise do sistema logístico de descarga de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma grande usina na região de Ribeirão Preto.* São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção,Universidade Federal de São Carlos.

INA – INTEGRATED NET ANALYZER (2000). http://www.informatik.hu-berlin.de/lehrstuehle/automaten/ina/ (15 jul.).

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. (1998). *Simulation with Arena.* Boston, MA, WCB/McGraw-Hill.

KUO, S. S.; CHEN, E. J.; SELIKSON, P. L.; LEE, Y. M. (2001). Modeling continuous flow with discrete-event simulation. In: Winter Simulation Conference, 2001. *Proceedings*, p. 1099-1103.

MONTGOMERY, D. C. (1991). *Design and analysis of experiments.* New York, John Wiley & Sons.

MURATA, T. (1989). Petri nets: properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, v. 77, n. 4, p. 541-580, Apr.

NAKAMURA, E. K.; FERREIRA, M. E.; INAMASU, R. Y.; KATO, E. R. R., PORTO, A. J. V. (1997). Surge o Petri Net Tools, um editor de rede de Petri para modelagem de FMS. *Máquinas e Metais*, ano XXXII, n. 378, p. 101-110, jul.

PARAGON TECNOLOGIA. *Introdução à simulação com Arena 5.0.* 285 p. Paragon Tecnologia, São Paulo. /Apostila/.

ROCKWELL SOFTWARE INC. (2000). *Arena Basic User´s Guide*. Rockwell Software Inc., EUA.

STAHLBERG FILHO, P. (1997). Planejamento e controle da produção. In: BATALHA, M. O., coord. (1997). *Gestão agroindustrial*. São Paulo, Atlas, Cap. 6, p. 263-347.

WIETING, R. (1996). Hybrid high-level nets. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Coronado, CA, USA. *Proceedings*, p. 848-855.