

# SEPPA - SISTEMA ESPECIALISTA PARA PLANTA DE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Química  
Departamento de Processos Biotecnológicos

# **SEPPA – SISTEMA ESPECIALISTA PARA PLANTA DE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL.**

**Autora: Nayara Zago Bassetto**  
**Orientador: Dr.Sílvio Roberto Andrietta**

Dissertação apresentada à  
Faculdade de Engenharia Química da  
Universidade Estadual de Campinas  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia Química.

**Campinas – SP**  
**Agosto de 2006**

UNIDADE BC  
Nº CHAMADA J UNICAMP  
13294/D  
V \_\_\_\_\_ EX \_\_\_\_\_  
TOMBO BCI 71585  
PROC. 16.145-07  
C \_\_\_\_\_ D X  
PREÇO 11,00  
DATA 07/03/07  
BIB-ID 402393

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

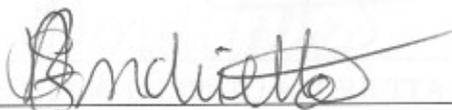
B294s Bassetto, Nayara Zago  
SEPPA – Sistema especialista para planta de produção de  
álcool / Nayara Zago Bassetto.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Silvio Roberto Andrietta  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Sistemas especialistas (Computação). 2. Álcool -  
Produção. 3. Álcool. I. Andrietta, Silvio Roberto. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: ESPPA – Expert system plant for the production of alcohol.  
Palavras-chave em Inglês: Expert System, Alcohol production, Ethanol.  
Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Biotecnológicos.  
Titulação: Mestre em Engenharia Química  
Banca examinadora: Francisco Maugeri Filho, Rubens Maciel Filho.  
Data da defesa: 21/08/2006  
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

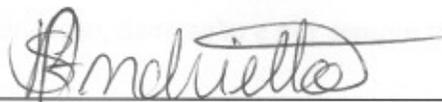
Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida por Nayara Zago Bassetto e aprovada pela Comissão Julgadora em 21/08/2006.



---

Prof. Dr. Silvio Roberto Andrietta  
(FEQ/UNICAMP - ORIENTADOR)

Dedico este trabalho ao meu pai, em homenagem ao dia em que nasceu.  
Dissertação de Mestrado defendida por Nayara Zago Bassetto e aprovada em 21 de Agosto de 2006 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



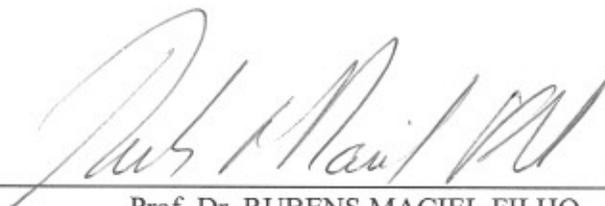
---

Prof. Dr. SILVIO ROBERTO ANDRIETTA  
(FEQ/UNICAMP - ORIENTADOR)



---

Prof. Dr. FRANCISCO MAUGERI FILHO  
(FEA/UNICAMP)



---

Prof. Dr. RUBENS MACIEL FILHO  
(FEQ/UNICAMP)

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida:

Aos meus pais, Irineu e Nair, por serem responsáveis por tudo que sou. Pelo amor, educação, dedicação e por sempre terem acreditado em mim.

Ao meu companheiro Júnior, pela compreensão, amizade e pelo grande incentivo e apoio dado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu irmão Silvio.

## AGRADECIMENTOS

- A Deus por todas as oportunidades e graças concedidas em todos os momentos da minha vida.
- Ao Professor Dr. Silvio Roberto Andrietta por todo o conhecimento passado para a construção do projeto SEPPA, pela orientação e pela amizade.
- A minha amiga Lia Porto pelas várias vezes que me ajudou durante a fase de desenvolvimento do projeto e por todas as vezes que mostrou ser minha grande amiga.
- A Tatiana Ogawa e Érika Durão por todas as vezes que me ajudaram.
- A minha amiga Ariana por todos os momentos vividos juntas.
- A todos os amigos do Departamento de Bioprocessos do CPQBA e aos amigos Ivanildo e Amaro.
- A todos que de forma direta e indireta contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

"Só há duas maneiras de viver a vida :

A primeira é vivê-la como se os milagres não existissem,

A Segunda é vivê-la como se tudo fosse um milagre."

Albert Einstein

“Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações. Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos”.

Albert Einstein

## RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido o sistema especialista SEPPA para auxiliar no projeto de construção ou reforma de uma planta industrial para produção de álcool anidro e hidratado fazendo o dimensionamento dos equipamentos, especificando o consumo de energia, o consumo de água e a produção de vapor. Um sistema Especialista é um software que é projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação determinada do conhecimento humano. É capaz de emitir uma decisão, apoiado em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano. Uma vez que é gasto um grande tempo para realização dos cálculos de dimensionamento de equipamentos e que pessoas são suscetíveis a erros por diversos fatores, este trabalho será de grande auxílio a todos os profissionais que trabalham dimensionando equipamentos para produção de álcool diminuindo o tempo de cálculo e detalhes, garantindo a certeza e precisão em todas as respostas, preservando e reproduzindo o conhecimento do especialista da área em questão. Utilizou para desenvolvimento das telas de interface com o usuário a linguagem de programação Delphi 5.0 e para armazenamento de dados o sistema de banco de dados Interbase 6.0. O Delphi é uma linguagem de programação orientada a objetos, e nos permite trabalhar com a herança em telas proporcionando agilidade no desenvolvimento destas e na implementação de códigos em opções comuns a todos os formulários. O Interbase é um eficiente e seguro banco de dados Cliente/Servidor relacional. A base de conhecimento do sistema foi adquirida através da experiência acumulada de um Engenheiro Químico, este foi construído para processos contínuos e possui algoritmos contendo cálculos de balanço de massa, balanço de energia e equações cinéticas. Através dos testes realizados o software mostrou ser seguro e apto a projetar uma planta industrial, seus resultados foram coerentes com os dados obtidos através dos cálculos e especificações realizadas por meio de um projeto manual utilizando os mesmos parâmetros de entrada.

**PALAVRAS-CHAVES** - Sistema Especialista; produção de álcool; etanol.

## ABSTRACT

In this work it was developed a Expert System an help in the design to built-up or restaur of building or reform industrial plant for the production of anidro and hydrated alcohol defining the size of the equipments, specifying the energy and water consumption and the vapor production. An Expert System is a software projected and developed to attend a determined application and limited of the humans knowledge. It's able to emit a decision, supported at justified knowledge, from the base of information, exactly a specialist of a determined area of the human knowledge. The Expert System has its mechanism supported at the heuristic processes. The reasoning process is made the realization of the importance of the facts and comparing it with information contained in the knowledge accumulated about this facts and hypothesis. This reasoning is always based in the previous accumulated knowledge. A specialist with this process is not able to achieve a right decision if the facts that dispose to apply your previous knowledge are not sufficient, and can arrive at a wrong conclusion in function of many reasons. Since is spent a big time to perform the calculations for the dimensionation of equipments and that people are always susceptible at mistakes for many factors, this work will be of a significant help to all the professionals that working dimension at the equipments to the alcohol production diminishing the time of calculations and details, guaranteeing the right answer and the precision so, preserving and reproducing the specialist knowledge of the area in question. It was utilized for the development the Interface and the language of programation Delphi 5.0 and to the storage of data was used the database Interbase 6.0. Delphi is a language of programation oriented to objects, and it permits to work with the inheritance at hardware's providing agility in the development of this and the implementation of codes in common options at all the formularies. Interbase is an efficient and safe database Client/ Server. The base of knowledge of system was acquired through the experience accumulated of chemistry engineers in the design of continuous process and has algorithms containing of mass and energy balances as well as thus kinetic equation. Through the tests carried out the software showed be safe and apt to project an industrial plant, its results were coherent with the data obtained through calculus and specifications realized by means of a manual project using the same entrance parameter.

**KEY WORDS** – Expert System ; alchool production; ethanol

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Introdução, Objetivo e Organização</b> .....	<b>1</b>
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivo.....	3
1.3. Organização da Dissertação.....	3
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Revisão bibliográfica</b> .....	<b>4</b>
2.1. Introdução.....	4
<b>2.2. Origem e expansão da cana de açúcar</b> .....	<b>4</b>
2.3. Produção de álcool combustível no Brasil.....	8
2.4. Etapas da Produção de álcool.....	9
2.4.1. Recepção da cana de açúcar.....	13
2.4.2. Preparo da cana para moagem.....	13
2.4.3. Extração do caldo de cana.....	14
2.4.4. Moendas	14
2.4.5. Tratamento do Caldo.....	16
2.4.6. Fermentação.....	18
2.4.7. Destilação.....	22
2.4.9. Condensador.....	26
2.5. Sistema Especialista.....	26
2.5.1. Evolução dos Sistemas Especialistas.....	30
2.5.2. Arquitetura do Sistema Especialista.....	35
2.5.3. Representação do Conhecimento.....	37
2.5.4. Ciclo de vida de um Sistema Especialista.....	39
<b>2.6. Conclusão</b> .....	<b>41</b>
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>42</b>
<b>3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA</b> .....	<b>42</b>

3.1. Introdução .....	42
<b>3.2. Desenvolvimento .....</b>	<b>42</b>
3.3. Descrição do sistema, variáveis de entrada e resultados. ....	45
3.3.1. Moenda .....	45
3.3.2. Tratamento do Caldo .....	55
3.3.3. Fermentação .....	59
3.4. Conclusão .....	70
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>71</b>
<b>4. Considerações finais e Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>71</b>
<b>4.1. Considerações finais.....</b>	<b>71</b>
<b>4.2. Sugestões para trabalhos futuros.....</b>	<b>71</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Gráfico de Produção de Álcool no Brasil (bilhões de litros/ano) .....	9
Figura 2: Fluxograma geral do processo de fabricação do álcool .....	12
Figura 3 : Arquitetura do Sistema Especialista .....	35
Figura 4 : Atividades de desenvolvimento de um Sistema Especialista.....	39
Figura 5 : Fluxograma de fabricação do álcool .....	44
Figura 6: Modelo da tela de Menu .....	45
Figura 7: Fluxograma de questões referentes à moenda .....	47
Figura 8: Algoritmo utilizado para calcular o fator pressão .....	48
Figura 9 : Algoritmo utilizado para determinar a eficiência da moenda .....	51
Figura 10: Tela de resposta do módulo Moenda .....	54
Figura 11 : Fluxograma de questões referentes ao tratamento do caldo .....	56
Figura 12 : Respostas do cálculo do tratamento do caldo .....	59
Figura 13 : Fluxograma de questões referente à fermentação .....	60
Figura 14 : Resposta dos cálculos da Fermentação .....	63
Figura 15 : Fluxograma de questões referentes ao volume dos fermentadores.....	63
Figura 16 : Resposta apresentada na tela volume dos fermentadores .....	65
Figura 17 : Resposta contendo o dimensionamento dos fermentadores.....	66
Figura 18: Resposta do dimensionamento do trocador de Calor do Mosto .....	68
Figura 19 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 1 .....	68
Figura 20 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 2.....	69
Figura 21 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 3.....	69

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 : Produtividade de cana-de-açúcar.....	6
Tabela 2 : Produção de álcool .....	7
Tabela 3: Produção de Cana-de-açúcar (ton/ano).....	7
Tabela 4: Parâmetro do módulo Moenda .....	54
Tabela 5 : Dados utilizados na simulação do tratamento do caldo.....	58
Tabela 6 : Dados utilizados na simulação da Fermentação .....	62
Tabela 7 : Parâmetros Cinéticos .....	64
Tabela 8 : Estimativa dos parâmetros de conversão do substrato .....	65

# Capítulo 1

## 1. Introdução, Objetivo e Organização

### 1.1. Introdução

Existe um aumento crescente na quantidade de usinas de álcool implantadas no país, atraídas pelo alto consumo de álcool interno e externo. Com o aumento constante da produção de álcool se faz cada vez mais necessário desenvolver softwares para gerenciar, monitorar, e auxiliar o homem nos mecanismos de produção. Neste contexto, se inserem os sistemas especialistas.

No setor sucroalcooleiro, apesar de existir alguns sistemas especialistas desenvolvidos sendo utilizado com o objetivo de auxiliar os profissionais deste setor em sua tomada de decisão, ainda há uma carência muito grande em implantar sistemas especialistas nas mais diversas áreas de produção de álcool. Exemplos de sistemas especialistas neste setor são o sistema iCOL, que auxilia os profissionais do setor na definição otimizada da programação de corte de cana-de-açúcar de uma ou mais unidades produtoras de açúcar e álcool, dentro do horizonte de tempo de uma safra e o sistema iPlan, que consiste de uma aplicação voltada para o planejamento de reforma e plantio das áreas de cultivo de cana-de-açúcar em um horizonte de tempo de longo prazo de 5 ou 6 anos.

O campo da inteligência artificial, onde se enquadram os Sistemas Especialistas, preocupa-se com o desenvolvimento de programas computacionais que simulam o raciocínio humano. Isto requer a compreensão dos métodos humanos de resolução de problemas em áreas onde existe uma grande quantidade de conhecimento a ser manipulada e/ou existe um nível significativo de incertezas. Um especialista irá certamente restringir as alternativas, eliminando as que consideram menos relevantes e/ou reconhecendo modelos e etapas essenciais, usando seu conhecimento e regras práticas. A elaboração de um programa que faz a mesma coisa é estudo e criação de um Sistema Especialista, com uma base de conhecimento tão evoluída quanto a de um especialista, com grande potencial em “design” e operações de engenharia, não exigindo que o usuário seja um especialista.

A utilização dos Sistemas Especialistas começou na década de 70 e desde então estão em constante evolução. Há ferramentas sofisticadas para o desenvolvimento destes programas e computadores cada vez mais portáteis para fazer a sua utilização. O acesso das pessoas à tecnologia é amplo e cada vez mais se faz necessário utilizar programas inteligentes para tomar decisões. Os Sistemas Especialistas podem conter todo o conhecimento necessário para o design e elaboração de bons projetos, e, o que é mais importante, é acessível a praticamente qualquer profissional da área, mesmo para os que não possuem experiências anteriores. Para o usuário, um bom sistema especialista não requer conhecimentos aprofundados em informática, pois o programa é normalmente auto-explicativo e amigável. A simulação da construção de uma planta industrial para produção de álcool poderá ser feita mesmo quando o especialista não estiver presente, podendo ser realizada quantas simulações forem necessárias.

O sistema SEPPA (Sistema Especialista para Planta de Produção de Álcool), apresentado neste trabalho, foi desenvolvido após ter sido verificado a necessidade de um sistema especialista para auxiliar os profissionais no projeto e construção de uma planta para produção de álcool.

## **1.2. Objetivo**

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um Sistema Especialista para interagir com o usuário mediante perguntas referentes às variáveis do processo necessárias para efetuar os cálculos pertinentes ao caso simulado e, desta forma, auxiliar as tomadas de decisão nas diversas etapas de uma usina de álcool combustível na construção de plantas industriais. O sistema tem como módulos todos os setores da usina, como recepção de cana, moenda, tratamento do caldo, destilação e fermentação, integrados uns aos outros. No final de cada módulo é disponibilizado um relatório setorial e após executar todos os módulos o sistema disponibilizará todos os relatórios completos de balanço de massa, hídrico e energia. Equipamentos dos diversos setores do processo podem ser dimensionados através do balanço completo, quando serão considerados os balanços de massa globais de entrada e saída do processo. Através de um “help” em cada tela o usuário será orientado quanto ao significado de cada parâmetro solicitado.

## **1.3. Organização da Dissertação**

No capítulo 1, é apresentada a introdução da dissertação, os objetivos, as contribuições deste projeto e a apresentação de como esta dissertação está organizada.

O capítulo 2, aborda explicações de conceitos necessários para o entendimento deste trabalho através de uma revisão bibliográfica realizada em artigos, livros, teses, dissertações e outras publicações apresentando detalhamentos e definições dos principais assuntos abordados neste trabalho.

No capítulo 3, é apresentado um detalhamento do desenvolvimento do sistema SEPPA e explicações do funcionamento de todas as telas e variáveis de entrada e saída de dados. Como auxílio para melhor entendimento foi criado fluxogramas de todos os módulos existentes no sistema especialista.

As sugestões para trabalhos futuros e a conclusão final do trabalho são encontradas no capítulo 4.

# Capítulo 2

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1. Introdução

O presente capítulo é composto por uma revisão bibliográfica realizada através de buscas em acervos eletrônicos, teses, dissertações, artigos publicados, revistas e livros, fornecendo explicações de todos os dados necessários ao entendimento deste trabalho.

As informações contidas neste capítulo vão desde a origem da cana-de-açúcar, sua expansão, sua utilização e seu preparo para fabricação do álcool. Para melhor compreensão, foi utilizado um fluxograma geral do processo de fabricação do álcool.

Após explanar todo o processo de fabricação do álcool será demonstrado todas as fases de construção de um sistema especialista e sistemas especialistas já desenvolvidos.

### 2.2. Origem e expansão da cana de açúcar

A cana-de-açúcar pertence à imensa família das gramíneas, composta por partes subterrâneas e aéreas. Fazem parte da subterrânea as raízes e rizomas, e da aérea colmos, folhas e flores (DELGADO & CESAR. , 1977). O colmo é cilíndrico, ereto, fibroso e constituído de nós e internódios; a altura varia de 1,0 a 5,0 m; e o diâmetro pode variar desde menos de 1,0 cm até 5,0 cm. O colmo é o fruto agrícola da cana-de-açúcar em cujos vacúolos das células a sacarose se acumula no período de maturação (TAUPIER e RODRIGUES, 1999).

A cultura da cana-de-açúcar está alicerçada em variedades que são híbridas, obtidas por cuidadoso e criterioso trabalho de seleção. Além disso, as variedades têm um período útil de cultivo que é por volta de dez anos, quando então deverão ser substituídas, pois entram em degenerescência, isto é, perdem o seu vigor, diminuindo sua produção (MARCONDES et al., 2002). A cana plantada sofre 5 ou 6 cortes, a primeira cana cortada possui o nome de cana planta, e as canas provenientes do segundo corte em diante recebem o nome de cana-soca.

A cana-de-açúcar teve a sua origem na Ásia. Alguns autores, em dada época, afirmaram que a origem provável seria as regiões de Assam e Bengala, na Índia. Contudo,

pesquisas posteriores, indicaram a Nova Guiné, como a região de origem do gênero *Saccharum*, tendo em vista a grande diversidade genética ali encontrada, notadamente, de formas da espécie *Saccharum robustum*, que se supõe, deram origem à várias hibridações entre esta espécie e outros gêneros afins existentes naquela ilha. Esta diferença de opinião levou outros autores a discernirem "centro de origem" e "centro de diversidade", afirmando que a região de origem seria a Indonésia e que a Nova Guiné seria o seu centro de diversidade.

De qualquer maneira, a Índia foi, provavelmente, um importante centro de irradiação desta gramínea. Da sua região norte, a cana teria sido levada para a Pérsia (atualmente, Irã), por Alexandre Magno - O Grande -, tendo, posteriormente, atingido o Vale do Nilo, no Egito, onde se tornou uma importante exploração agrícola. Daí disseminou-se pelo norte da África, alcançando o sul da Europa. A partir da Índia, a cana também atingiu a China e as ilhas do Pacífico.

A introdução na América se deveu à Cristóvão Colombo, em sua segunda viagem, tendo sido, inicialmente, cultivada em São Domingos, que se constituiu no foco de irradiação para a América Central e norte da América do Sul.

Na América Espanhola, por volta de 1600, a produção açucareira chegou a tornar-se a maior indústria do mundo.

No Brasil, afirma-se, que coube à Martín Afonso de Souza a sua introdução, o que aconteceu na então Capitânia de São Vicente, pois, o primeiro engenho (São Jorge dos Erasmos) foi instalado neste local, no ano de 1533. O segundo engenho (Nossa Senhora da Ajuda) foi instalado em Pernambuco, por Jerônimo Albuquerque, em 1535. Segundo consta, os dois locais receberam mudas da Ilha da Madeira.

Nos anos que se seguiram, a cana se desenvolveu rapidamente naquela região do nordeste, graças à vantagem da menor distância em relação aos países importadores do açúcar da Europa, de tal forma que Pernambuco, até a década de 40, detinha a hegemonia da produção brasileira de açúcar.

A grande expansão ocorrida, mais recentemente, na região centro/sul do Brasil visto na Tabela 1 se deve ao clima, à topografia e à qualidade dos solos e, também, à maior disponibilidade de capital.

**Tabela 1 : Produtividade de cana-de-açúcar**

SAFRA	PRODUTIVIDADE MÉDIA (t/ha)	
	São Paulo	Centro/Sul
1998/1999	87,8	85,8
1999/2000	82,6	80,4
2000/2001	70,1	68,9
2001/2002	80,2	77,1
2002/2003	79,4	79,0
2003/2004	84,5	81,7
2004/2005	87,8	84,9
2005/2006	85,0	82,7

**Fonte: ORPLANA/2006**

O Estado de São Paulo conquistou a liderança absoluta neste setor, colocando-se como o segundo maior produtor do mundo, abaixo, apenas, da Índia. Considerando-se, porém, tão-somente a área estadual, sem dúvida, ela representa a maior concentração canavieira do mundo.

Segundo SAITO (2000), a indústria canavieira convive, no âmbito mundial, com as incertezas relativas às reservas mundiais de açúcar e de combustível, e, no âmbito nacional, com políticas protecionistas e diferenças regionais. No Brasil, 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, voltada para a produção de álcool como alternativa energética.

Como pode ser visto na Tabela 2, a produção de álcool teve sua produção aumentada na safra 2005/2006 15% em relação à safra 1998/1999, representando um aumento de aproximadamente em 2% ao ano.

**Tabela 2 : Produção de álcool**

	SAFRA		ÁLCOOL	
	C/SUL	N/NE	BRASIL	Evolução
98/99	12.281.000	1.631.000	13.912.000	100
99/00	11.634.000	1.146.000	12.780.000	92
00/01	9.076.019	1.496.050	10.572.069	76
01/02	10.156.994	1.335.585	11.492.579	83
02/03	11.154.068	1.440.729	12.594.797	91
03/04	13.024.018	1.740.068	14.764.086	106
04/05	13.613.029	1.825.711	15.438.740	111
05/06	14.341.430	1.594.452	15.935.882	115

**Fonte : ORPLANA/2006**

A produção de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo (242.828.824 toneladas), mostrado na Tabela 3, correspondeu, na safra 2005/2006 a 72% da produção da Região Centro/Sul e 62,8% da produção brasileira. A produção do álcool (9.951.893 m3) representou 69,4% da produção do Centro/Sul e 62,4% da produção brasileira.

**Tabela 3: Produção de Cana-de-açúcar (ton/ano)**

SAFRA	Região CENTRO/SUL		Região N/NE	BRASIL	
	São Paulo	Demais			
1998/1999	199.313.949	70.209.046	269.522.995	45.141.192	314.664.187
1999/2000	194.234.474	69.735.142	263.969.616	36.444.343	300.413.959
2000/2001	148.256.436	58.842.621	207.099.057	49.291.326	256.390.383
2001/2002	176.574.250	67.645.273	244.219.523	47.704.407	291.923.930
2002/2003	190.627.892	77.920.050	268.547.942	50.463.092	319.011.034
2003/2004	207.572.535	91.024.783	298.597.318	60.194.968	358.792.286
2004/2005	229.768.505	97.486.208	327.254.713	57.511.153	384.765.866
2005/2006	242.828.824	94.028.105	336.856.929	49.727.458	386.584.387

**Fonte: ORPLANA/ 2006**

### **2.3. Produção de álcool combustível no Brasil**

A produção de álcool combustível no Brasil, em quantidades comerciais, teve início em meados da década de setenta, com o lançamento do Plano Nacional do Álcool. O país contava, àquela época, com cerca de uma centena de usinas produtoras de açúcar, que também produziam álcool, em pequena quantidade. Tais usinas se localizavam particularmente no Nordeste e no Estado de São Paulo.

Com o lançamento do Proálcool, as usinas de açúcar existentes receberam financiamentos para instalar aparelhos de destilarias maiores. Ao mesmo tempo, foram criadas as Destilarias Autônomas, unidades de produção voltadas exclusivamente para a produção de álcool.

Estados como o Paraná e a região do Centro Oeste partiram de uma produção simbólica ou mesmo nula, para se tornarem grandes produtores. O Paraná conheceu um crescimento impressionante, tendo superado Alagoas pelo segundo lugar em produção nacional, só perdendo para São Paulo. Com exceção dos Estados de Acre, Rondônia e Tocantins, no Norte, e de Santa Catarina, no Sul, todos os demais Estados têm produção de álcool combustível.

Nesta época as unidades novas tinham capacidade instalada de produção padrão que ficava entre 120.000 l/dia e 180.000 l/dia. Produziam especialmente álcool hidratado (93% de álcool e 7% de água), destinado a carros movidos a álcool. Com a decisão do governo de misturar álcool na gasolina, para substituir o chumbo tetraetila (aditivo reconhecidamente cancerígeno), algumas usinas passaram a produzir também o álcool anidro (com 99,9% de álcool).

No processo de produção usado no Brasil, faz-se primeiro o álcool hidratado e, caso se deseje fabricar o anidro, o álcool produzido é levado a uma segunda coluna de destilação, que lhe retira o restante da água.

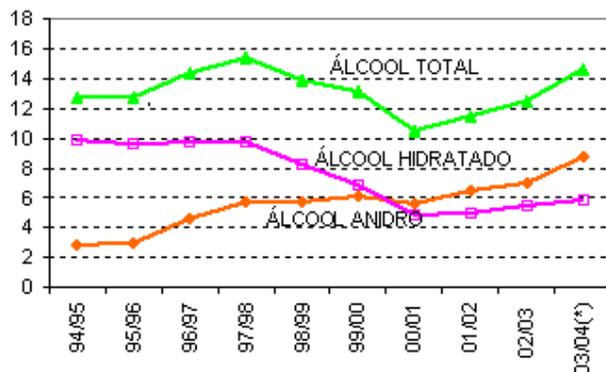
Com o passar do tempo, a maioria das usinas instaladas no Brasil passaram a produzir álcool anidro e hidratado e açúcar, dando ao Sistema um grande grau de flexibilidade.

Graças à sua localização geográfica e sua grande extensão territorial, o Brasil conta com dois períodos de safra distintos. As usinas do Norte/Nordeste colhem sua cana

no período que vai de novembro a abril, enquanto as do Centro/Sul têm safra de junho a novembro. Esta característica permite que uma região seja complementada pela produção da outra, em casos de má safra.

Apesar da desaceleração do Proálcool durante os anos 90, a produção de álcool se manteve, graças à mistura do álcool etílico anidro carburante na gasolina, cujo crescimento compensou a queda no consumo de álcool hidratado (Figura 1). Os avanços tecnológicos continuaram e o Brasil detém, hoje, supremacia na geração e difusão de tecnologias da cadeia açúcar/álcool de cana.

São crescentes os esforços em pesquisa e desenvolvimento tecnológico em todos os elos da cadeia: empresas privadas, universidades, institutos de pesquisa e governo (NEGRÃO e URBAN, 2004).



**Figura 1 : Gráfico de Produção de Álcool no Brasil (bilhões de litros/ano)**

Fonte: DAA/SPC/MAPA(\*)Valores na posição de 01/09/04.

#### **2.4. Etapas da Produção de álcool**

Através do controle e planejamento dos canaviais é montado um programa de corte baseado na maturação da cana. Como a maturação é um processo fisiológico, ele está sujeito a uma série de fatores controladores da maturação, podendo ser naturais ou artificiais. Dentre os fatores naturais se destacam a variedade, o solo, o clima, os tratamentos culturais, etc. Os maturadores artificiais são produtos químicos e hormonais que visam antecipar a maturação.

Depois de colhida, manual ou mecanicamente, a cana é transportada da lavoura até a unidade industrial por caminhões, que podem ter de um a quatro carrocerias, e

descarregadas diretamente na mesa auxiliar da esteira principal de alimentação da moenda. As canas podem ser lavadas ou não nessas mesas auxiliares. Existem atualmente sistemas de limpeza de cana a seco, através de ventilação que substituem a lavagem da cana, evitando a perda de sacarose através do arraste da água.

Após a lavagem, a cana passa por um processo de preparo, que consiste picadores que trituram os colmos e desfibradores que abrem as células da cana, preparando-a para moagem. Neste processo as células das canas são abertas sem perda do caldo.

A cana desfibrada é enviada à moenda para ser moída e ter o seu caldo extraído. Na moenda a cana desfibrada é exposta entre rolos submetidos a uma certa pressão, expulsando o caldo do interior das células, sofrendo várias compressões, resultando dessa operação de moagem, caldo misto e bagaço. Um conjunto de rolos (rolo superior, rolo inferior de entrada, rolo inferior de saída e rolo de pressão), constituem um terno de moenda. O setor de extração pode ter de 4 a 7 ternos. Para aumentar a extração da sacarose, é utilizado o sistema de embebição composta, que consiste na utilização de água no último terno, sendo o caldo extraído utilizado para embeber o bagaço do terno anterior, até o segundo terno.

O caldo extraído vai para o processo de tratamento do caldo e o bagaço para as caldeiras, onde é queimado para gerar vapor, servindo de combustível para a todo o processo produtivo.

Para todas as necessidades de energia do setor industrial a demanda é satisfeita com o uso de vapor, em diversos níveis de pressão, e de eletricidade. Pode-se em parte traduzir a eficiência energética de uma usina por seu excedente de bagaço, índice que depende das diversas eficiências setoriais da produção.

Outro parâmetro significativo da condição energética de uma usina é seu balanço de vapor, isto é, a relação entre o consumo e a disponibilidade nos diversos níveis de pressões em que o vapor é consumido (MACEDO, 1981).

Na maioria das usinas paulistas o vapor é gerado a alta pressão e expandido através de turbinas até uma pressão mais baixa utilizada no processo industrial das usinas. Através dessa expansão se gera potência mecânica para mover os picadores, desfibradores, moendas e alguns outros equipamentos. Além disso, parte do vapor é expandido através de turbogeradores, fornecendo energia elétrica auto-gerada para as usinas (SINICIO, 1992).

No tratamento do caldo, o caldo é aquecido a 105° C e utiliza-se óxido de cálcio (CaO), na forma de leite de cal (Ca(OH)<sub>2</sub>), polieletrólitos, que são polímeros de alta cadeia molecular ( 15 a 25 milhões de peso molecular) para coagulação e decantação das impurezas presentes no caldo. Após aquecimento e adição de produtos químicos o caldo segue para o decantador, onde ocorre a separação das impurezas, resultando em caldo clarificado e lodo. Após decantação, o caldo clarificado irá para pré-evaporação e o lodo para novo tratamento. Na pré-evaporação o caldo é aquecido a 115° C, onde há evaporação de água. Este aquecimento favorece a fermentação por fazer uma eliminação parcial das bactérias e leveduras selvagens que concorrerem com a levedura do processo de fermentação. O caldo quente que vem do pré-evaporador é resfriado em trocadores de calor e enviado às dornas de fermentação.

É na fermentação que ocorre a transformação dos açúcares em álcool. No processo de transformação dos açúcares em álcool há desprendimento de gás carbônico e calor, portanto é necessário que as dornas sejam fechadas para recuperar o álcool arrastado pelo gás carbônico e o uso de trocadores de calor para manter a temperatura nas condições ideais para as leveduras.

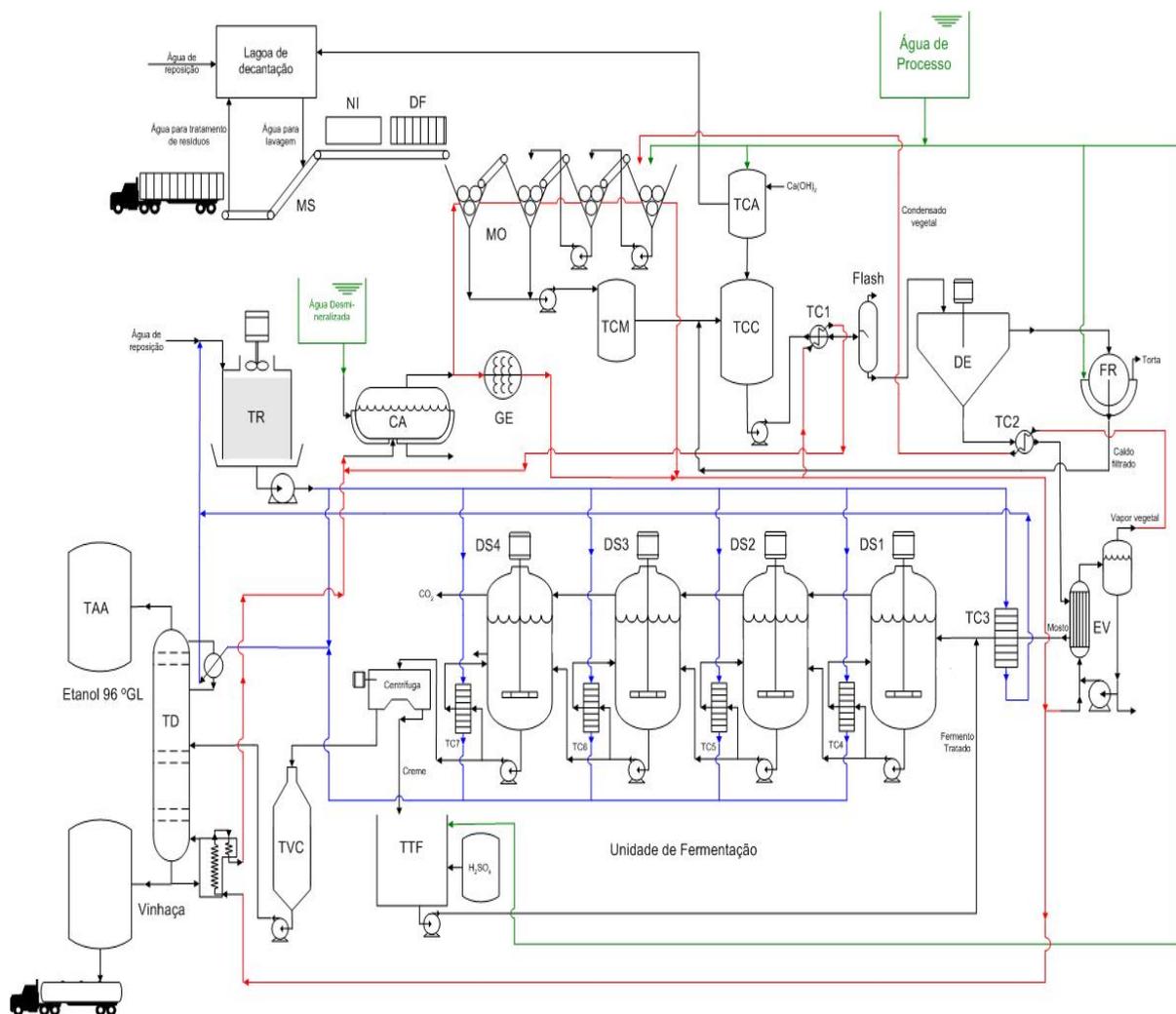
Após a fermentação a levedura é recuperada do processo por centrifugação, em separadores que separam o fermento do vinho. O vinho delevedurado irá para os aparelhos de destilação onde o álcool é separado, purificado e concentrado.

Na área de destilação, uma novidade desenvolvida no país já é responsável por quase um terço da produção. Trata-se de um processo de desidratação do etanol, conhecido como destilação extrativa, um método para produção de álcool anidro, que é adicionado à gasolina.

Depois da etapa de destilação, que separa uma mistura líquida de componentes em função da diferença de volatilidade entre eles, fazendo com que o de maior volatilidade se concentre no vapor e o de menor, no líquido, o etanol hidratado ainda tem cerca de 4% de água. Pela técnica de destilação extrativa, adicionamos um terceiro componente, o monoetileno glicol (MEG), que reduz a volatilidade da água, permitindo a vaporização do etanol. Em seguida, o álcool é condensado, gerando o etanol anidro. O monoetileno glicol, por sua vez, é purificado e retorna para a primeira fase do processo.

A desidratação do álcool pode também ser feita por peneiras moleculares, onde já existem muitas plantas em operação no Brasil e no mundo, que consiste na vaporização do álcool hidratado, fazendo-o passar por um leito de resinas, chamados zeólitos. Estes zeólitos são pequenas esferas (normalmente de 0,5 a 1,0 cm de diâmetros), que contém poros moleculares, onde a molécula de água se aloja, deixando livre a molécula de etanol que é maior, ocorrendo desta forma a desidratação. A regeneração das resinas, ou retirada da água do interior das resinas, é feito através de vácuo.

Através da Figura 2 podemos visualizar o fluxograma completo de fabricação do álcool.



**Figura 2: Fluxograma geral do processo de fabricação do álcool**

### **2.4.1. Recepção da cana de açúcar**

Os caminhões que transportam a cana até a usina carregam cana inteira (colheita manual ou cana picada em toletes de 20 a 25 cm (colheita mecânica)). Os mesmos são pesados antes e após descarregamento e algumas cargas são aleatoriamente selecionadas e amostradas, para posterior determinação do teor de sacarose na matéria-prima. O objetivo da pesagem é possibilitar o controle agrícola, o controle de moagem, o cálculo do rendimento industrial e, juntamente com o teor de sacarose na cana, efetuar o pagamento da cana.

### **2.4.2. Preparo da cana para moagem**

O objetivo da preparação da cana para moagem é aumentar a capacidade das moendas pelo aumento de densidade da massa de alimentação, tornando-a compacta e homogênea; romper a estrutura da cana fazendo com que a extração do caldo pela moagem seja mais fácil e efetiva e; produzir um bagaço, em que a ação da embebição seja mais eficaz.

Há um aumento na extração com o preparo da cana, pois rompe a estrutura do colmo, tornando mais fácil a liberação do caldo contido nas células. O preparo da cana pode ser feito utilizando facas rotativas e desintegradores.

Podemos classificar as facas rotativas em niveladoras e as cortadoras ou picadoras. As niveladoras têm por objetivos regularizar e uniformizar a carga da cana, descarregada no condutor principal, que forma uma massa volumosa e irregular. Nesse material as facas cortadoras irão trabalhar, reduzindo aquela massa homogênea e uniforme, que se distribuirá segundo a largura e o comprimento da esteira transportadora (DELGADO & CESAR, 1977). A movimentação das facas rotativas é realizada por motor a vapor, motor elétrico e turbinas a vapor.

Os desintegradores também são conhecidos por desfibradores ou 'shredders', são aparelhos que têm como objetivos destruir por completo a estrutura da cana, dando um ganho significativo na extração, correspondendo o que se obteria se mais um terno de moendas fosse acrescentado ao tandem. Esse acréscimo na extração é influenciado pelo maior número de células abertas e pela melhora da embebição (DELGADO & CÉSAR, 1977).

### **2.4.3. Extração do caldo de cana**

A extração do caldo de cana freqüentemente é feito pela moagem e constitui no primeiro passo para a fabricação do álcool. A cana após ser preparada pelas facas rotativas e pelos desintegradores, é encaminhada às moendas onde irá passar por várias compressões. O número de compressões será de acordo com o número de moendas (DELGADO & CESAR, 1977).

O processo de moagem é realizado em ternos, cujo número varia de 4 a 7. Um terno consiste em um conjunto de rolos montados numa estrutura denominada “castelos”. Para aumentar a eficiência da extração, realiza-se a embebição, que consiste em adicionar água ao bagaço para diluir o caldo remanescente, aumentando a extração de sacarose. O processo mais utilizado é a embebição composta, na qual se adiciona água no último terno e faz-se retornar o caldo extraído deste último para o anterior, e assim sucessivamente até o segundo terno. Normalmente o caldo dos dois primeiros ternos é misturado e constituem o caldo misto. Durante a passagem de cana pelas moendas ocorre uma queda dos fragmentos de cana ou bagaço, denominado bagacilho. A quantidade de bagacilhos deve ser controlada periodicamente, uma vez que a queda excessiva indica deficiência no ajuste das moendas. O bagacilho que deixa as moendas junto com o caldo misto deve ser peneirado e retornar para o processo de moagem, enquanto o caldo misto, já livre da maior parte do bagacilho, é enviado para a fabricação de álcool (DELGADO & CESAR, 1977).

### **2.4.4. Moendas**

Uma moenda é considerada uma unidade esmagadora, é de três cilindros ou rolos, dispostos de tal modo que a união de seus centros forma um triângulo isósceles.

Os cilindros recebem designações especiais de acordo com sua posição. O primeiro, de centro A, situado no plano inferior, é conhecido por cilindro anterior, alimentador, rola cana ou caneiro. O segundo, de centro B, situado no mesmo plano, recebe na prática o nome de cilindro rola bagaço, posterior, bagaceiro ou rolo de descarga. Esses dois cilindros movem-se no mesmo sentido. Sobre os dois cilindros inferiores, movendo-se em sentido contrário, localiza-se o cilindro superior, de centro C, conhecido por superior ou principal (DELGADO & CESAR, 1977).

Ao conjunto de dois ou mais ternos de moenda dá-se o nome de tandem. Este é conhecido de acordo com o número de cilindros que compõem a sua instalação e podem se classificar em:

- Tandem curto: 9 a 12 cilindros
- Tandem médio ou básico: 14 a 15 cilindros
- Tandem longo: 17 a 21 cilindros

As moendas são sempre conhecidas pelas suas dimensões, e sendo usual utilizar polegada como unidade de medida. As medidas de diâmetro e comprimento dos cilindros determinam entre outros fatores a capacidade da moenda. A relação entre o diâmetro e o comprimento deve ser proporcional para que se tenha um bom desempenho de todos os equipamentos relacionados.

A determinação da capacidade das moendas é influenciada pela sua velocidade. Esta pode ser:

- Periférica: entende-se por velocidade periférica, o caminho percorrido por um diâmetro primitivo de um cilindro, na unidade de tempo. É expressa em m/min.
- Angular: Entende-se por velocidade angular ou de rotação de uma moenda, o número de voltas dadas pelo cilindro em torno do seu eixo, sendo expressa em rotações por minuto ou simplesmente rpm.

A sua eficiência é medida através da quantidade extrativa de sacarose e a quantidade de matéria-prima trabalhada em uma determinada unidade de tempo devendo haver uma integração para não diminuir a quantidade de extração de sacarose ao tentar forçar a capacidade de moagem.

Por capacidade de moagem, entendem-se a capacidade de cana que pode ser moída, economicamente em um determinado tempo, pelas moendas de um tandem. Pode expressar a capacidade de moagem considerando-se o peso da cana em toneladas, a matéria prima como cana ou fibra e a unidade de tempo como hora ou dia.

O preparo da cana pode afetar a capacidade de moagem, por isso é muito importante fazer um bom preparo da cana antes desta passar pelo primeiro esmagamento, pois a estrutura física da cana apresenta resistência para liberar seu caldo pela ação

compressora dos cilindros. A cana bem preparada facilita a alimentação das unidades esmagadoras, pois, a camada de cana é mais regular e compacta.

A capacidade de moagem pode ser influenciada por muitos fatores, por isso é difícil determinar uma fórmula. As fórmulas utilizadas para o cálculo da capacidade de moagem levam em consideração a dimensão dos cilindros, fibra da cana, número dos cilindros, preparo da cana, velocidade dos cilindros, etc. Dentre elas, a mais utilizada é de HUGOT, conforme segue:

$$C = K \frac{c * n (1 - 0.06 * D * n) L * D^2 * \sqrt{N}}{f}$$

Onde,

C = capacidade de moagem em T.C.H.,

K = fator regional = 0.8,

n = rotação dos cilindros, em rpm,

c = fator de preparo da cana:

c = 1.20 (quando se usa dois jogos de facas),

c = 1.25 (quando se usa dois jogos de facas e u m desintegrados),

c = 1.15 (quando se usa um jogo de faca),

D = diâmetro dos cilindros, em m,

L = comprimento dos cilindros, em m,

f = fibra da cana, relacionada à unidade.

A potência total de cada tandem de moagem é dada pela soma da potência exigida em cada terno de moenda.

#### **2.4.5. Tratamento do Caldo**

As impurezas existentes no caldo da cana fizeram surgir sofisticados equipamentos nas usinas e destilarias para o tratamento do caldo. As impurezas insolúveis como areia, argila, bagacilho etc., cujos teores variam de 0.1 a 1% são tratadas através do peneiramento

e as impurezas solúveis são retiradas através do tratamento com produtos químicos, ou calagem, que consiste na adição de leite de cal ( $\text{Ca(OH)}_2$ )15% ao caldo, elevando o seu pH a 6,8 – 7,2.

Essas impurezas acabam por saturar o processo de fabricação de álcool, pois, comprometem a qualidade do produto final. As impurezas também prejudicam o bom funcionamento dos decantadores, os quais acabam por quebrar as palhetas até chegar às paradas e é onde se perde álcool.

Na parte de equipamentos, a utilização de filtros com esteiras é uma das novas tecnologias que está despertando interesse no setor. Por um bom tempo, as usinas utilizaram e ainda usam muito o filtro a tambor. O filtro de esteiras prensa as tortas de filtros e, basicamente, trabalham no seguinte conceito: as tortas de filtro são prensadas entre duas esteiras de lonas que são “esmagadas” por vários cilindros pesados. A torta de filtro faz esse “passeio” várias vezes até ficar com umidade de menos de 65%. Essa tecnologia, como muitas na área de filtro nasceu na área de papel e celulose. Também na parte de filtros, uma outra tecnologia que se encontra em desenvolvimento é o sistema gravitacional sem auxílio de vácuo forçado. O sistema apresenta novidades na parte de descarga de material particulado retido e é indicado para a filtração de grandes volumes de líquidos. No tratamento do caldo, o caldo é aquecido a 105°C sem adição de produtos químicos, e após isto, decantado. Ao sair da decantação, o caldo clarificado é encaminhado para a pré-evaporação onde é aquecido a 115°C, evapora-se a água e fica concentrado a de 20° a 30° Brix e o lodo é encaminhado para um novo tratamento.

O caldo quente que vem do pré-evaporador é resfriado em trocadores de calor e enviado às dornas de fermentação.

Os dois produtos mais utilizados para a clarificação do caldo são o ácido fosfórico e o enxofre. Estes produtos auxiliam na neutralização das cargas superficiais e formação de colóides. O fenômeno acontece devido à turbidez elevada do caldo. Uma das inovações nessa área é a adição de polietrólitos para fazer à mesma função que o enxofre e o ácido fosfórico: aglomerar impurezas do caldo. Entretanto, a adição de polietrólitos não tem dispensado o uso de cal para neutralização de acidez. A cal é um produto que contribui para formação de sólidos o que acarreta maior incrustação nos aquecedores e evaporadores

sendo necessária a limpeza num intervalo médio de 10 a 15 dias. Os polietrólitos atuam como agentes pré-coagulantes reduzindo o teor de sólidos do caldo.

#### **2.4.6. Fermentação**

Segundo LIMA et al. (2002) a fermentação alcoólica é a ação de leveduras sobre açúcares fermentáveis contidos em uma solução/suspensão. É um processo biológico no qual a energia formada por reações de oxidação pode ser utilizada para o crescimento das leveduras e a oxidação parcial anaeróbia da D-glucose utilizada para a produção do álcool e do Gás Carbônico.

Leveduras são fungos unicelulares que pertencem a um grande grupo heterogêneo de organismos eucarióticos. A levedura mais utilizada na produção do álcool é a *Saccharomyces cerevisiae*, ao serem selecionadas sob alto controle tecnológico permitem um bom rendimento industrial.

##### **2.4.6.1. Processo Fermentativo Contínuo**

Segundo ANDRIETTA (1994), o processo de fermentação alcoólica contínua pode ser dividido em três partes: unidade de tratamento ácido, unidade de separação de células de leveduras e fermentadores. As células de leveduras, após terem sido submetidas ao tratamento ácido (fermento tratado), deixam as unidades de tratamento e são misturadas com o meio de alimentação (mosto). Esta mistura é então enviada aos fermentadores. A fração entre a vazão de fermento tratado e a vazão total de alimentação dos fermentadores é chamada de taxa de reciclo. Depois de ocorrida a transformação dos açúcares em álcool, o vinho fermentado contendo células de leveduras (vinho bruto) é enviado para a unidade de separação. Esta unidade é constituída de separadoras centrífugas de prato que trabalham a uma velocidade angular de 8000 rpm. Estas separadoras recebem o vinho bruto contendo de 30 a 45 g de células por litro de vinho e fornecem 2 produtos: uma fase leve e outra pesada.

A fase pesada contendo entre 160 a 200 g de células por litro é chamada de creme de levedura. Este creme é enviado para a unidade de tratamento ácido. A fase leve, praticamente isenta de células de levedura (concentração máxima permitida 3 g de células por litro) é chamado de vinho delevedurado e é enviado ao tanque pulmão da unidade de destilação, também chamada de dorna volante.

LIMA, et al. (2002) As dornas de fermentação são recipientes nos quais se processa a fermentação alcoólica. São construídas em chapas de aço ao carbono, cilíndricas, com altura igual a uma vez e meia ou, duas vezes, o seu diâmetro, em média.

O número total de dornas de fermentação e o volume relativo de cada uma delas tem sido objeto de estudo para diversos pesquisadores. GHOSE & TYAGI (1979) concluíram que na operação utilizando-se duas dornas iguais em série, o volume total de reatores é 58% menor que se usando um reator. Em trabalho de simulação, ANDRIETTA (1994) concluiu que o sistema ótimo é constituído por quatro reatores de mistura perfeita ligados em série com 1.5; 1.9; 2.2; e 1.45 hora de tempo de residência.

GUERREIRO (1995) cita que o avanço tecnológico gerado pela adoção de técnicas modernas (cinética microbiana adequada, otimização, simulação de processos via computador e projetos específicos) aliados à fermentação contínua, pode trazer os seguintes benefícios: modernização da usina; redução dos gastos de mão de obra; aumento de produtividade; trabalho em estado estacionário; redução de insumos; uniformidade do produto; maior controle operacional do processo.

CYSEWSKI & WILKE (1978) e MAIORELLA et al. (1984) realizaram estudos comparativos e avaliações econômicas dos diversos processos existentes para a produção de álcool via fermentativa. Ambos os trabalhos citam que os gastos com matérias primas (principalmente melaço) representam cerca de 70% do custo total de produção do álcool, mas melhorias são observadas nos processos contínuos em relação ao processo batelada.

MAIORELLA et al. (1984) simulando uma destilaria para produção de 109 l/ano de álcool 95% p/p, concluíram que o custo total de produção na fermentação contínua com reciclo de células operando com concentração celular de 100g/l e produtividade de 42.5 g/l.h é de \$0.49/l, e para uma fermentação contínua com concentração celular de 20g/l e produtividade 14.1g/l.h está em \$0.51/l, enquanto que para uma fermentação batelada tradicional cuja concentração celular no final da fermentação é de 21 g/l e produtividade 11.8g/l.h é de \$0.53/l. Porém ganhos significantes no investimento de capital fixo são demonstrados por CYSEWSKI & WILKE (1978). Estes demonstraram uma redução de 57% no capital investido em destilarias contínuas quando comparadas ao processo de batelada tradicional. Reduções maiores, na ordem de 68 e 71% são conseguidas

respectivamente para os processos via fermentação contínua com reciclo de células e de operação a vácuo.

Como demonstrado por PAIVA *et al.* (1996) é possível operar um reator tipo torre com alta concentração de células e alta produtividade (18 g ETOH/l x h) utilizando decantadores como unidade de separação quando a cepa de levedura utilizada possui características floculantes, o que diminuí os custos de produção deste combustível.

Segundo ZAPERLON & ANDRIETTA (1992) vários processos para fermentação contínua tem sido utilizados e alguns dos quais não tiveram êxito. Os principais processos podem ser divididos em dois grupos: Fermentação em dorna única onde todo o processo é realizado numa única dorna, de mistura completa, onde o teor de açúcares e de álcool é constante e Fermentação em cascata onde as dornas individuais são conectadas em série, passando-se consecutivamente de uma para outra, assemelhando-se a uma “cascata”.

#### **2.4.6.2. Fermentação em Dorna Única**

Três processos de fermentação em dorna única foram testados no Brasil: Biostil, Hoechst-Uhde e Fercen. ZAPERLON & ANDRIETTA (1992) descrevem as principais características de cada um desses processos:

Processo Biostil: Foi desenvolvido pela Alfa-Laval e no início dos anos 80 introduzido no Brasil através da Codistil. O Processo visa o processamento de subprodutos com alto brix e a recirculação de vinhaça para a preparação do mosto e desta forma, produzir baixos volumes de vinho. Devido a alta pressão osmótica do meio, é utilizada uma levedura específica para aquelas condições. O creme de leveduras obtido das separadoras de fermento é reciclado sem diluição. Ácido sulfúrico é utilizado de forma a manter um pH de 4.5. O processo Biostil foi abandonado, devido às dificuldades de se manter condições estáveis na fermentação.

Processo Hoechst-Uhde: Este processo visa eliminar o uso das separadoras de fermento e, para isto, uma levedura floculante é utilizada. O fermentador é basicamente uma torre onde o diâmetro no topo era maior que o corpo, objetivando servir como separador das leveduras. O vinho saindo da torre é enviado para outro tanque de sedimentação para nova separação de leveduras, que são recicladas ao fermentador principal. Ácido sulfúrico e eventualmente ácido fosfórico são adicionados para manter o

pH em 4.0 durante a fermentação. As dificuldades de operação do sistema devido a performance irregular, baixo teor alcoólico e baixa eficiência levaram ao abandono do processo.

Processo Fercen : O processo Fercen introduzido pelo Engenho Novo, opera com fermentadores individuais em paralelo, onde a fermentação é feita em dornas agitadas. A concentração de açúcar é mantida abaixo de 1 g/l. O vinho saindo das dornas é enviado para separadoras de fermento, sendo o creme de leveduras reciclado, sem diluição, às dornas. Eventualmente ácido sulfúrico é adicionado usando-se misturadores.

#### **2.4.6.3. Fermentação em Cascata**

Na essência, todos os processos de fermentação em cascata são similares, sendo as principais diferenças nas estratégias de superar o acúmulo de sólidos no fundo das dornas e do número de estágios que utilizam. Onde boas condições de operação estão presentes, a fermentação em cascata mostra um comportamento muito ativo, especialmente no primeiro e segundo estágios onde grande desprendimento de dióxido de carbono pode ser observado.

Todos os processos de fermentação em cascata praticados no Brasil operam com reciclagem das leveduras para obter alta velocidade de fermentação e alto teor alcoólico (10 °GL), com eficiências normalmente na ordem de 90% (ZAPERLON & ANDRIETTA (1992)).

#### **2.4.6.4. Processo Batelada Alimentada ou Melle-Boinot**

Um grande avanço na produção de álcool foi alcançado na década de 30, quando surgiu na França o processo Melle-Boinot. O processo Melle-Boinot foi introduzido com o intuito de aumentar a produtividade em relação à batelada, que tem baixa produtividade e é lenta. Este tipo de processo tem como principal característica o reciclo do fermento. No final da fermentação, a levedura é separada do vinho fermentado por meio de uma centrifugação ou sedimentação e reciclada para o início do próximo ciclo (GUERREIRO, 1999).

Uma inovação do processo foi a utilização de um tratamento ácido (pH entre 2.5 e 4.5) do creme de leveduras, com a finalidade de eliminar contaminantes e utilização deste como inóculo para a próxima batelada (DREWS, 1964).

Segundo ALMEIDA (1960) citado por ANDRIETTA (1994) o processo possui as seguintes vantagens: economia de açúcar devido à menor reprodução celular, elevando o rendimento do álcool; eliminação de contaminantes pela centrifugação do meio fermentado (separação de células de levedura); fermentação mais pura devido ao tratamento do leite de levedura (tratamento ácido); eliminação da necessidade de cultura pura no preparo do “pé de cuba”, prática exigida no processo clássico, diminuindo, portanto a complexidade das operações na planta; grande potencial para a automação de processos e redução de custos operacionais.

Entretanto, apesar dos ganhos obtidos em rendimento, operacionalidade da planta e tempos de processamento, estudos realizados com fermentação contínua demonstraram um grande potencial para a automação de processos e redução de custos de produção.

#### **2.4.6.5. Processo Batelada Alimentada Estendida**

O processo batelada alimentada estendida é um processo intermediário entre a batelada alimentada e o contínuo. As modificações realizadas no processo Melle-Boinot deixaram o sistema fermentativo contínuo, porém com reciclo total de células. Desta forma, mantêm-se altas concentrações celulares e o álcool produzido é constantemente retirado do sistema. A concentração celular tende a crescer continuamente. No entanto, a prática demonstra que um patamar é atingido, onde a concentração se mantém constante.

#### **2.4.7. Destilação**

Destilação é um dos processos utilizados para separar misturas por diferença de volatilidade de seus componentes onde a mistura líquida é vaporizada no fundo da coluna (refervedor) e os componentes separados nesta operação são recolhidos em reservatórios após serem condensados num condensador, geralmente localizado no topo da coluna (CUNHA, 1996).

Segundo GUERREIRO (1999) o fator termodinâmico de intensidade que possibilita a separação de duas ou mais espécies químicas por destilação é a volatilidade relativa, que está associada a diferenças de ponto de ebulição às mesmas pressões. Se não houver diferença nos pontos de ebulição, é absolutamente impossível separar-se por destilação.

A destilação é o método de separação mais utilizado na indústria de processamento(CUNHA, 1996).

A separação por destilação pode ser realizado de diversos modos, uns mais simples, outros mais complexos, dependendo do tipo de mistura que se deseja separar e do grau de separação adequado. Desse modo, a destilação pode classificar-se em função do número de componentes envolvidos: binária e multicomponente e podem se realizar num único estágio (destilação de equilíbrio) ou em múltiplos estágios, diferencial (colunas de recheio) ou incremental (colunas de prato). É realizada a altíssimos vácuos (destilação molecular), vácuos moderados (destilação á vácuo), a pressão ambiente, a pressões moderadas, e a pressão altas e altíssimas.

Em um processo de destilação de álcool o caldo de cana fermentado entra constantemente na parte de cima da coluna de destilação, e o vapor entra em sua parte de baixo. A evaporação do vinho (caldo de cana fermentado) separa o álcool do vinhoto (sobra do processo), que se condensa nas bandejas da coluna. O álcool então é retirado, neste estágio chamado de álcool hidratado. Para obter o álcool anidro (99°), é necessário mais um estágio de destilação e a utilização de catalisadores para retirada de água. O processo é contínuo, isto é, a saída de produto é constante (Álcool hidratado) dependendo da quantidade de matéria-prima de entrada (caldo de cana fermentado) e da energia fornecida ao sistema (vapor de água supersaturado). Parte do vinhoto que sobra no processo é reprocessado, isto é, volta ao topo da coluna. O que sobra é usado como fertilizante nas plantações de cana-de-açúcar.

Pensando de forma mais global, podemos definir as indústrias como sendo de produção contínua ou descontínua. Porém em suas etapas de produção, mesmos as indústrias chamadas de produção contínua como uma petroquímica, podem ocorrer processos internos de produção em lote.

Em escala industrial existem diferentes equipamentos, chamados de "colunas de destilação", indicados para cada caso. O projeto dessas colunas baseiam-se em (a) princípios termodinâmicos e (b) análise dos fatores que influenciam a operação dos equipamentos e visam, sempre, alcançar a separação desejada de modo eficaz.

### **2.4.7.1. Destilação Multicomponente e Complexa**

Multicomponente é toda separação que envolve três ou mais componentes definidos como espécies químicas e; complexas é todo sistema que tem componentes individuais de identidade desconhecida, tendo suas propriedades não utilizadas na avaliação das propriedades do sistema.

### **2.4.7.2. Destilação fracionada**

A destilação fracionada é empregada quando a diferença entre os pontos de ebulição do líquido da mistura é menor que 80° C. Um aparelho mais sofisticado e um pouco mais de tempo são necessários. A principal diferença em um aparelho de destilação fracionada é a presença de uma coluna de fracionamento. O objetivo desta coluna é criar várias regiões de equilíbrio líquido-vapor, enriquecendo a fração do componente mais volátil da mistura na fase de vapor.

### **2.4.7.3. Destilação Reativa**

Destilação reativa são todos os processos químicos que utilizam como reator uma coluna de pratos. Muito utilizado nas reações de esterificação:



### **2.4.7.4. Destilação Azeotrópicas e Extrativas**

As destilações azeotrópicas e extrativas estão relacionadas há muitas décadas na tecnologia e nos estudos referentes à obtenção de álcool anidro. A destilação azeotrópica necessita da adição de um agente externo para modificar os coeficientes de atividade, e produzir novos equilíbrios. Nesta modalidade um azeótropo binário é rompido por um agente incorporado ao sistema, para formar outro azeótropo; todos os componentes têm por pontos de ebulição próximos, e os azeótropos tem composição definida a uma pressão dada, já na destilação extrativa agrega-se como agente separador um composto com ponto de ebulição muito maior que os dos componentes a serem separados.

A composição do destilado não depende das condições da destilação, mas também da quantidade de agente separador empregado.

Na destilação azeotrópica a volatilidade relativa entre os componentes a serem separados é aumentada pela adição do “entrainer” que forma um azeótropo com um dos componentes. Como o processo envolve equilíbrio heterogêneo líquido-líquido geralmente um decantador-condensador é necessário.

O agente separador (“entrainer”) geralmente deve dar origem a uma mistura azeotrópica ternária, de preferência heterogênea e a uma fase vapor em equilíbrio com duas fases líquidas, que é retirada pelo topo da coluna principal e separada em um decantador. No caso do álcool, é necessária a destilação da fase aquosa resultante numa coluna auxiliar, isto permite recuperar o álcool e o aditivo nela presentes, os quais retornam à coluna principal, juntamente com a fase orgânica retirada diretamente do decantador. Por meio do azeótropo ternário formado, o agente separador atua como agente de arraste: carrega para o topo da coluna a água e pequena parte do álcool alimentado na coluna, permitindo que o restante do álcool seja obtido, na forma anídrica, no fundo da coluna.

Segundo GUERREIRO (1999), os seguintes itens são desejáveis na seleção de um agente extrator:

- Alta seletividade, ou seja, grande capacidade de alteração do equilíbrio original com uso de pequenas quantidades de solvente;
- Alta capacidade para dissolver os componentes da mistura;
- Baixa volatilidade, para minimizar sua presença na fase vapor;
- Recuperabilidade, deve ser facilmente separado da mistura e, em particular, não deve formar azeótropos com nenhum dos componentes a separar;
- Baixos custos;

#### **2.4.7.5. Destilação diferencial (Destilação em coluna de recheio)**

Também conhecida como destilação simples, é uma das técnicas habituais de desenvolver destilações em escala laboratorial, por exemplo, na determinação de álcool em soluções alcoólicas.

É um processo que permite a separação de um líquido de uma substância não volátil (tal como um sólido, p.ex.), ou de outro(s) líquido(s) que possui(em) uma diferença no ponto de ebulição maior do que cerca de 80o C. É um método rápido de destilação, e

deve ser usado sempre que possível - é uma técnica rápida, fácil e, se respeitado seus limites, eficaz.

Este é um processo que se enquadra dentro das generalidades dos processos à batelada, nos quais uma ou mais, ou até todas as variáveis mudam de valor com o tempo.

Em operações envolvendo pouco material a construção de colunas de recheio é muito simples.

#### **2.4.8. Balão de Destilação**

A solução a ser destilada é aquecida no balão de destilação. Aumentando-se a temperatura da solução, esta chega a ebulição, e o vapor é forçado a passar pelo condensador. Dentro do balão são adicionadas algumas pedrinhas de porcelana, que, devido à alta porosidade fornecem uma grande superfície de contato para as micro bolhas que se formam na solução, controlando-as, evitando um excesso de turbulência na ebulição.

#### **2.4.9. Condensador**

O condensador é um tubo de vidro cercado por um fluxo contínuo de água termostaticada. O vapor, vindo do balão, entra em contato com as paredes frias do condensador e condensa. O líquido é, então, recolhido no recipiente. Este líquido é chamado destilado, e o líquido remanescente no balão é chamado resíduo de destilação.

### **2.5. Sistema Especialista**

O termo Inteligência Artificial surgiu em 1956, de uma reunião feita nos Estados Unidos que contou com cientistas de várias áreas do conhecimento, todos interessados no mesmo objetivo, no estudo de como poderiam ser criadas máquinas inteligentes, e de como estas afetariam os processos existentes. Para CHARNIAK e MCDERMOTT (CHARNIAK 1985), Inteligência Artificial é o ramo da Ciência da Computação voltado para o estudo das faculdades mentais através do uso de modelos computacionais. Esses modelos são sistemas de computação inteligentes, isto é, apresentam características associadas à inteligência no comportamento humano, como compreensão de linguagem, aprendizado, raciocínio, resolução de problemas, etc (BARR 1986).

Segundo BARR & FEIGENBAUM (1986) Inteligência Artificial é a parte da Ciência da Computação que compreende o projeto de sistemas computacionais que exibam características associadas, quando presentes no comportamento humano, à inteligência.

Sobretudo, deve ser entendida como a criação de sistemas que não possuam somente características procedimentais, tendo também, capacidades de ir além dos processos estabelecidos pelo desenvolvedor humano, aprendendo, se adaptando e tomando decisões.

A robotização, o auxílio a projetos de engenharia e o auxílio à própria programação de computadores são algumas das aplicações práticas da Inteligência Artificial. Esta tecnologia permite a criação de programas mais "inteligentes", entre os quais os Sistemas Especialistas capazes de tarefas complexas, como um diagnóstico médico ou uma decisão financeira, administrativa e comercial. Atualmente, os grandes centros de informática dos Estados Unidos, Japão e Europa aplicam Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas na solução de problemas empresariais.

Sistema é a disposição das partes, ou elementos, de um todo coordenadas entre si, que funcionam como uma estrutura organizada. Especialista é a pessoa que se consagra com particular interesse e cuidado a certo estudo. Pessoa que tem habilidade, ou prática especial, em determinado assunto, conhecedor, perito. (FERREIRA, 1994).

Sistemas Especialistas são sistemas que solucionam problemas que, normalmente, apenas pessoas especialistas conseguem resolver (FEIGENBAUM, 1971). Sistemas Especialistas são classificados como um ramo da Inteligência Artificial (PINHEIROS,1995).

Os Sistemas Especialistas são enriquecidos pelo conhecimento de peritos em campos específicos, auxiliando os processos de tomada de decisão (BARRELLA,2000). Possuem um corpo de conhecimento de alto nível sobre um domínio limitado. São aplicáveis na resolução de problemas reais complexos, que exigem alta capacitação (WATERMAN, 1986).

Um Sistema Especialista é um software que é projetado e desenvolvido para atender a uma aplicação determinada e limitada do conhecimento humano. É capaz de emitir decisão, apoiado em conhecimento justificado, a partir de uma base de informações, tal qual um especialista de determinada área do conhecimento humano. O Sistema

Especialista possui o seu mecanismo apoiado em processos heurísticos. É um sistema de informação baseado no conhecimento que utiliza seu conhecimento sobre uma área de aplicação específica e complexa para atuar como um consultor especializado para os usuários finais. Os Sistemas Especialistas fornecem respostas a questões de uma área problema muito específica, fazendo inferências de tipo humanas sobre conhecimento contido em uma base de conhecimento especializado. Estes sistemas capturam o know-how de um especialista ou grupo de especialistas em um sistema de informação computadorizada. Dessa forma ele consegue superar o desempenho de um especialista humano isolado em muitas situações problemáticas. Isso porque o Sistema Especialista é mais rápido e mais consistente (O'BRIEN, 1936 ). Em síntese, podemos interpretá-los como sistemas computacionais que simulam o conhecimento de um especialista dentro de um domínio particular.

Num contexto prático, uma das características importantes de um sistema especialista é ser capaz de dar explicações. Da mesma forma que um especialista humano deve poder explicar suas conclusões e seu raciocínio, um sistema especialista deve ser capaz de dar explicações concisas e detalhadas. Outras razões fazem com que as explicações sejam importantes:

- Os aspectos legais, éticos ou morais de uma tomada de decisão ainda continuam como sendo próprios de humanos;
- E a justificativa para uma resposta é uma contribuição importante de um sistema desta natureza.

Atualmente, os sistemas especialistas são vistos como ferramentas utilizadas na ajuda à tomada de decisões e não para arcar com a responsabilidade das mesmas. E é isso mesmo que parece ser desejável em certos domínios, ou talvez mesmo em todos eles.

Os dois traços principais que diferenciam os sistemas especialistas dos programas computacionais convencionais ou algoritmos são:

- eles se servem de heurísticas;
- eles são pilotados pelos dados e não pelos procedimentos.

Os especialistas não se contentam em seguir um conjunto de regras. Eles têm uma visão interna dos problemas e são capazes de se servir de seus julgamentos profissionais.

Eles utilizam heurística ao invés de algoritmos. No algoritmo admite-se que há uma meta ou um tipo de resposta e implanta-se uma série de ações que leva a esta meta. Os problemas intelectuais pedem uma solução que seja adequada e não "a resposta".

As qualidades de um especialista compreendem a capacidade de escolher o melhor caminho entre diversas possibilidades, utilizando os melhores estímulos entre os que se dispõe. Ter uma visão interna é a capacidade de perceber as relações significantes, as quais podem existir entre eventos ou índices que são ligados de um ponto de vista utilitário, mas não forçosamente lógico. Não há regras que definam um tal enfoque. Isso implica que deve-se avaliar o ganho potencial de vários caminhos tendo em vista o objetivo. Se um caminho promissor não dá em nada, pode ser necessário voltar atrás e se tentar um outro caminho. Esses métodos guiados pela inspiração ou por métodos empíricos são chamados heurísticas.

A heurística é uma palavra grega que significa servir para descobrir. Ou seja, usam-se informações que não são necessariamente definitivas, mas que podem levar à solução do problema muito mais rapidamente do que uma pesquisa a ser feita, em todo o nível do conhecimento. Mesmo que haja solução, os métodos heurísticos não garantem uma solução ótima, mas frequentemente produzem resultados satisfatórios num espaço de tempo razoável. A heurística é uma exploração dirigida. É considerada uma abordagem inteligente do problema porque, em geral, exige menos esforço para atingir a solução. Porém, todos os métodos heurísticos devem contar com algum meio de saber quando a busca aproxima-se do objetivo (GOMES,1995) citado por BRITO (2002).

Os especialistas trabalham servindo-se de índices que eles dispõem. Às vezes, esses índices são fornecidos pelo cliente que, expondo seu problema, fornece ao especialista todos os fatos ou dados que ele tem em mão. A partir destes dados, o especialista vai então fazer algumas perguntas e chegar, num certo momento, a uma conclusão sobre o problema. Um sistema especialista deve, portanto poder responder a estímulos externos. O caminho que ele toma e os resultados obtidos dependem bastante dos dados fornecidos.

O nível de desempenho de um Sistema Especialista é função principalmente do tamanho e da qualidade do banco de conhecimento que possui (HARMON,1988). A qualidade e a abrangência de sua base de conhecimento é diretamente responsável pelo seu

sucesso, e não os formalismos e processos de inferência que ele emprega. Mas não é fácil introduzir o conhecimento em um computador. Vários pesquisadores de Inteligência Artificial têm dedicado grande parte de seu tempo às pesquisas de aprendizado de máquinas, ou seja, aos métodos de aquisição automática de conhecimentos (BRITO,2002).

Para medir o desempenho de um sistema especialista há vários critérios, tais como: porcentagem de acertos, capacidade de evitar erros de conseqüências graves, reconhecimento das próprias limitações, entre outros (HAYES, 1983).

Os Sistemas Especialistas vem sendo comercializados e usados por profissionais das mais diversas áreas. Seus desempenhos competem com os de profissionais humanos. Uma característica muito importante é a rapidez com que as respostas devem ser obtidas (YAMAKI, 1990).

### **2.5.1. Evolução dos Sistemas Especialistas**

Na década de setenta, houve uma revolução na área computacional, culminando com a criação dos Sistemas Especialistas, estes sistemas utilizavam uma linguagem para representar o conhecimento do especialista de forma análoga aos predicados lógicos e empregavam algum método de raciocínio heurístico (FLORES, 2000).

Os primeiros Sistemas Especialistas que obtiveram sucesso em seu objetivo foram o sistema DENDRAL (FEIGENBAUM *et al.*, 1971) e MYCIN (SHORTLIFFE, 1976). O sistema DENDRAL é capaz de inferir a estrutura molecular de compostos desconhecidos a partir de dados espectrais de massa e de resposta magnética nuclear. O sistema auxilia médicos na escolha de uma terapia de antibióticos para pacientes com bacteremia, meningite e cistite infecciosa, em ambiente hospitalar. O sistema MYCIN foi desenvolvido para fazer o diagnóstico de infecções bacterianas no sangue e prescrever as drogas para seu tratamento. A partir deste sistema, foi desenvolvido uma shell, chamada Emycin que serve para implementar outros Sistemas Especialistas, acrescentando ao software padrão apenas a base de conhecimentos (BRITO, 2002).

Outros sistemas que obtiveram sucesso na área médica que podem manipular, com êxito, domínios de problemas complexos, além de proverem facilidades de explicação, facilitando o seu uso por não especialistas são, o HEPAR para doenças do fígado e do trato biliário e o ONCOCIN (para planejar o tratamento de pacientes com câncer linfático).

Pode-se citar ainda o sistema especialista SETA, sistema de apoio à prescrição de fármacos em transtornos afetivos (FLORES 1994) (FLORES 1995) e o SEAMED baseado em regras que utiliza regras de produção.

Na década de oitenta, os Sistemas Especialistas ficaram em evidência graças ao seu conhecimento (GOMES, 1995). Desde então, muitos Sistemas Especialistas foram desenvolvidos para resolver problemas em muitos domínios diferentes, incluindo: agricultura, química, sistemas de computadores, eletrônica, engenharia, geologia, gerenciamento de informações, direito, matemática, medicina, aplicações militares, física, controle de processos e tecnologia espacial. Alguns destes sistemas, como o sistema XCON/R1 (MCDERMOTT, 1982) para a configuração de computadores VAX da empresa DEC, e PROSPECTOR (HART et al., 1978) para a análise das possibilidades de se encontrar tipos específicos de depósitos minerais em uma dada área, revelaram-se altamente lucrativos do ponto de vista comercial. Os sistemas especialistas são frutos de mais de vinte anos de pesquisa, e seu uso tem se difundido por todo o mundo, obtendo-se sucesso.

Em Singapura, desde 1980, têm-se utilizado Sistemas Especialistas, os quais são usados em setores bancários, áreas financeiras, na manufatura, dentre outros. Pode-se citar alguns dos importantes Sistemas Especialistas desenvolvidos em Singapura: (i) "Audit Expert System", no setor de contabilidade, (ii) "Credit Evaluation", no setor bancário, (iii) "Intelligent Fuzzy Logic Tutor", no setor de educação.

No Japão, tem-se desenvolvido um grande número de Sistemas Especialistas para diagnósticos, planejamento, escalonamento e para indústrias pesadas. Aplicações de lógica difusa estão se multiplicando, principalmente na área de eletrodomésticos.

Na Alemanha, os Sistemas Especialistas são utilizados principalmente para as indústrias pesadas e o uso da lógica difusa está crescendo rapidamente.

Nos Estados Unidos existem várias tendências no uso dos Sistemas Especialistas, como por exemplo: (i) um movimento contínuo em direção à integração e aos sistemas híbridos; (ii) ênfase para o problema de "solução de negócios"; (iii) crescimento da tendência de sistemas de informação "ativos", amplas bases de conhecimento, compartilhamento deste conhecimento e sistemas inteligentes híbridos; (iv) necessidade de

fornecer suporte de alto nível para pesquisa em Inteligência Artificial; (v) uso de metodologias estruturadas para desenvolvimento de Sistemas Especialistas.

Tem havido sucessos significativos no desenvolvimento de softwares conhecidos como Sistemas Especialistas ou Sistemas Baseado em Conhecimento. Avanços em tecnologias de Sistemas Especialistas têm sido alcançados por pesquisadores em universidades, centros de pesquisa e empresas interessadas no desenvolvimento de sistemas de Inteligência Artificial, auxiliados pelo contínuo e acelerado avanço tecnológico dos computadores, que a cada ano se tornam mais poderosos em termos de velocidades, capacidade de processamento e armazenamento de dados, e ao mesmo tempo, cada vez menores, mais baratos e sem exigir infra-estruturas especiais para operarem, aliados ainda, a softwares que propiciam melhores ambientes computacionais para o desenvolvimento e execução desses sistemas (PINHEIRO,1995).

Os Sistemas Especialistas no Brasil têm sido muito utilizados em áreas como indústria, educação, medicina, comércio, finanças e jurídica, agrícola, engenharia, ou seja, em quase todos os segmentos onde se requer um especialista. Sua utilização destaca-se, especialmente, em sistemas de apoio à decisão. As aplicações resultam em projeções, diagnósticos, prognósticos, monitoração, simulação, manutenção, treinamento e controle. Abaixo temos alguns Sistemas Especialistas desenvolvidos:

O Sistema Especialista SPERIL-1 realiza uma avaliação das estruturas que estão sujeitas a terremotos, ISHIZUKA *et al.* (1981). O sistema determina o quanto as estruturas estão danificadas a partir dos dados de inspeção e das medições de aceleração. A perícia deste sistema consiste em conhecimentos coletados de engenheiros civis experientes e inclui relações entre o amortecimento estrutural e a rigidez. O sistema usa fatores de certeza combinados com Lógica Fuzzy para calcular o quanto a estrutura está danificada.

O Sistema Especialista NPPC (Nuclear Power Plant Consultant), auxilia os operadores de usinas nucleares a determinar a causa de eventos anormais através da aplicação de regras e do modelo de operação da usina. O sistema usa um modelo primário do sistema de refrigeração para diagnosticar a causa de anormalidades ou acidentes. O sistema inclui bombas, reator, geração de vapor e sistema de refrigeração do núcleo de emergência. Baseado neste modelo, o sistema sugere procedimentos para a correção do problema (UNDERWOOD, 1982)

Um sistema denominado MAX (Sistema Especialista para determinação de Umidade) foi desenvolvido, com o objetivo de selecionar a melhor localização de pontos de amostragem em plataformas petrolíferas do Mar do Norte. Este sistema permite a uma determinação correta dos pontos de amostragem, conduzindo a uma determinação mais confiável dos teores de água em gás natural e glicóis encontrados nas plataformas de extração de petróleo (WADE, CROUCH & BETTERIDGE, 1988).

PASQUINI (1994) desenvolveu um programa gerenciador de biblioteca de espectros e de um programa especialista para identificação de grupos funcionais de compostos orgânicos a partir de espectros de infravermelho. Este sistema que teve o objetivo de identificar, automaticamente, grupos funcionais de compostos orgânicos através de dados obtidos de espectros de infravermelho. Uma vez que o espectro digitalizado é colocado na forma de uma lista (formato requerido pelo prolog), o programa pode ser utilizado para interpretação do espectro através de regras baseadas em conhecimento de um especialista humano. Esta interpretação possibilita a identificação dos grupos funcionais presentes no composto que deu origem ao espectro.

GUERREIRO (1995) desenvolveu um sistema especialista para o design de unidades industriais de produção de álcool, utilizando o Shell PcPlus da Texas Instruments.

GOMES (1995) desenvolveu um sistema especialista para diagnosticar problemas em máquinas rotativas, baseado em uma representação do conhecimento de incertezas. Foi utilizada a teoria dos questionários a fim de se obter a otimização do processo de consulta.

PINHEIRO (1995) desenvolveu um Sistema Especialista para operação de subestações de energia elétrica. No seu desenvolvimento uniu-se técnicas de Inteligência Artificial a técnicas de otimização. Este Sistema Especialista funciona como um monitor. Ele supervisiona todas as ações sobre a subestação, permitindo ou não certas manobras e sugerindo planos de manobras para isolamento de equipamentos para reparo, reenergização (restauração) e colocação de equipamentos em manutenção.

LACERDA (1997) desenvolveu um protótipo de Sistema Especialista para auxílio e diagnóstico de defeitos de um conversor didático e modular. Neste sistema, foram utilizados diagramas e tabelas ordenados em passos, formando uma sugestão e metodologia para a construção de pequenos Sistemas Especialistas.

KROST *et al.* (1998) desenvolveram um Sistema Especialista para diagnóstico de falhas e restauração de uma rede de 400KV. Este sistema leva de 1 a 3 segundos para diagnosticar a falha. O tempo de execução para restauração depende do tipo de falha e do estado da planta. O sistema pode ser facilmente modificado para possibilitar implementações de outras redes.

FILHO (1999) desenvolveu um sistema especialista para especificação de parafusos de união. O objetivo principal deste sistema é o dimensionamento e a especificação do conjunto parafuso e porca hexagonal, mais adequado às condições de operações especificadas pelo projetista. Também é possível fazer o estudo, para uma mesma montagem, das tensões atuantes nos elementos da junta, no parafuso e nos filetes da rosca, utilizando vários materiais disponíveis no programa.

KIM (2000) apresentou um sistema especialista para forjamento a quente com rebarba, denominado convencional, de peças axissimétricas em que obtêm as geometrias da pré-forma e final do forjado bem como as matrizes correspondentes, o volume do tarugo e também a carga necessária de forjamento. Este sistema foi escrito utilizando-se FORTRAN e AutoLISP e integrado ao ambiente AutoCAD.

BRITO (2002) desenvolveu um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnostico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos. Onde teve o objetivo de consolidar a aplicação de técnicas preditivas e desenvolver técnicas computacionais, baseadas na inteligência artificial, para detecção e diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos, visando sua inclusão em programas de Manutenção Preditiva.

FRANCO (2003) desenvolveu um sistema inteligente para auxiliar a escolha de sistema para produção no Mar. Esse sistema possui um ambiente inteligente para otimizar a escolha dentre alternativas em projeto de sistemas marítimos de produção através do uso do conhecimento especialista sobre processos e procedimentos técnicos e ambientais que envolvem a produção de óleo e gás. Para a modelagem do conhecimento especialista e para o desenvolvimento do sistema inteligente utilizou-se a teoria de conjuntos nebulosos e raciocínio aproximado.

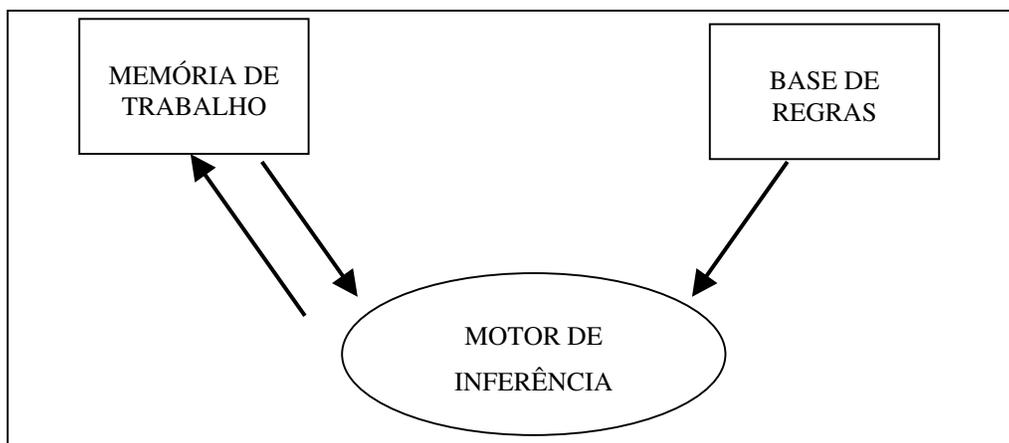
FILHO (2003) desenvolveu um Sistema Especialista para o Forjamento a quente de precisão. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema especialista para o forjamento a quente de precisão (APFFQ) de engrenagens modeladas pelo software

SolidEdge v. 3.5, com interface gráfica programada por rotinas do Visual Basic v. 5.0. O uso deste sistema demonstrou que o tempo total necessário para o desenvolvimento de um novo processo é reduzido significativamente se comparado ao tempo observado na atual prática industrial.

COSTA (2004) desenvolveu um modelo baseado em conhecimento para simular rebanhos de bovinos de corte. Este trabalho apresenta uma abordagem sobre técnicas e ferramentas computacionais, utilizadas no desenvolvimento de modelos de simulação e, também, uma metodologia de suporte ao desenvolvimento de projetos. Um modelo de simulação de produção de bovinos de corte foi desenvolvido utilizando conceitos de simulação e de sistemas baseados em conhecimento com o suporte da metodologia SimuCAD: simulação e computação gráfica aplicadas ao estudo de sistemas produtivos, adaptada para atuar na produção agropecuária.

### 2.5.2. Arquitetura do Sistema Especialista

Um Sistema Especialista atual, conforme mostrado na Figura 3, apresenta, em geral, uma arquitetura com três módulos: uma base de regras, uma memória de trabalho e um motor de inferência. A base de regras e a memória de trabalho formam a chamada base de conhecimento do Sistema Especialista, onde está representado o conhecimento sobre o domínio. O motor de inferência é o mecanismo de controle do sistema que avalia e aplica as regras de acordo com as informações da memória de trabalho.



**Figura 3 : Arquitetura do Sistema Especialista**

É necessário organizar a estrutura lógica do conhecimento, e colocar o conhecimento em forma de regras que dão o caminho para que o mecanismo de inferência

possa usá-las. Na organização de estrutura lógica do conhecimento, a seqüência de controle total no contexto de sistema de produção e detalhe da estrutura de base de dados devem ser determinados primeiro. Em Sistema Especialista a determinação de conhecimento não deve ser difícil, e elas devem ser facilmente modificadas se necessário (NIIDA et al., 1986).

Uma base de conhecimento contém fatos (ou asserções) e regras. Os fatos são informações de curto prazo. Podem alterar-se rapidamente durante o curso de interação do usuário. As regras são informações de prazo maior. Direcionam os Sistemas Especialistas em como gerar hipóteses a partir do que realmente é conhecido, ou criar fatos novos.

A memória de trabalho no modelo generalizado pode conter qualquer tipo de estrutura de dados. Mais do que estruturas de dados, as memórias de trabalho de Sistemas Especialistas devem respeitar um método de representação do conhecimento, isto é, uma linguagem formal e uma descrição matemática de seu significado. A lógica de primeira ordem é um exemplo típico de formalismo de representação de conhecimento.

A base de regras passa a conter condições que representam "perguntas" à representação de conhecimento da memória de trabalho. A sintaxe das regras varia de acordo com o sistema e pode ser bastante flexível e próxima da linguagem natural, como nos sistemas ROSIE (FAIN et al., 1982) e G2 (GENSYM, 1982), ou bastante formais, como na família de sistemas OPS (FORGY et al., 1977).

O motor de inferência controla a atividade do sistema. Esta atividade ocorre em ciclos, cada ciclo consistindo em três fases:

- Correspondência de dados, onde as regras que satisfazem à descrição da situação atual são selecionadas.
- Resolução de conflitos, onde as regras que serão realmente executadas são escolhidas dentre as regras que foram selecionadas na primeira fase, e ordenadas.
- Ação, a execução propriamente dita das regras.

A chave para o desempenho de um Sistema Especialista está no conhecimento armazenado em suas regras e em sua memória de trabalho. Este conhecimento deve ser obtido junto a um especialista humano do domínio e representado de acordo com regras formais definidas para a codificação de regras no Sistema Especialista em questão. Isto

divide um Sistema Especialista em duas partes: a ferramenta de programação que define o formato do conhecimento da memória de trabalho e das regras, além dos aspectos operacionais de sua utilização; e o conhecimento do domínio propriamente dito.

### **2.5.3. Representação do Conhecimento**

A representação do conhecimento é um processo interativo. O conhecimento especializado tem sido geralmente representado como um conjunto modular de regras com conclusões relativamente bem estabelecidas e aceitas. Uma consideração importante na seleção de uma representação deve ser a facilidade com a qual o conhecimento pode ser modificado e atualizado.

Uma preocupação padrão no desenvolvimento de qualquer SE está na forma de como atualizar sua ampla e crescente base de conhecimento. Uma solução proposta universalmente é o uso de uma ferramenta de aquisição de conhecimento. Esta ferramenta interage com especialistas do domínio, organiza os conhecimentos que adquire, e gera um Sistema Especialista. Uma ferramenta também pode ser usada para testar e manter o programa que ele gera. O aspecto interessante deste tipo de ferramenta é que o especialista do domínio pode utilizá-la para atualizar uma base de conhecimento sem ter o conhecimento básico sobre as técnicas de Inteligência Artificial. (FLORES, 2000)

Uma ampla base de conhecimentos pode ser mantida através de sua organização, de acordo com as diferentes funções que o conhecimento representa. Funções do conhecimento, unidades organizacionais da base de conhecimentos são explicitamente formuladas de acordo com a definição de um método de solução de problemas.

Normalmente, não é muito difícil obter o conhecimento de um especialista. O maior problema é sua perfeita estruturação. O conhecimento precisa ser aplicado ao problema de forma correta. O primeiro passo, na satisfação desta necessidade, está em identificar, explicitamente, o método de solução do problema apropriado para a tarefa, e os tipos de conhecimento relevantes para este método. Logo que isto é realizado, torna-se muito fácil a construção de uma base de conhecimento (FLORES, 2000).

Finalmente, o último passo seria substituir o engenheiro do conhecimento por um sistema automatizado, provendo ao projetista, seja especialista do domínio ou engenheiro do conhecimento, uma ferramenta de programação. A conquista deste último objetivo está

vinculada a duas características de processos de aquisição de conhecimento em geral: (1) conhecimento incerto: quando especificando a solução de um problema, através das relações entre eventos, o especialista pode em algum momento encontrar-se inseguro sobre a natureza dessas associações e eventos; (2) conhecimento incompleto: o especialista durante um processo de descrição de um problema, pode vir a esquecer alguns detalhes relevantes ao processo.

O problema da incerteza se reflete no fato de que os especialistas não estão acostumados a expressar sua forma de resolver um problema, pois muitas vezes é um processo automático (intuitivo). Outro ponto a ressaltar diz respeito à forma com que descrevem seu conhecimento especialista. O conhecimento incompleto é o problema de como identificar falhas ou conhecimentos incorretos. Desta forma, uma ferramenta de aquisição de conhecimentos necessita ser capaz de permitir o crescimento incremental da base de conhecimentos, o refinamento do conhecimento existente, e, em certos momentos, a correção de conhecimentos existentes.

Os problemas de incerteza e de conhecimento incompleto dominam duas fases de desenvolvimento no processo de aquisição de conhecimento: (1) a coleta de informações para a construção de uma base de conhecimento inicial; e (2) o refinamento iterativo desta base de conhecimento.

A linguagem utilizada para fazer a representação do conhecimento deve ser versátil e sofisticada; deve prover apoio com variáveis tanto numéricas quanto cadeias de vários tipos distintos. As variáveis escolhidas devem ser flexíveis para a troca de conhecimento entre o sistema e o usuário, os valores permitidos para os parâmetros numéricos devem ser estabelecidos numa declaração de variação. O projetista pode especificar que os parâmetros numéricos podem ser calculados e deduzidos a partir de uma regra ou da solicitação do usuário. A aplicação pode dar valor às variáveis perguntando ao usuário final.

Extremamente importante é uma série completa de operadores lógicos que pode ser utilizada na criação de regras no banco de conhecimento, evitando a duplicação de regras. Exemplos são os operadores E/OU, o OU EXCLUSIVO, e a NEGAÇÃO.

Os métodos de raciocínio não podem ser completamente independentes da classe de problemas que eles têm que resolver. Ao mesmo tempo, os procedimentos de raciocínio

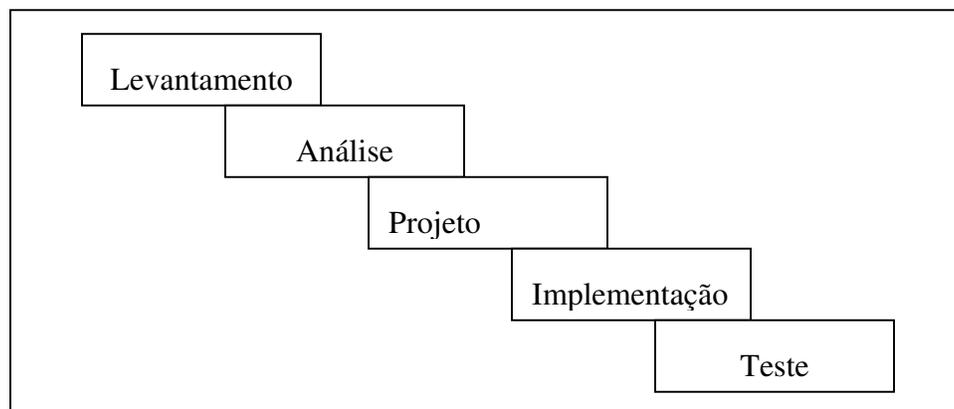
não devem ser tão específicos para determinado problema que se tornem inaplicáveis em outros casos. Um modo muito natural de expressar conhecimento inferido é a formação de regras If - Then (Se - Então), onde o If é o antecedente que expressa a condição e o Then é o conseqüente que expressa a conclusão ou o próximo passo (GUERREIRO, 1999).

Quando uma regra (<RULE>) com validade condicional é encontrada, uma ação é executada e um fato (<fact>) é criado. A descrição da regra é adicionada racionalmente ao fato, de modo que ele seja apto a explicar por que chegou a esta conclusão ( PAPAFOTIOU et al. 1992).

#### 2.5.4. Ciclo de vida de um Sistema Especialista

Qualquer que seja o método escolhido para o desenvolvimento de um software, estará espelhado em um ciclo de vida de desenvolvimento. Esse ciclo de vida pode ser entendido como um roteiro de trabalho, constituído em geral de macro-etapas com objetivos funcionais na construção de um software, onde também é possível visualizar-se a interdependência existente entre as macro-etapas (TONSIG, 2003).

Todo projeto é executado mediante algum tipo de análise de sistema, projeto e implementação, mesmo que isso não seja feito exatamente da maneira mostrada na figura 4. É importante que você veja na Figura 4 que ela é um fluxo de dados e não um fluxograma; não existe implicação que toda a atividade N deva terminar antes do início da atividade N + 1. Ao contrário, a rede de fluxos de dados interligando atividades implica em que algumas atividades podem ser executadas em paralelo (YOURDON, 1990).



**Figura 4 : Atividades de desenvolvimento de um Sistema Especialista**

O desenvolvimento de qualquer sistema informatizado precisa ser muito detalhado para poder automatizar de forma exata o processo manual. A metodologia de desenvolvimento de um Sistema Especialista é o mesmo que se aplica ao desenvolvimento de todos os tipos de software encontrado no mercado profissional e acadêmico e como pode ser visto na Figura 4 requer várias atividades. Todas as atividades precisam ser cumpridas de forma rigorosa para obtenção de um bom resultado.

*Levantamento de informação:* Esta atividade envolve o levantamento das exigências funcionais do sistema, o estabelecimento do que se espera que o Sistema Especialista faça.

Essa atividade é também conhecida como estudo da viabilidade ou estudo inicial das atividades. O levantamento ocupa, tipicamente, somente 5% a 10% do tempo e dos recursos de todo o projeto, e para os pequenos e simples pode não ser também uma atividade formal. Entretanto, mesmo que não venha a consumir muito do tempo ou dos recursos o levantamento é uma atividade crítica (YOURDON, 1990).

*Análise:* Busca transformar suas principais entradas, critérios do usuário e previsão do projeto, em uma especificação estruturada. Faz uma descrição formal do que o sistema deverá fazer, independente da natureza da tecnologia que será utilizada para implementar os requisitos exigidos.

*Projeto:* Nesta fase é feita a definição e modelagem do banco de dados, é escolhida a ferramenta de desenvolvimento do sistema. Em muitos casos é desenvolvido um protótipo para se ter idéia da abrangência do Sistema Especialista.

No interior de cada tarefa, a atividade de projeto ocupa-se com o desenvolvimento de uma hierarquia apropriada de módulos de programas e interfaces entre esses módulos para implementar a especificação criada na atividade de levantamento e análise de dados. Além disso, a atividade de projeto ocupa-se em com a transformação de modelos de dados em um projeto de banco de dados (YOURDON, 1990).

A capacidade do programador em implementar um sistema de alta qualidade e livre de erros depende sobremaneira da natureza do projeto criado pelo projetista. Analogamente, a capacidade de manutenção em fazer alterações no sistema depois que ele entrar em operações depende da qualidade do projeto (YOURDON, 1990).

*Implementação:* Essa atividade inclui a codificação das regras, codificação de todos os algoritmos de cálculos e a integração de todos os módulos.

*Teste:* Nesta atividade são testados todos os módulos dos Sistemas Especialistas para livrar este de erros antes de chegar ao uso do usuário final.

Os testes podem ser realizados em paralelo com as atividades de projeto e implementação. Os testes, como o próprio nome diz, envolvem a experimentação do sistema para ver se ele produz as saídas correspondentes e apresenta o comportamento correto para um grande número de entradas (YOURDON, 1990).

O processo de testes provavelmente ocupará cerca de metade do cronograma de desenvolvimento do sistema, dependendo do cuidado com que tenham sido executadas as atividades iniciais. Mesmo no caso de ter sido executada uma tarefa perfeita de análise de sistemas, projeto e programação, é preciso algum esforço para verificar se não há erros. Se, por outro lado, tiver sido feito um mau serviço, então os testes tornam-se iterativos: a primeira rodada de testes denuncia a presença de erros e as rodadas subsequentes verificam se os programas corrigidos já estão funcionando corretamente (YOURDON, 1990).

## **2.6. Conclusão**

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos referentes ao processo de fabricação do álcool e sobre os sistemas especialistas, quais são as suas fases de vida e como é feita a representação do conhecimento. No próximo capítulo será apresentado como o sistema especialista SEPPA foi desenvolvido.

# Capítulo 3

## 3. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

### 3.1. Introdução

Neste Capítulo, são abordadas as ferramentas utilizadas no desenvolvimento do Sistema Especialista SEPPA e explicações sobre a implementação do sistema. Através de explicações dos fluxogramas do processo utilizados no sistema será possível entender a seqüência dos módulos. Todos os valores solicitados deverão ser informados para o funcionamento do sistema, estes valores são trazidos na tela como valores padrões determinados pelo profissional especialista do processo representado neste trabalho e poderão ser alterados de acordo com a necessidade do usuário. Este sistema não possibilita simular dados setoriais independentes dos módulos anteriores.

Em cada tela de questão há um botão de ajuda contendo explicações sobre o processo, que tem o intuito de ajudar o usuário na tomada de decisão e no entendimento do processo. Os conteúdos das explicações foram obtidos através de bibliografias do setor e de especialistas. A explicação de todas as variáveis solicitadas facilitará o uso do sistema SEPPA. Após encerrado a simulação do módulo não é permitido a alteração dos dados.

### 3.2. Desenvolvimento

Para desenvolvimento do sistema especialista SEPPA foi utilizado como ferramenta de desenvolvimento Delphi versão 5 e como base de dados o Interbase versão 6.

O Delphi é uma linguagem de programação orientada a objetos, e nos permite trabalhar com a herança em telas proporcionando agilidade na construção destas e na implementação de códigos em opções comuns a todos os formulários. Por ser uma ferramenta que possui suporte e integração completa com a plataforma Windows, ela traz consigo todas as ferramentas para geração de aplicativos que se vê na maioria dos programas para este sistema operacional. Delphi versão 5.0. foi a linguagem de desenvolvimento de software utilizada para desenvolver as telas de interação com o usuário do Sistema Especialista SEPPA. Os valores das variáveis de entrada e saída de dados são armazenados no repositório de dados Interbase versão 6.0.

O Interbase é um eficiente e seguro banco de dados Cliente/Servidor relacional. Este banco de dados dispensa maiores estruturas de preparação para uso ou manutenção feitas por profissionais responsáveis e especializados em administrar o banco de dados e dispensa o uso de super-servidores. Utiliza pouco espaço em disco para sua instalação e pouca memória em situações normais de uso. Por isso a plataforma necessária para a sua instalação e utilização pode ser reduzida diminuindo consideravelmente os custos do projeto. O Interbase possui o seu código distribuído gratuitamente pela Internet (Open Source) sendo que as licenças de utilização e distribuição são gratuitas. Outra grande vantagem do Interbase é ser Multiplataforma, ou seja, funciona em diversos sistemas operacionais, dentre eles destacamos o Windows e o Linux.

O desenvolvimento do sistema SEPPA seguiu todas as fases de desenvolvimento de um software. Na fase de levantamento de dados do sistema SEPPA foi especificado qual seria o objetivo do sistema, quais as necessidades que deveriam ser atendidas, quantos módulos existiriam no sistema e qual ferramenta de desenvolvimento e banco de dados seriam utilizados para melhor atender a aplicação. Para o desenvolvimento da base de conhecimento foi pesquisado e utilizado trabalhos desenvolvidos na área de produção de álcool. Em seguida foi montado os cálculos dos balanços de massa, balanço de energia e balanço hídrico junto com o engenheiro especialista e determinado quais seriam as variáveis de entradas e os valores sugeridos (“defaults”) pelo sistema. Nesta fase foi utilizada a planilha do Excel para simular alguns cálculos, como por exemplo, a capacidade da moenda e a área do trocador de calor.

A partir da especificação de todos os módulos a serem desenvolvidos indicando para cada um as formas de entrada e saída de dados e até mesmo a estrutura lógica foi elaborado a base de dados, isto é, a base de conhecimento onde na criação dos campos estabeleceu-se os tipos destes dados (numéricos, literais, etc.) e a quantidade de casas numéricas permitidas nos cálculos.

Na fase de construção do projeto desenvolveu-se a interface homem-máquina procurando uma interação amigável com o usuário, interação feita mediante telas de questionamentos de variáveis necessárias para o cálculo do processo. Estas telas estão constituídas por botões de ajuda para explicar os parâmetros de entrada e botões de navegação entre as telas. Determinou-se também nesta fase os caminhos lógicos que o

sistema tomaria de acordo com a resposta do usuário, havendo uma preocupação constante em manter uma padronização em telas.

Neste trabalho, a fase de implementação de regras e testes foi realizada em paralelo, pois depois de construído o protótipo implementou-se as regras dando funcionamento ao sistema e realizou-se testes com dados reais validando o sistema.

No sistema SEPPA antes de cada módulo é aberto um fluxograma setorial do processo com explicação do processo de trabalho da etapa em questão. O fluxograma mostrado na Figura 5 contém explicação do processo completo de fabricação do álcool e é aberto logo após o usuário dar início ao sistema.

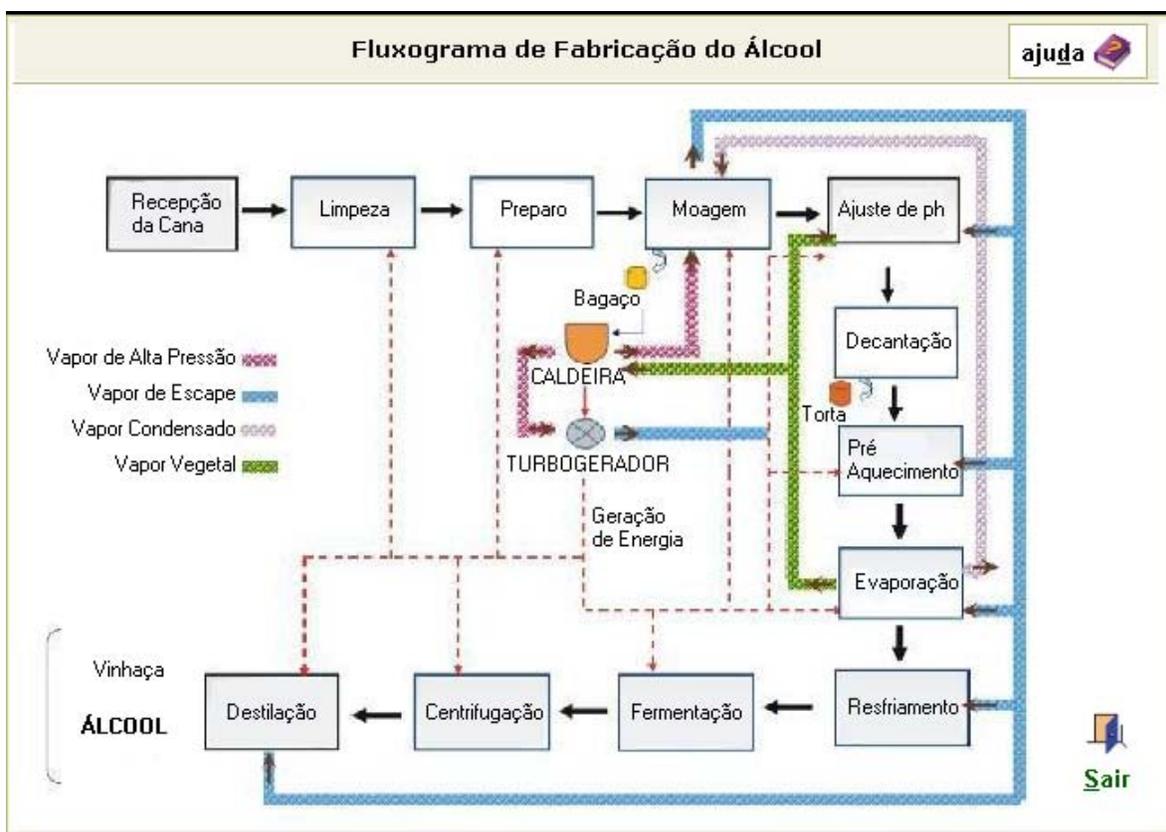
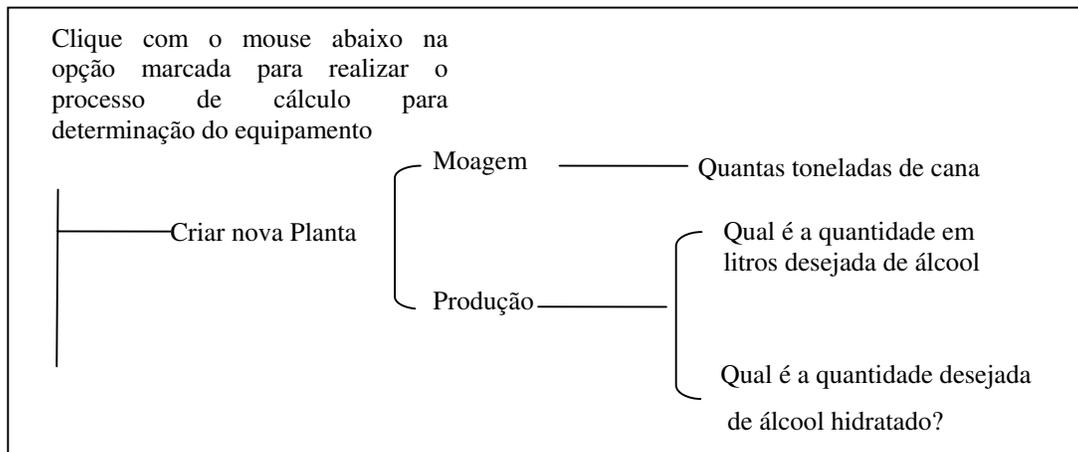


Figura 5 : Fluxograma de fabricação do álcool

### 3.3. Descrição do sistema, variáveis de entrada e resultados.

#### 3.3.1. Moenda

A primeira tela de interação com o sistema SEPPA é a do menu, mostrada em forma de fluxograma na Figura 6. Através desta tela o usuário irá escolher se deseja realizar os cálculos pela quantidade de cana a moer ou pela quantidade de álcool a produzir.



**Figura 6: Modelo da tela de Menu**

Os dois caminhos distintos para realização dos cálculos ao escolher criar nova planta são:

- Moagem: Ao escolher esta opção será solicitado ao usuário que ele informe o quanto deseja moer de cana para o sistema diagnosticar a capacidade dos equipamentos para suportar a quantidade de tonelada de cana informada.
- Produção: ao escolher realizar os cálculos pela produção deverá ser informado o quanto desejará produzir de álcool anidro e álcool hidratado para o sistema calcular a moagem necessária e o dimensionamento dos equipamentos.

Ao escolher se o cálculo será por moagem ou produção é passado um parâmetro para o sistema, que determinará a forma de cálculo.

Se parâmetro = P então

Encontra-se o valor do ART de entrada utilizando o álcool absoluto e a eficiência da indústria.

É calculado quantas toneladas de cana será necessária para produzir a quantidade desejada de álcool anidro e álcool hidratado e armazena o valor calculado na variável `Moi_ca`.

Senão Se parâmetro = M então

O valor digitado pelo usuário é considerado e armazenado na variável `Moi_ca`.

Fim se

Através do valor da variável `Moi_ca` mais o ART da Cana é calculado o ART de entrada; o valor do álcool absoluto é encontrado utilizando a eficiência da indústria. De acordo, com a quantidade de cana a ser moída o comprimento e o diâmetro da moenda são calculados.

Após tomar a decisão de como será o processo de cálculo o sistema dá seqüência ao ciclo de perguntas comuns às duas situações começando pelo primeiro setor da área industrial, a moenda, e segue aos demais setores seguindo a ordem de uma planta industrial de produção de álcool.

As perguntas apresentadas na Figura 7 são necessárias para direcionar a inferência e para atribuir valores aos parâmetros que são necessários à simulação do módulo da moenda.

As respostas dadas às perguntas são armazenadas na base de dados através da interação existente entre o aplicativo e o banco de dados. Todas as etapas seguintes de cálculos dependem de valores calculados anteriormente, para utilizá-los é realizada uma busca na base de dados através de comandos que faz a seleção dos mesmos.

Cada setor possui os seus questionamentos para obter as entradas necessárias e no final é emitido o resultado através das telas de respostas. O resultado pode ser visualizado na tela ou impresso. Não é permitido sair do sistema durante os questionamentos, esta opção é dada ao usuário na tela de resposta no final de cada etapa. Se desejar parar a simulação no meio do processo terá que cancelar o cálculo, pois assim o sistema apaga da base de dados as informações armazenadas até o momento.

Qual é a porcentagem de ART na cana? _____	Qual é a eficiência da indústria? _____	Qual é a eficiência do Pátio? _____
Você pretende utilizar uma caldeira com pressão de vapor de 20, 30,40 ou 60 kgf/cm <sup>2</sup> ? _____	As turbinas a vapor de acionamento serão de simples ou múltiplo estágio? _____	Você pretende utilizar 4, 5 ou 6 ternos de moenda ? _____
Qual sistema de preparo deseja utilizar? _____	Qual é a porcentagem de água de embebição em relação a cana ? _____	Qual é a quantidade de fibra da cana? _____
Qual é a quantidade de fibra do bagaço? _____	Qual é a pureza do caldo? _____	RESPOSTA

**Figura 7: Fluxograma de questões referentes à moenda**

A seguir, é feita a descrição dos parâmetros solicitados nas questões mostradas na Figura 7.

### **Porcentagem de ART (Açúcares Redutores Totais) na Cana**

Os açúcares redutores totais (glicose e frutose) são substâncias que facilitam a recuperação da sacarose, pois diminuem sua solubilidade. A presença destes açúcares em quantidades anormais indica que a cana não atingiu a maturação plena ou está deteriorada. A sacarose é o principal componente orgânico. Na composição do caldo de cana madura a porcentagem de variação de ART fica entre 12% a 18%.

O ART é um parâmetro que será muito utilizado no balanço de massa, o sistema sugere o percentual de 15% para o ART da cana.

### **Eficiência do Pátio**

O pátio de cana foi introduzido em usinas do Brasil no final da década de 1970. Este sistema é composto de uma área plana, próximo às moendas, onde os caminhões tombam a cana através de guinchos e de máquinas, dotadas de garras que amontoam as canas enleiradas, formando o estoque do período. No entanto, muitas usinas no Brasil estão

deixando de utiliza o pátio de cana, pois na armazenagem ocorre muito esmagamento da cana, ocorrendo grandes perdas.

Para formar este estoque de cana no pátio, as máquinas se movimentam frequentemente entre agarrar a cana, transportar, amontoar em pilhas, retirar e alimentar as mesas alimentadoras da moenda, ocasionando assim, uma perda de açúcar por amassamento de cana pelos pneus das máquinas, aperto das garras, atrito dos rastelos, e tempo de espera no pátio. O sistema considera como perda 1.5% e sugere como eficiência do Pátio o total de 98.5%.

### **Pressão de vapor**

O sistema questiona se o usuário deseja trabalhar com uma pressão de 20, 30, 40 ou 60 Kgf/cm<sup>2</sup>. Se este escolher trabalhar com pressão de 40 ou 60 Kgf/cm<sup>2</sup>, o sistema o impede de escolher trabalhar com turbinas de acionamento de simples estágio, deixando habilitado apenas o botão múltiplo estágio e o avisa desse travamento. De acordo com a pressão escolhida é determinado um fator pressão que será utilizado para calcular o consumo de vapor na moenda, como apresentado na Figura 8.

se pressao = 20 e estagio = 45 então FatorPressao = 16.5

senão se pressao = 20 e estagio = 65 então FatorPressao = 13.2

senão se pressao = 30 e estagio = 45 então FatorPressao = 10.7

senão se pressao = 30 e estagio = 65 então FatorPressao = 7.6

senão se pressao = 40 e estagio = 65 então FatorPressao = 6.6

senão se pressao = 60 e estagio = 65 então FatorPressao = 5

Consumo\_vapor = (potencia \* FatorPressao) / 0,6.

### **Figura 8: Algoritmo utilizado para calcular o fator pressão**

#### **Turbinas de Acionamento**

Turbina é um equipamento construído para converter energia mecânica e térmica contida em um fluído, em trabalho de eixo.

A forma construtiva básica é o mesmo para todos os tipos: um rotor dotado de um certo número de pás ou palhetas, ligados a um eixo que gira sobre um conjunto de mancais de deslizamento (mancais de rolamento, por questões de durabilidade não são usados).

As turbinas podem ser usadas para movimentar um outro equipamento mecânico rotativo, como uma bomba ou ventilador, ou podem ser usadas para a geração de eletricidade e nesse caso são ligadas a um gerador. A principal diferença entre os diversos tipos é o fluido de trabalho.

Pode definir a turbina a vapor (TV) como sendo uma máquina térmica de fluxo motora, que utiliza a energia do vapor sob forma de energia cinética, ou seja, o papel da turbina a vapor consiste em transformar em energia mecânica a energia que está contida no vapor sob as formas de energia térmica e de pressão, através de movimento. Na Turbina a vapor, o fluido de trabalho é vapor de água sob pressão e a alta temperatura.

O bagaço da cana é queimado numa caldeira, que gera energia térmica em forma de vapor d'água. Numa turbina, a energia térmica é transformada em mecânica e, no gerador, em energia elétrica, é a tecnologia da “contra-pressão”. Neste tipo de turbina o vapor de saída da máquina é denominado “escape” e utilizado no processo, também denominado vapor de processo.

Quanto maior a pressão do vapor e a temperatura, mais eficientes serão as turbinas, com menor consumo específico de vapor. Logo, conseguimos gerar uma quantidade maior de energia com menor quantidade de vapor.

Para as usinas que fazem cogeração, quanto menor o consumo de vapor de processo, melhor, pois esse vapor é gerado pelo escape das turbinas de contra-pressão, ou por rebaixamento, caso esse não for suficiente, que tem um consumo de vapor maior que as turbinas de condensação. Portanto, para uma usina cogerar é fundamental ter um consumo específico de vapor de processo baixo, assim sobrarão mais vapor direto para as turbinas de condensação, que são mais eficientes e assim terá maior geração de energia.

Após a extração do caldo, obtém-se o bagaço, constituído de fibra (46%), água (50%) e sólidos dissolvidos (4%). A quantidade de bagaço obtida varia de 240 a 280 kg por tonelada de cana, e o açúcar nele contido representa uma das perdas do processo.

O bagaço da cana é queimado numa caldeira, que gera energia térmica em forma de vapor d'água. O vapor, fonte de energia térmica com pressão média de 18 - 21 kgf/cm<sup>2</sup>,

alcança as turbinas, de simples ou múltiplos estágios, transformando-se em energia mecânica para movimentar as moendas de cana. E, ao passar pelos geradores, a energia mecânica transforma-se em energia elétrica. O vapor de alta pressão (2.2 kg vapor por kg de bagaço), produzido pela queima de bagaço em caldeiras (em média 270 kg por tonelada de cana), é expandido até cerca de 1.5 kgf/cm<sup>2</sup> em turbinas, para conversão termomecânica. Parte das turbinas movimentam equipamentos como turbo bombas, preparo e moagem de cana, e outra parte, movimenta geradores, produzindo energia elétrica (consome-se 13 KgV para a produção de 1 KWh em turbinas de múltiplo estágio). O vapor de baixa pressão (1,3 - 1,7 kgf/cm<sup>2</sup>) denominada vapor de escape, por sua vez, é utilizado em processos térmicos na produção de álcool e açúcar (400 a 500 KgV/TC). Pode-se trabalhar com turbinas de acionamento de simples ou múltiplo estágio.

As turbinas de simples estágio contêm uma roda única ou rotor e o vapor entra com uma pressão de vapor de 21 Kgf/cm<sup>2</sup> e sai com pressão de 1.5Kgf/cm<sup>2</sup>.

As turbinas de múltiplo estágio, turbogeradores de maior eficiência, contêm vários rotores para que haja um melhor aproveitamento do vapor que entra na máquina. Como exemplo, podemos citar um processo utilizando uma máquina com quatro estágios; no primeiro estágio a pressão de vapor é de 21Kgf/cm<sup>2</sup>, no segundo estágio a pressão é de 12Kgf/cm<sup>2</sup>, no terceiro estágio a pressão é de 6Kgf/cm<sup>2</sup>, no quarto estágio a pressão é de 4Kgf/cm<sup>2</sup> resultando no final da operação uma pressão de vapor de 1,5Kgf/cm<sup>2</sup>.

Para turbinas de simples estágio foi considerado um rendimento de 45% e para turbinas de múltiplos estágios foi considerado um rendimento de 65%. No sistema SEPPA, com pressão de 20 ou 30 Kgf/cm<sup>2</sup> utiliza-se uma turbina de simples estágio, com pressão de 40 ou 60 Kgf/cm<sup>2</sup> utiliza-se turbina de múltiplo estágio.

### **Quantidade de ternos**

O número de ternos de moenda pode ser 4, 5 ou 6. Em um tandem com número menor de moendas, é necessário diminuir a espessura da camada de bagaço para se obter uma extração conveniente. Ao contrário, num tandem com maior número de moendas é possível aumentá-la, à medida que o tandem é maior, considerando todas as condições iguais. A extração e o custo aumentam com o número de moendas.

A Figura 9 apresenta o algoritmo de cálculo da eficiência da moenda que varia conforme a quantidade de ternos informada.

<p>Se terno = '6' então</p> <p style="padding-left: 40px;">Eficiência_Moenda = 96.5</p> <p>Senão se terno = '5' então</p> <p style="padding-left: 40px;">Eficiência_Moenda = 95.5</p> <p>Senão se terno = '4' então</p> <p style="padding-left: 40px;">Eficiência_Moenda = 94.5</p>
---

**Figura 9 : Algoritmo utilizado para determinar a eficiência da moenda**

### **Sistema de preparo**

Temos duas fases distintas na operação de extração do caldo que deverão ser seguidas sequencialmente, uma que tem como objetivo preparar a cana para moagem desintegrando o colmo e rompendo as células; e a outra, extraíndo o caldo. O sistema de preparo pode ser por Facas Niveladoras e Desfibrador ou Facas Niveladoras e Jogo Duplo de Facas.

O jogo de facas é um equipamento rotativo de facas fixas, que opera a uma velocidade periférica de 60m/s, e tem por finalidade aumentar a densidade da cana, cortando-a em pedaços menores, preparando-a para o trabalho do desfibrador.

O desfibrador é a ferramenta fundamental para gerar máxima extração nas moendas. O desfibrador desfibra a cana sem extrair caldo. A cana desfibrada tem uma densidade de 35 a 45% mais que a cana solta. A finalidade do desfibrador é de abrir as células que contem o caldo da cana. Desta maneira o trabalho das moendas seria facilitado, já que eles só teriam que separar o caldo da fibra. Desfibradores podem abrir de 80 a 95% das células. Esta variação depende do tipo do desfibrador e da potência absorvida. Geralmente, os desfibradores têm martelos ao invés de facas. O desfibramento é feito estraçalhando a cana entre os martelos e uma placa. Quando o preparo da cana é realizado com facas rotativas, a extração é menor do que quando é efetuada por desintegrador, pois, no primeiro caso, os pedaços de cana ainda têm muito da estrutura original. Por outro lado os desintegradores destroem completamente a estrutura da cana, dando um aumento na extração.

O usuário escolhe qual sistema de preparo irá utilizar, e o sistema armazena a opção escolhida no repositório de dados para mostrá-la no relatório de respostas.

### **Água de embebição**

O bagaço resultante da extração pela última moenda encerra ainda com certa quantidade de caldo, constituído de água e de sólidos solúveis. Este caldo fica retido por capilaridade ou está nas células que escapam ao esmagamento. Portanto, adicionando certa quantidade de água a este bagaço, o caldo residual fica diluído.

É indispensável à utilização da embebição ao trabalho normal de qualquer tandem de moendas. A boa extração só é conseguida com altas taxas de embebição, 30%, colocando água ou caldo diluído no último terno e retornando sucessivamente para a moenda anterior o caldo extraído. Para que a embebição seja eficiente é aconselhável que o primeiro terno de moenda extraia 70% do caldo de cana.

### **Quantidade de fibra na cana**

A quantidade de fibra na cana depende de fatores como: cultivo, safra, clima, período do ano, etc. Quanto maior a fração de fibra da cana, mais difícil é a extração do caldo e mais água de embebição deve ser adicionada para melhora da extração.

A fração de fibra da cana é fator negativo tanto para a capacidade quanto para a extração. Geralmente, queima-se o bagaço nas caldeiras, sendo a fração de fibra responsável pelo balanço térmico da indústria. Canas com alta fração de fibra são mais duras, provocam um maior desgaste dos cilindros e exigem mais potência de moagem (GUERREIRO, 1999).

Com relação à composição química da cana, observa-se que ela é bastante variável quanto à proporção dos elementos, porém, quantitativamente e qualitativamente, ela é mais ou menos semelhantes em todas as variedades. Pode-se dizer que as fibras são consideradas como todo material insolúvel em água, e o caldo, o conjunto de todos os sólidos solúveis contidos na cana (MARCONDES et. al, 2002).

O teor de fibra na cana é muito importante, pois, canas com baixo teor não oferecem combustíveis suficientes, causando um desequilíbrio térmico na indústria. Mas, um valor elevado de fibra dificulta a extração da sacarose. A idade da cana tem forte

influência no teor da fibra da cana por isso a soca tem um teor de fibra mais alta que a cana-planta.

De maneira geral, pode-se dizer que a cana é composta de 83 a 92% de caldo absoluto e de 8 a 17% de fibras. A porcentagem de fibra na cana recomendada pelo sistema é de 12,5%, visto que este é o teor de fibra considerada na cana padrão já que nas canas mais pobres o teor de fibra está entre 7 e 8% , nas mais ricas entre 16 e 17% e a média encontrada na região sul é de 11%, variando entre 9 e 15%.

### **Quantidade de fibra no bagaço**

Após a moagem da cana, obtém-se o bagaço da cana, que é utilizado na indústria como combustível nas caldeiras para geração de vapor, necessário a todas as fases da indústria. O bagaço, constituído de fibras de celulose, representa cerca de 220 a 260 quilos por tonelada de cana moída e contém, ao sair da moenda, cerca de 45% a 50% de umidade residual, dependendo do tipo da cana e da moenda usada.

A fibra do bagaço cresce rapidamente depois da passagem pela primeira moenda, tendendo a permanecer constante nas últimas moendas. Geralmente, na última moenda a fração de fibra e a umidade estão perto de 50% (GUERREIRO, 1999).

A quantidade de fibra que entra com a cana-de-açúcar é igual à quantidade de fibra que sai com o bagaço. Recomenda-se o valor de 47.5% para a fibra do bagaço.

### **Pureza do caldo**

Relação entre a quantidade de ART e os sólidos solúveis totais medidos em Brix. De acordo com o período do corte a quantidade de impurezas contidas na cana varia de 8% a 12%, havendo uma variação maior em épocas de muita chuva. Como sugestão o sistema trabalha com um percentual de 89% de pureza.

Após todos os questionamentos, o sistema emite um relatório como resposta mostrando os resultados do balanço de massa. Na simulação realizada passando os valores para os parâmetros mostrados na Tabela 4 obtivemos as saídas exibidas na Figura 10.

**Tabela 4: Parâmetro do módulo Moenda**

Parâmetro	Valor
Álcool Anidro	100 m <sup>3</sup>
Álcool Hidratado	100 m <sup>3</sup>
ART da cana	15 %
Eficiência da Indústria	83.7
Eficiência do Pátio	98.5
Pressão de vapor	30 kgf/cm <sup>2</sup>
Acionamento das Turbinas	Múltiplo estágio
Quantidade de ternos	4
Sistema de Preparo	Facas Niveladoras e Desfibrador
Água de Embebição	30%
Quantidade de Fibra na cana	12.5%
Quantidade de Fibra no Bagaço	47.5%
Pureza do Caldo	89%

### Dados da Moenda

[ajuda](#) 

**- SISTEMA DE PREPARO**  
FACAS NIVELADORAS E DESFIBRADOR

**- SISTEMA DE MOENDA**  
4 ternos de dimensão 26 X 48

**- DADOS DO PROCESSO**  
Potência = 1000  
Consumo de vapor (Ton) = 12.67  
Pressão de vapor de alta (Kgf/cm<sup>2</sup>) = 30  
Pressão de vapor de escape (Kgf/cm<sup>2</sup>) = 1.5

**- DADOS DE BALANÇO**  
Moagem diária (Ton/dia) = 2399.2  
Fibra da Cana (Ton) = 12.5  
Fibra do Bagaço (Ton) = 47.5  
Volume de Caldo Misto (m<sup>3</sup>) = 99.26  
Volume de Água de embebição (m<sup>3</sup>) = 719.7  
Brix do Caldo = 14.79  
ART do caldo (Ton) = 13.16  
ART do bagaço (Ton) = 3.53  
ART de Entrada (Ton) = 359.88  
Massa do Caldo (Ton) = 2518.95  
Massa do bagaço (Ton) = 599.75

  
[Imprimir](#)  
  
[Sair](#)  
  
[Tratamento do Caldo](#)

**Figura 10: Tela de resposta do módulo Moenda**

Em todas as telas de respostas o usuário encontrará a opção de imprimir o resultado, encerrar os cálculos ou continuar o processo de cálculo pelos próximos setores industriais. Se a escolha for continuar, o usuário deverá pressionar o botão com o nome da etapa seguinte especificada.

Neste exemplo da figura 10, o usuário deve pressionar o botão tratamento do caldo para continuar a simulação de cálculos neste setor.

### **3.3.2. Tratamento do Caldo**

O caldo extraído pelas moendas segue para o tratamento do caldo, onde começa a ser purificado para fazer a remoção do material em suspensão, através de peneiragem. Geralmente este caldo contém areia, terra, fibras de cana e de bagaço, genericamente denominado de bagacilho. O caldo que sai das moendas deve passar primeiramente através de peneiras de malha de 1.0 milímetro de diâmetro, onde as frações grosseiras do bagaço são removidas. Mesmo depois de peneirado o caldo contém partículas finas, de tamanho inferior a 1.0 milímetro, devendo assim passar por uma segunda peneiragem para remover partículas menores que essa medida, devendo-se ter no final um caldo com nível de impureza de 0.4 a 0.5 gramas por litro. Em seguida, é adicionado ao caldo leite de cal para fazer a eliminação de corantes, a neutralização de ácidos orgânicos e a formação de sulfito e fosfato de cálcio que ao sedimentar arrastam consigo impurezas presentes no líquido. O caldo após esta fase é denominado caldo caleado.

Na etapa seguinte o caldo caleado é aquecido para facilitar a coagulação e floculação dos colóides, emulsificar graxas e ceras, e levado à decantação para a remoção das impurezas floculadas nos tratamentos anteriores. A concentração de sacarose no caldo, após a limpeza, é fundamental e deve ser controlada pelo laboratório com registros

A primeira pergunta que o sistema faz a respeito do tratamento do caldo como pode ser visualizado na Figura 9 é sobre a eficiência neste setor que foi considerada pelo sistema uma porcentagem de 99,3%, já que sofre perdas de sacarose não conseguindo uma eficiência 100%. As demais questões são necessárias para realizar o balanço de massa, calcular o volume do decantador, o tempo de retenção no decantador e a capacidade do filtro rotativo.

Qual é a eficiência do tratamento do caldo? _____	Qual é a porcentagem de umidade presente na torta? _____	Qual é a porcentagem de ART na torta? _____
Qual é a porcentagem de sólidos insolúveis no Caldo Caleado? _____	Qual é a porcentagem de sólidos insolúveis no Caldo Decantado? _____	Qual é a porcentagem de sólidos insolúveis no Lodo? _____
Qual é a porcentagem de sólidos insolúveis no Caldo Filtrado? _____	Qual decantador pretende utilizar? _____	Qual é a porcentagem de água usada no filtro? _____
RESPOSTA		

**Figura 11 : Fluxograma de questões referentes ao tratamento do caldo**

### **Eficiência do Tratamento do Caldo**

É a quantidade de ART recuperado em relação ao total entrado, sendo que a perda se deve ao ART entrado, torta, e a quantidade devido de a decomposição térmica da glicose/frutose.

### **Umidade presente na torta**

A torta de filtro é composta de material insolúvel removido do caldo após decantação e filtração. Normalmente esta é composta de 70% de umidade e 30% de matéria seca.

### **Sólidos insolúveis no Caldo Caleado**

Caldo caleado é o caldo misto após ter sofrido ajuste do pH através da adição do leite de cal. O ajuste de pH é necessário para evitar a hidrólise da sacarose que ocorre em pH ácidos e para auxiliar na decantação através da reação do cálcio com as substâncias insolúveis auxiliando a forma de flocos.

### **Sólidos insolúveis no Caldo Decantado**

Quantidade de sólidos insolúveis que não foram removidas na decantação.

### **Sólidos insolúveis no Lodo**

Quantidade de sólidos insolúveis presentes no lodo removido dos decantadores e enviados ao filtro.

### **Sólidos insolúveis no Caldo Filtrado**

A quantidade de material insolúvel não removido na etapa de filtração do lodo.

### **Decantador**

O decantador pode ser rápido ou convencional. O decantador rápido não contém bandejas e não tem canecas para regular a clarificação do caldo, as bandejas são repartições onde o caldo fica em repouso. O decantador convencional contém bandejas onde existe canecas de regulagem, conforme a clarificação do caldo o operador pode retirar menos ou mais caldo. Após passar pelo decantador o caldo é chamado de caldo decantado ou clarificado.

Neste tempo de retenção, ocorrem reações de floculação e precipitação do material em suspensão que são retirados na forma de lodo. O caldo clarificado e limpo segue o processo para evaporação e o lodo irá para filtração a vácuo onde é recuperada a sacarose ainda existente. Como o lodo ainda é rico em sacarose, é feito uma filtração nos filtros rotativos a vácuo para succionar o material líquido, chamado de caldo filtrado, que sofrerá novo tratamento de clarificação. O material sólido retido nas telas dos filtros é denominado torta de filtro.

### **Água utilizada no filtro**

A quantidade de água utilizada para lavagem da torta com o objetivo de remover o máximo de ART presente na mesma.

Na Tabela 5, são apresentados os dados que foram utilizados para simulação no módulo tratamento do caldo e a Figura 12 contém a resposta da simulação desta parte da indústria.

**Tabela 5 : Dados utilizados na simulação do tratamento do caldo**

Parâmetro	Valor
Temperatura saída moenda	35° C
Eficiência do Tratamento do Caldo	99.3
Umidade presente na torta	70%
Art da Torta	2.5
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Caleado	3.5%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Decantado	0.2%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Lodo	10%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Filtrado	4%
Decantador	Rápido
Porcentagem de água utilizada no filtro	10%
Temperatura saída moenda	35° C
Eficiência do Tratamento do Caldo	99.3
Umidade presente na torta	70%
Art da Torta	2.5
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Caleado	3.5%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Decantado	0.2%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Lodo	10%
Porcentagem de sólidos insolúveis presentes no Caldo Filtrado	4%
Decantador	Rápido
Porcentagem de água utilizada no filtro	10%



**Figura 12 : Respostas do cálculo do tratamento do caldo**

O próximo setor a ser trabalhado pelo sistema é o da fermentação seguindo a ordem dos setores da indústria de fabricação do álcool.

### 3.3.3. Fermentação

Abaixo na Figura 13 estão representadas as perguntas feitas pelo sistema para obtenção dos parâmetros necessários para calcular com eficiência o balanço de massa realizado na fermentação. Através destes balanços encontraremos o volume do mosto, do vinho bruto, do álcool no vinho bruto, do álcool produzido, do vinho centrifugado, do creme concentrado, do vinho fermentado tratado, dados que são importantes nos cálculos de dimensionamento do volume dos fermentadores, dimensionamento dos fermentadores e dimensionamento dos trocadores de calor.

O caldo sai da moenda com qual temperatura?	Qual é a eficiência da fermentação?	Qual é a porcentagem de células no fermento tratado?
Qual é a porcentagem de células no vinho centrifugado?	Qual é a porcentagem de células no creme concentrado?	Qual é a porcentagem de células no vinho bruto?
Qual é o valor da taxa de reciclo?	Qual é o teor alcoólico no vinho centrifugado?	RESPOSTA

**Figura 13 : Fluxograma de questões referente à fermentação**

### **Concentração de células no fermento**

Representa a quantidade de fermento que foi recuperado na unidade de centrifugação após ter sido diluída e acidificada. Este material é o que retorna para os fermentadores para iniciar um novo ciclo de batelada ou dar continuidade no processo em caso contínuo.

É preciso conhecer a porcentagem de concentração de células para determinar a quantidade de células no fermento tratado para calcular a velocidade específica da reação e o volume dos fermentadores.

### **Concentração de células no vinho centrifugado**

Uma grande quantidade de célula perdida indica uma grande perda de fermento do processo podendo em alguns casos causar a diminuição da massa celular em processo. Esta concentração é utilizada no balanço de massa para o cálculo das vazões. Ela indica o quanto de células é perdido nas centrífugas. Uma baixa quantidade de células no vinho centrifugado indica estar usando uma boa centrífuga. Normalmente uma faixa de concentração de até 3 g/l não compromete a produtividade do sistema. Entretanto quanto menor esta concentração melhor para o processo.

### **Concentração de células no creme concentrado**

A produtividade aumenta com o aumento na concentração de células no creme e o volume total dos reatores diminui. A concentração depende do bom funcionamento das centrífugas, porém pode acarretar uma perda excessiva de células no vinho. Concentrações

mais elevadas permitem um menor consumo de ácido sulfúrico no tratamento ácido, diminuindo a acidez do fermento tratado.

Este parâmetro é utilizado no balanço de massa para se determinar as vazões e as concentrações de entrada do reator.

### **Concentração de células no vinho bruto**

Esta concentração é utilizada para se determinar as vazões e concentrações de entrada no reator, através do balanço de massa. Esta concentração está relacionada à concentração de células no creme, e a água de diluição. É indicado utilizar o volume de água igual ao volume de creme a ser tratado, pois acarretará em menor teor alcoólico no fermento tratado, sem causar um grande efeito no vinho centrifugado.

### **Taxa de reciclo**

O sistema adotou como valor padrão 30% para a taxa de reciclo depois de observado que este é o valor mais utilizado nas indústrias. A taxa de reciclo é a fração entre a vazão do fermento tratado e a vazão total de alimentação do fermentador.

Através da multiplicação da taxa de reciclo pela vazão do vinho bruto encontra-se o total do fermento tratado que será utilizado para verificar a quantidade de creme concentrado reciclado, massa celular sangrada, massa do mosto e outros parâmetros utilizados nos cálculos para determinar os volumes e concentrações na fermentação.

### **Teor Alcoólico no vinho centrifugado.**

Quanto maior for a concentração do teor alcoólico, menor o volume de vinho bruto necessário para uma mesma produção. Diminuindo assim a necessidade de muitas separadoras centrífugas, além disto, diminui o consumo de vapor na destilaria, assim como a quantidade de vinhaça gerada.

O sistema indica um teor alcoólico de 9° Gl. Este parâmetro é muito importante para o processo, pois valores de concentrações baixas acarretam um aumento no consumo de vapor, aumento da quantidade de vinho fermentado, exigindo maior número de centrífugas. O volume de vinhaça produzido seria muito grande exigindo um grande sistema de distribuição. A produtividade seria elevada e um menor número de reatores requerido.

## Temperatura

Valores altos para a temperatura requerem grandes áreas de troca térmica elevando o custo de investimento. O sistema orienta utilizar uma temperatura de 35 °C e é utilizado no cálculo da área do pré-aquecedor.

O próximo setor a ser calculado é a unidade de fermentação. Através da Figura 14 podemos ver os resultados obtidos na fermentação utilizando como parâmetros os valores mostrados na Tabela 6. Através do botão visualizar balanço de massa encontrado na tela de resposta da fermentação podemos visualizar e imprimir o resumo do balanço de massa de todos os setores.

**Tabela 6 : Dados utilizados na simulação da Fermentação**

Parâmetro	Valor
Eficiência da fermentação	90%
Porcentagem de células no Fermento Tratado	30%
Porcentagem de células no Vinho Centrifugado	0.5%
Porcentagem de células no Creme Concentrado	65%
Porcentagem de células no Vinho Bruto	12%
Taxa de Reciclo	30%
Teor alcoólico no Vinho Centrifugado	9° Gl
Taxa de evaporação	26 Kg/mh



**Figura 14 : Resposta dos cálculos da Fermentação**

O próximo passo é calcular o volume dos fermentadores, e para fazer este dimensionamento é preciso de alguns parâmetros de entrada que serão obtidos através das perguntas mostradas na Figura 15.

Qual é a capacidade da Centrífuga? _____	Informe os valores para os parâmetros cinéticos solicitados abaixo: _____	Quais são os valores estimados para a conversão do substrato na dorna de fermentação? _____
_____ RESPOSTA		

**Figura 15 : Fluxograma de questões referentes ao volume dos fermentadores**

### Capacidade da Centrífuga

A centrífuga é o equipamento que faz a recuperação das leveduras contidas no processo.

### Parâmetros Cinéticos

Os parâmetros Pmax e n se referem à inibição do crescimento celular causada pelo álcool:

$P_{max}$  = Concentração de álcool onde o crescimento das células cessa.

$n$  = Potência do termo de inibição pelo produto.

Os parâmetros  $X_{max}$  e  $m$  se referem à inibição celular pela concentração de células:

$X_{max}$  = Concentração de células onde o crescimento celular cessa.

$m$  = Potência do termo de inibição pela concentração celular.

$K_s$  = Parâmetro de afinidade do microorganismo com o substrato. Este parâmetro está associado à limitação pelo substrato.

$K_i$  = Constante de inibição pelo substrato.

Foi considerado para a relação da concentração de células com a de substrato o valor de 0.03 e para a relação da concentração de álcool com a de substrato o valor de 0.46. O sistema traz como padrão os valores mostrados na Tabela 7, estes valores poderão ser alterados atendendo a necessidade de simulação do usuário.

**Tabela 7 : Parâmetros Cinéticos**

Parâmetro	Valor
$P_{max}$	86
$X_{max}$	102
$\mu$	0.4
$K_i$	8
$K_s$	2
$N$	3.2
$M$	1

A partir dos parâmetros cinéticos, é possível determinar a velocidade específica de reação que será utilizada no cálculo do volume dos fermentadores.

### **Conversão do Substrato**

Valores desejados de conversão em cada fermentador. Seus valores definem a distribuição de volumes para os processos contínuos. É necessário fazer a conversão do substrato na dorna de fermentação. A Tabela 8 apresenta os valores padrões estimados para



Dimensionamento - Fermentadores		ajuda 
<b>- Fermentador 1</b>	Volume (m <sup>3</sup> ) = <b>331.39</b> Diâmetro da parte cilíndrica (m) = <b>6.47</b> Altura da parte cilíndrica (m) = <b>8.09</b> Raio Maior (m) = <b>3.23</b> Raio Menor (m) = <b>0.5</b> Altura do Cone (m) = <b>5.1</b>	
<b>- Fermentador 2</b>	Volume (m <sup>3</sup> ) = <b>302.53</b> Diâmetro da parte cilíndrica (m) = <b>6.28</b> Altura da parte cilíndrica (m) = <b>7.84</b> Raio Maior (m) = <b>3.14</b> Raio Menor (m) = <b>0.5</b> Altura do Cone (m) = <b>4.93</b>	
<b>- Fermentador 3</b>	Volume (m <sup>3</sup> ) = <b>183.13</b> Diâmetro da parte cilíndrica (m) = <b>5.31</b> Altura da parte cilíndrica (m) = <b>6.64</b> Raio Maior (m) = <b>2.65</b> Raio Menor (m) = <b>0.5</b> Altura do Cone (m) = <b>4.1</b>	
<b>- Fermentador 4</b>	Volume (m <sup>3</sup> ) = <b>71.31</b> Diâmetro da parte cilíndrica (m) = <b>3.88</b> Altura da parte cilíndrica (m) = <b>4.84</b> Raio Maior (m) = <b>1.94</b> Raio Menor (m) = <b>0.5</b> Altura do Cone (m) = <b>2.86</b>	 <b>Imprimir</b>  <b>Sair</b>  <b>Trocadores</b>

**Figura 17 : Resposta contendo o dimensionamento dos fermentadores.**

Após dimensionar os fermentadores, o sistema passa a dimensionar os trocadores de calor, para este dimensionamento ser realizado é necessário a entrada de valores para as temperaturas nos trocadores de calor do mosto e nos trocadores de calor das dornas 1 a dorna 4.

### Temperaturas

A seguir, uma definição das temperaturas solicitadas pelo sistema :

- Temperatura Entrada Mosto = É relativa à temperatura de saída do Caldo Clarificado na saída do decantador.
- Temperatura Entrada Água = É a temperatura da torre vinda dos trocadores.
- Temperatura Saída Mosto = Temperatura desejada pelo mosto para alimentar as dornas.
- Temperatura Saída Água = Temperatura da água que sai do trocador de calor e retorna para a torre de resfriamento.
- Temperatura Entrada Operação = Temperatura máxima que o vinho contido no fermentador pode atingir.

A produtividade é fortemente influenciada pela temperatura de operação. Um dos parâmetros de determinação do tamanho da área de troca térmica é a temperatura, por isso, quando mais alta for a temperatura maior será esta área e maior o custo de investimento inicial e manutenção. Deve-se controlar bem esta temperatura, pois a floculação das leveduras é favorecida com a elevação desta e a floculação atrapalha o desempenho das centrífugas. Normalmente, utiliza-se como valor desta variável a temperatura onde o volume de reator necessário e a área de troca térmica requerida, combinados, forneçam o menor valor.

Segundo Andrietta (1994), os dois parâmetros afetados diretamente pela temperatura de operação são:  $P_{max}$  negativamente e  $m_{max}$  positivamente. Em temperaturas abaixo de 32° C,  $P_{max}$  é constante, e o efeito do aumento da temperatura sobre o valor de  $m_{max}$  é positivo, levando a uma diminuição no volume total de reator necessário. Já acima deste valor de temperatura, o parâmetro  $P_{max}$  é o mais afetado, provocando um aumento total de reator o que causa uma diminuição na produtividade. O sistema indica utilizar uma temperatura de 35° C.

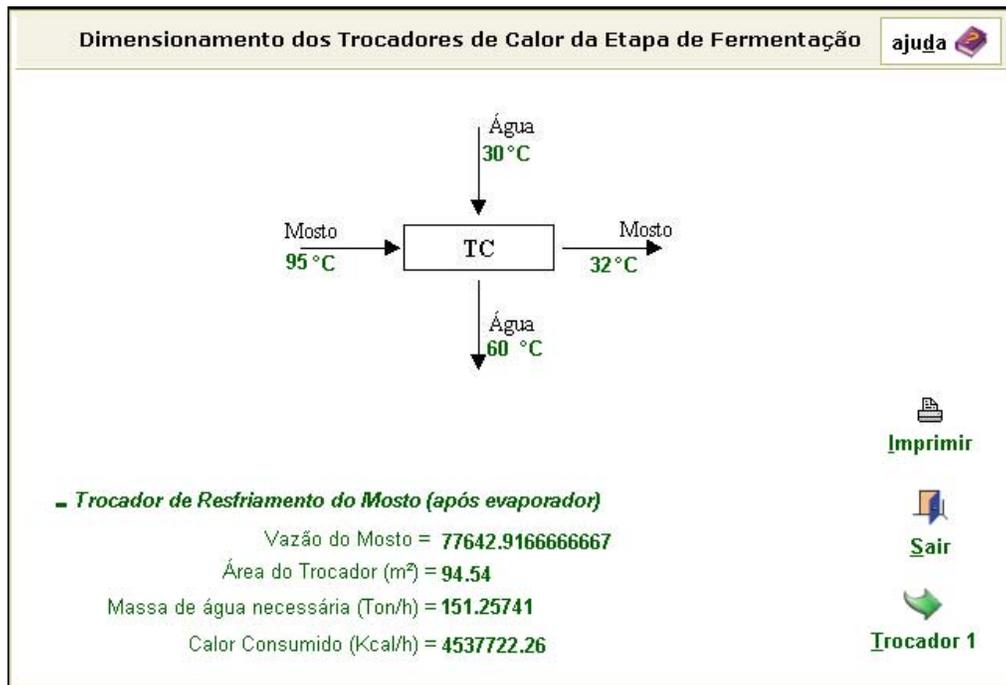
Temperatura Fermento é igual a temperatura do fermento tratado proveniente da cuba que entra no fermentador.

Os Trocadores de Calor podem ser de placas ou multitubular (casco ou tubos). Os cálculos foram feitos para utilizar trocadores de calor do tipo placa por terem maior eficiência de troca térmica. O coeficiente global de troca térmica ( $U$ ) é maior neste tipo de trocador, foi considerado no trocador do mosto o coeficiente igual a 4000 e nos demais trocadores o coeficiente igual a 4200.

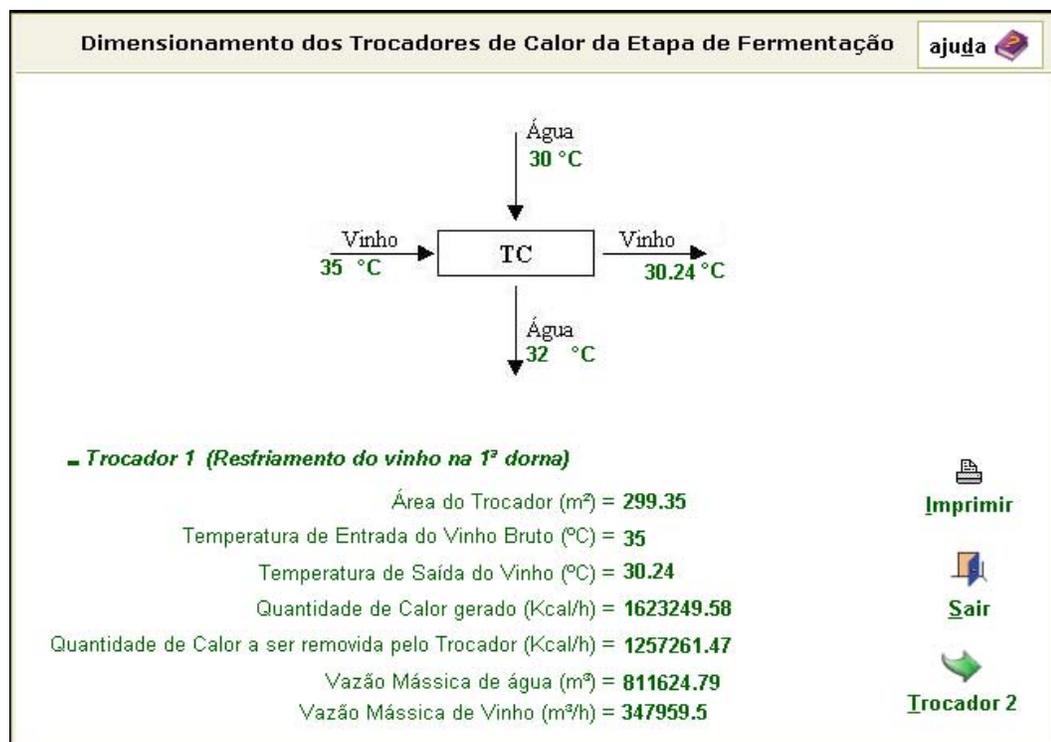
É solicitado ao usuário que ele informe a temperatura de entrada e saída do mosto e a temperatura de entrada e saída da água, no frame do trocador de calor do mosto. No frame do trocador da dorna 1 é solicitado que informe a temperatura de entrada de operação, temperatura do fermento, temperatura do mosto e a temperatura de entrada e saída da água. Nas telas dos trocadores de calor das dornas 2 a 4 é solicitado a temperatura de operação e a temperatura de entrada e saída da água.

Antecedendo cada resposta do dimensionamento do trocador de calor é repetida a solicitação das temperaturas. É possível visualizar através das Figuras 18, 19, 20 e 21 as

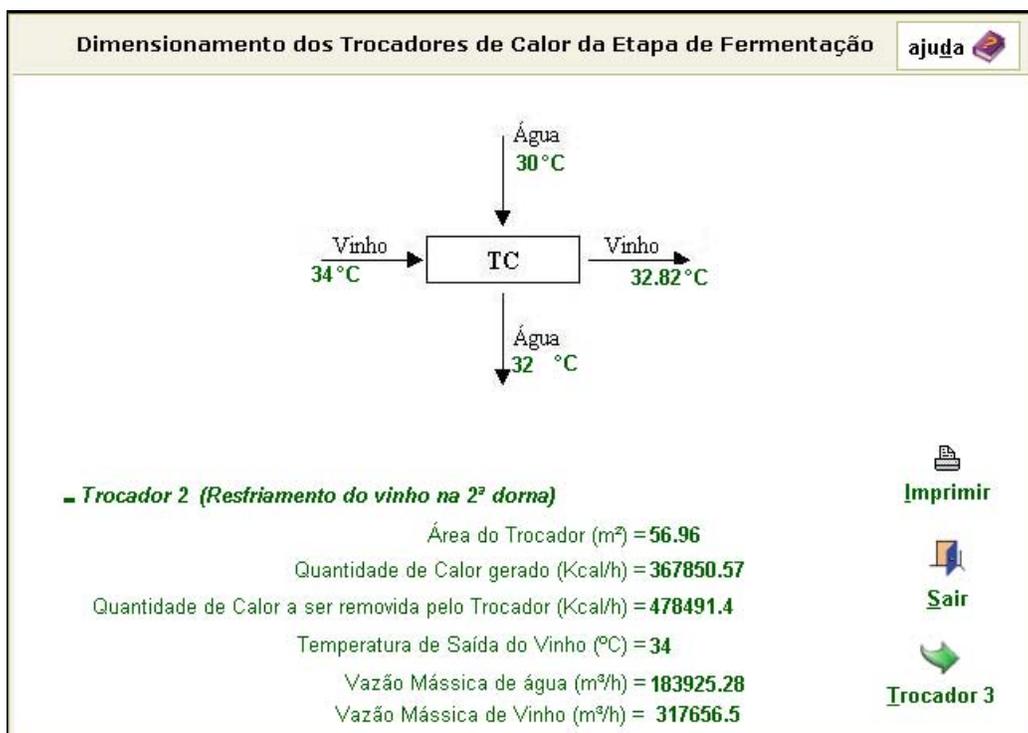
respostas do dimensionamento do trocador de calor do mosto, trocador de calor da dorna 1, trocador de calor da dorna 2 e do trocador de calor da dorna 3 respectivamente.



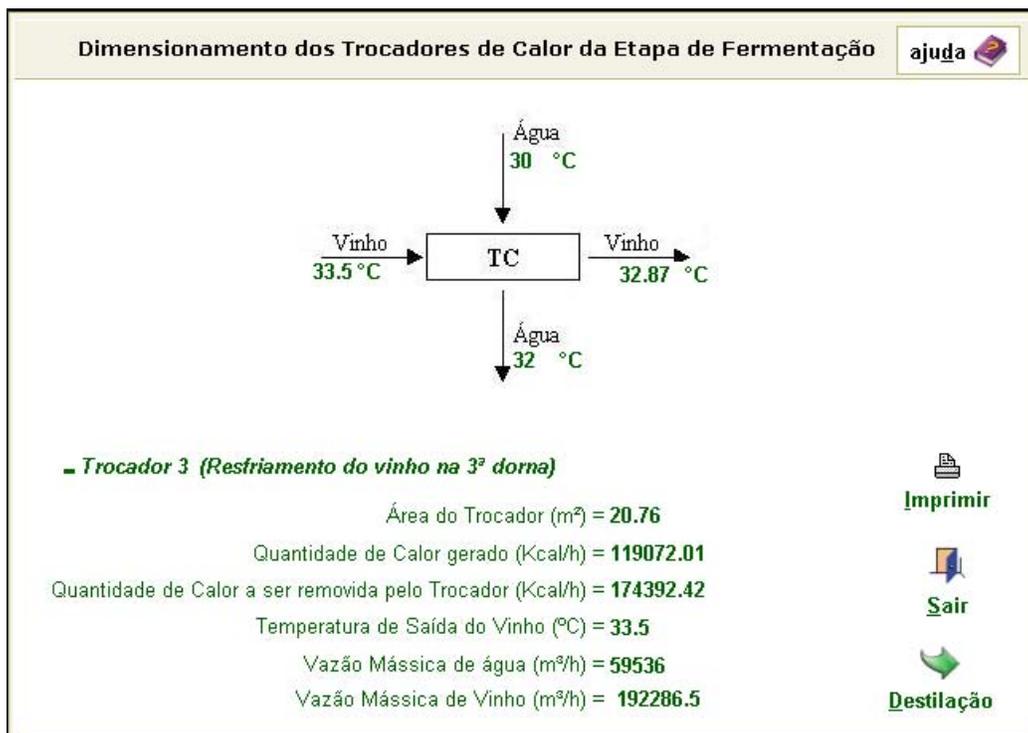
**Figura 18: Resposta do dimensionamento do trocador de Calor do Mosto**



**Figura 19 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 1**



**Figura 20 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 2**



**Figura 21 : Resposta do dimensionamento do trocador de calor da dorna 3**

Para ilustrar o “software”, no anexo A encontra-se a execução do primeiro módulo do sistema SEPPA, que contém a tela de inicialização, em seguida a de questionamento

sobre a fórmula de cálculo, se será pela quantidade de cana a moer ou pela quantidade de álcool a produzir e as telas de interação do módulo da moenda.

Além das respostas e relatórios parciais contendo informações de cada setor, o sistema apresenta os relatórios finais de balanço de massa (anexo B), balanço de energia (anexo C), balanço hídrico (anexo D) e dimensionamento dos equipamentos (Anexo E) para auxiliar o usuário em sua tomada de decisão.

### **3.4. Conclusão**

O programa SEPPA poderá ser utilizado com muita facilidade pelo usuário final por ter uma interface amigável e compreensível. A sua utilização para o planejamento do modelo da planta de produção de álcool não requer conhecimentos avançados de informática e nem do processo em questão. Basta o usuário estar munido dos dados do processo e de produção que serão solicitados no decorrer de uma consulta. Os dados que serão solicitados estão explicados nas telas de questionamentos e o usuário poderá visualizá-los através do botão de ajuda. Para facilitar ainda mais a sua utilização, todas as telas contêm valores usuais como sugestão de resposta para as perguntas. Valores que foram coletados através de trabalhos realizados anteriormente e experiência de profissionais de usinas.

# Capítulo 4

## 4. Considerações finais e Sugestões para trabalhos futuros

### 4.1. Considerações finais

Frente à grande carência no mercado de sistemas especialistas no setor sucroalcooleiro, ao crescimento da produção de álcool e a instalação de novas plantas, o sistema SEPPA é uma ferramenta que poderá ser muito útil no setor melhorando a agilidade na obtenção de resultados necessários para construções de novas plantas industriais ou melhorias de processos aproveitando a planta já existente.

Este sistema será de grande aplicação porque o profissional antes de projetar uma planta de produção de álcool poderá fazer uma consulta a ele para ter uma análise prévia das condições de operação e do dimensionamento dos equipamentos. Com isso, o usuário passa a ter uma idéia do espaço físico e dos investimentos necessários para a realização do projeto, podendo assim reduzir o número de falhas.

O sistema SEPPA é uma ferramenta de apoio aos profissionais da área e não de substituição do perito em dimensionamento de equipamentos e cálculos do processo.

### 4.2. Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se, em trabalhos futuros, desenvolver dois novos módulos no sistema SEPPA, o módulo de Dimensionamento Setorial e o módulo de Dimensionamento dos equipamentos para produção de açúcar. No módulo de Dimensionamento Setorial deverá ser construídas telas setoriais independentes, onde o usuário poderá realizar simulações em setores da usina, não precisando executar todos os módulos do sistema. No módulo de Dimensionamento dos equipamentos para produção de açúcar deverá ser criado telas e cálculos de simulação do processo de fabricação do açúcar.

Uma abordagem complementar que também poderá ser desenvolvida são métodos de simulação para outros tipos de processos, como por exemplo, batelada.

A finalidade do desenvolvimento destes novos módulos é completar o Sistema SEPPA dando todas as possibilidades de simulação dos processos encontrados nas plantas industriais de produção de álcool e açúcar.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA, J.R. Processo de recuperação de levedura ou processo Melle-Boinott. In: SEMANA DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA, 1., 1960, Piracicaba. **Anais**. p. 254-262.
2. ANDRIETTA, S. R. *Modelagem, simulação e controle de fermentação contínua em escala industrial*. Campinas, 1994. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
3. ANDRIETTA, S. R. Otimização de processo de fermentação alcoólica em múltiplos estágios. *Stab Açúcar, Álcool e subprodutos*. 10 (2): 35-37, 1991.
4. ANDRIETTA, S. R. & MAUGERI FILHO, F. Optimum design of a continuous fermentation unit of an industrial plant alcohol production. *Advances in Bioprocess Engineering*, 1994.
5. ANDRIETTA, S. R. & STUPIELLO, J.P. Simulação e modelagem para processos de fermentação alcoólica (II) contínua. *Stab Açúcar, Álcool e subprodutos*. 9: 45-51, 1990.
6. BARRELLA, D. W. *Sistemas especialistas modulados e abrangentes para a gestão de operações*. São Paulo, 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, universidade de São Paulo.
7. BARR, A.; FEIGENBAUM, E. A. *The Handbook of Artificial Intelligence*. v.I. Los Altos : Morgan Kaufmann, 1986, 423p.
8. BRITO, J. N. *Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos*. Campinas, 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
9. Cana-de-açúcar: Origem e Expansão. Disponível em: [http://www.orplana.com.br/informativo\\_22.htm](http://www.orplana.com.br/informativo_22.htm) . Acessado em: 17 dez. 2003.
10. COSTA, M. A. B. *Um modelo baseado em conhecimento para simular rebanhos de bovinos de corte*. Campinas, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.
11. CUNHA P. A. *Automação e Controle “On-Line” de uma coluna de destilação em*

*batelada*. Campinas, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

12. DELGADO A. A. e AZEREDO CÉZAR M. A. – *Elementos de Tecnologia e engenharia do açúcar de cana*. Piracicaba, 1977. Instituto Zimotécnico – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo.

13. DREWS, W. A. Fermentação do melaço de cana de açúcar no Brasil. In: SIMPÓSIO DE FERMENTAÇÃO, 1., São Paulo, 1964. *Anais*. p. 213-222.

14. FAIN J., HAYES-ROTH F., SOWIZRAL H. & WATERMAN D. A. Programming in rosie: An introduction by means of examples. *Technical Report Report N-1646-ARPA*, Rand Corporation, February 1982.

15. FEIGENBAUM E.A., BUCHANAN B.G. & LEDERBERG J. *On generality and problem solving : A case study using the dendral program*. In B. Meltzer and D. Michie, ed. *Machine Intelligence*, volume 6, pages 165-190. Edinburgh University Press, Edinburgh, GB, 1971.

16. FERREIRA, A. *Novo dicionário da língua portuguesa*. ed. Nova Fronteira. Rio de Janeiro, 1994.

17. FILHO, A. C. *Sistema especialista para o forjamento a quente de precisão*. Campinas, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

18. FILHO, F. M., ASCOLEI, A. F. S. Sistemas Especialistas: Especificação de parafusos de união. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*, Águas de Lindóia , 1999.

19. FLORES, C. D. *Perspectivas de Uso de Redes Bayesianas Aplicadas na Medicina*. Porto Alegre: PPGC/UFRGS, 2000. 65p. (Trabalho Individual, n.920).

20. FLORES, C. D. *Sistema de Solução de Problemas Cooperativos: Um Estudo de Caso*. Porto Alegre, 1995. Dissertação (de Mestrado em ) . PPGC/UFRGS

21. FLORES, C. D.; VICCARI, R. M. Architecture of an Expert System for the Pharmacological Treatment of Affective Disorders. In: IV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE COMUNICACIÓN SOCIAL, Santiago de Cuba, 1994.

22. FORGY C.L. & MCDERMOTT J. A domain independent production system. In *Proceedings of IJCAI 5*, pages 933-939, 1977.
23. FRANCO, M. P. K. *Desenvolvimento de um sistema inteligente para auxiliar a escolha de um sistema para produção no mar*. Campinas, 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
24. GENSYM. *G2 Reference Manual*. GENSYM Corporation, 125 Cambridge Park Drive, Cambridge, MA 02140, 1992.
25. GHOSE, T. & THYAGI, R. Rapid ethanol fermentation of cellulose hidrolisate. II product and substrate inhibition and fermentor design. *Biotechnol. Bioeng.*, 21: 1411, 1979.
26. GOMES, H. S. B. *Contribuições para o desenvolvimento de um sistema especialista em diagnose de máquinas rotativas*. Belo Horizonte, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Belo Horizonte.
27. GUERREIRO, A. M. *Desenvolvimento de um Sistema Especialista para o projeto de unidades industriais de produção de álcool*. Campinas, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
28. GUERREIRO, A. M. *ALCOXPert – Sistema Especialista para simulação e projeto de unidades industriais de álcool*. Campinas, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
29. HARMON, P. e KING, D. *Sistemas Especialistas: A Inteligência Artificial Chega ao Mercado*. Rio de Janeiro: Campus, 1988.
30. HART P. E., DUDA R. O. & EINAUDI M. T. Prospector - a computer-based consultation system for mineral exploration. *Mathematical Geology*, 10(5), 1978.
31. HAYES, R. F.; WATERMAN, D. A., & LANAT, D. D. *Building expert systems*. Addison-Wesley, 1973.
32. IBGE.*Net* Rio de Janeiro. Censo Agropecuário 1995-1996. Disponível em: <[www.sidraibge.gov.br](http://www.sidraibge.gov.br)>.

33. IBGE.*Net* Rio de Janeiro. Produção Agrícola Municipal 1990-2000. Disponível em: <[www.sidraibge.gov.br](http://www.sidraibge.gov.br) > .
34. ISHIZUKA, M.; FU, K. S.; YAO, J. T. P. Inexact inference for rule-based damage assessment of existing structure. *Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Vancouver, 1981.
35. KIM D. -Y., PARK J., Development of a Expert System for the Process Design of Axisymmetric Hot Steel Forging. *Journal of Material Processing Technology*,v.101:pp.223-230, 2000.
36. LIMA, U.A. Sistema de fermentação alcoólica. In: SEMANA DA FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA, 1., 1960, Piracicaba,. *Anais*. p.242-253.
37. MAIORELLA, B. L.; CASTILLO, F.J. Ethanol, biomass and enzyme production for whey waste abatement. *Process Biochemistry*, v. 19, p. 158-161, 1984.
38. MACEDO, C. I. *Análise da utilização de energia na produção de álcool de cana de açúcar*. Campinas, 1981. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) -Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
39. MCDERMOTT J. R1 : *A rule-based configurer of computer systems*. *Artificial Intelligence*, 19(1):39-88, September 1982.
40. NEGRÃO P. C. L. ; URBAN P. L. M. *Álcool como "Commodity" internacional*. Dez. 2004. Seção Artigos. Disponível em : < <http://www.ecen.com/eee47/eee47p/> >
41. NETO, E. R. *Sistemas Especialistas*. *.Net* , Seção Seminários. Disponível em: <<http://www.dsc.ufcg.edu.br/~eloi/seminarios/SE/index.html>> acessado em 20 nov. 2004.
42. NIIDA K.; ITOH J.; UMEDA T.; KOBAYASHI S.; ICHIKAWA A. Some expert system experiments in process engineering. *Chem. Eng. Res. Des.*64 : 372-380, sep. 1986.
43. O'BRIEN , J. A. *Sistemas de informação e as decisões gerenciais na era da Internet* ; Tradução Célio Knipel Moreira e Cid Knipel Moreira. 2 ed. São Paulo: Saraiva, 2004. p. 307-314.
44. ORPLANA – Organização de Plantadores de cana da região Centro-Sul do Brasil. *.Net*, Piracicaba, 2005. Seção Estatística. Disponível em: <<http://www.orplana.com.br/estatisticas.asp> > . Acesso em 05 jul. 2006.

45. PAIVA, T.C.B., SATO, S., VISCONTI, A.E.S., CASTRO, L.A.B. Continuous alcoholic fermentation process in a tower with recycling of flocculating yeast. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. v.57, n.58, p.535-541, 1996.
46. PAPAFOTIOU, K.; ASSIMACOPOULOS, D.; MARINO-KOURIS, D. Synthesis of a reverse osmosis desalination plant – An Object-Oriented Approach. *Trans I. Chem E. 70 A* : 304-311, may, 1992.
47. PASQUINI, C. *Desenvolvimento de um programa gerenciador de biblioteca e espectros e de um programa especialista para identificação de grupos funcionais de compostos orgânicos a partir de espectros de infravermelho*. Campinas, 1994. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas.
48. PINHEIRO, H. B. *Sistema especialista para operação de subestações de energia elétrica*. Campinas, 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.
49. POIANI, L. M. *Simulação estática e dinâmica de colunas de destilação, aplicadas à sistemas multicomponente a base de etanol e água*. Campinas, 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.
50. SAITO, J. R. *Análise das cadeias agroindustriais utilizando simulação computacional baseada na metodologia System Dynamics: um estudo de caso*. 2000. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
51. SCHALKOFF, R. J. *Artificial Intelligence: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, New York. 1990
52. SINICIO V. S. *Demanda e Conservação de Energéticos nas Usinas de Açúcar e Alcool Paulistas*. Campinas, 1992. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.
53. TAUPIER, L. O. G. & RODRÍGUES, G. G. *A cana-de-açúcar*. In: ICIDCA. Manual dos Derivados da Cana-de-Açúcar: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília: ABIPTI, 1999. Cap. 2.1, p.21-27.
54. TONSIG, S. L. *Engenharia de Software*. São Paulo: Futura, 2003.

55. UNDERWOOD, W. E. A CSA model-based power plant consultant. *Proceedings AAAI-82*, pp. 302-305, 1982.
56. YAMAKI, C. K. *Combinando avaliação parcial e introdução automática de controle para aumentar a eficiência de sistemas especialistas*. Campinas, 1990. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Estadual de Campinas.
57. YOURDON, E. *Análise Estruturada Moderna*. Tradução de Dalton Conde de Alencar. 3. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1990.
58. WAACK, R. S.; NEVES, M. F.; MORAES, S.; MARINO, M. K.; MAMONE, A.; SZASZ, A. H. Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar. In: FARINA, E. M. M. Q.; ZYLBERSZTAJN, D. (Coord.). *Competitividade no agribusiness brasileiro: versão final*. São Paulo: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada/USP, 1998. v. 5, p. 1-194. Disponível em: <<http://www.fea.usp.br/Fia/pensa/pdf/acucar.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2001.
59. WATERMAN, D. *A Guide to Expert Systems*. Ed. Addison-Wesley, 1986.
60. ZAPERLON, F.; ANDRIETTA, S. R. Fermentação contínua para a produção de álcool. *STAB Açúcar, Álcool e Sub-produtos*, V.10, n.4, p. 23-28, 1992.