

MODELAGEM DAS CADEIAS DE ATIVIDADES
PRODUTIVAS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA
VISANDO A APLICAÇÃO EM ESTUDOS DE
SIMULAÇÃO

Mamoru Carlos Yamada



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

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto

São Carlos - SP

1999



Class.	TESE-EESC
Gutt.	6337
Tempo	178/99

31100008026

545 1663717

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

Y19m

Yamada, Mamoru Carlos

Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando a aplicação em estudos de simulação / Mamoru Carlos Yamada. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.

Área: Engenharia Mecânica.

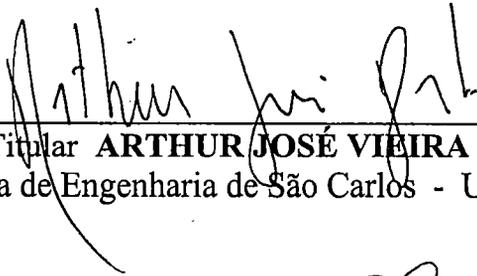
Orientador: Prof. Dr. Arthur José Vieira Porto.

1. Simulação.
2. Modelagem.
3. Rede de Petri.
4. Indústria sucroalcooleira. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **MAMORU CARLOS YAMADA**

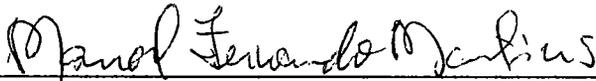
Dissertação defendida e aprovada em 30.08.1999
pela Comissão Julgadora:



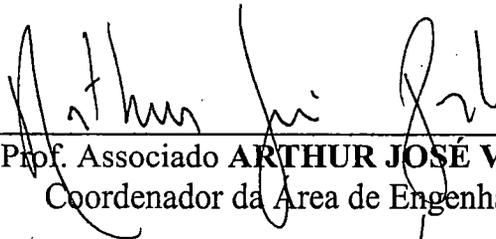
Prof. Titular **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **LUÍS CÉSAR RIBEIRO CARPINETTI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **MANOEL FERNANDO MARTINS**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
minha melhor escola.

À Maria,
minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

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

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

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

Ao amigo Mestre Edilson R. R. Kato, pela inestimável colaboração e amizade em todos os momentos.

À Diretoria, gerência e funcionários da Usina Santa Adélia S. A., pela valiosa e atenciosa colaboração no fornecimento de dados.

Aos amigos Sayuri, Osvaldo Asato, Ana Paula, Anna Cristina, Jandira, Renato, José Luiz, Lobão, Roberto, Orides, Ricardo, Tanaka, Osvaldo Oshiro, João e Valério, pela grande amizade, incentivo e ajuda.

Ao amigo Eng. Sílvio Guilherme Unzer, pela colaboração na geração da proposta de estudo e pela amizade.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Importância da indústria sucroalcooleira	1
1.2. Objetivos do trabalho	2
1.3. Estrutura do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Simulação de sistemas	4
2.1.1. Sistemas	5
2.1.2. Modelos	6
2.1.3. Passos para aplicação da simulação	7
2.2. Rede de Petri	12
2.2.1. Conceituação	12
2.2.2. Subclasses	14
2.2.3. Propriedades de comportamento	15
2.2.4. Métodos de análise	17
2.2.4.1. Árvore de cobertura (alcançabilidade)	17
2.2.4.2. Matriz de incidência e Equação de estado	19
2.2.4.3. Regras de redução simples	20
2.2.5. Algumas aplicações	20
2.3. Indústria sucroalcooleira	21
2.3.1. Panorama atual das tecnologias aplicadas ao sistema sucroalcooleiro	21
2.3.2. Estágio atual da modelagem e simulação na indústria sucroalcooleira	24
3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO	26
3.1. Setor agrícola	27
3.1.1. Cana-de-açúcar	27
3.1.2. Plantio	28
3.1.3. Corte e carregamento	31

3.1.4. Transporte	35
3.2. Setor industrial	37
3.2.1. Pesagem e amostragem	37
3.2.2. Recepção de cana	38
3.2.3. Preparo da cana	44
3.2.4. Extração	47
3.2.4.1. Moagem	48
3.2.4.2. Difusão	54
3.2.5. Concentração	55
3.2.5.1. Clarificação do caldo para fabricação de açúcar	55
3.2.5.2. Clarificação do caldo para fabricação de álcool	60
3.2.5.3. Evaporação	61
3.2.5.4. Fabricação de açúcar	62
3.2.6. Fabricação de álcool	69
3.2.6.1. Fermentação	69
3.2.6.2. Tratamento de levedura	71
3.2.6.3. Destilação	72
3.2.6.3.1. Epuração	74
3.2.6.3.2. Retificação	75
3.2.6.3.3. Desidratação	76
3.2.7. Armazenagem e expedição	77
3.2.8. Geração de vapor	78
4. MODELOS DO SISTEMA PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO	82
4.1. Plantio	83
4.2. Corte e carregamento	87
4.3. Transporte / Pesagem e amostragem	92
4.4. Recepção de cana	96
4.5. Preparo da cana	100
4.6. Extração	102
4.7. Clarificação	105
4.8. Evaporação	107
4.9. Fabricação de açúcar	109
4.10. Fermentação	113
4.11. Tratamento de levedura	115

4.12. Destilação	117
4.13. Armazenagem e expedição	122
4.14. Geração de vapor	125
5. CONCLUSÕES	129
ANEXO A - Simulação das seqüências de disparo - Pátio	131
ANEXO B - Simulação das seqüências de disparo - Corte e carregamento	132
ANEXO C - Simulação das seqüências de disparo - Transporte / Pesagem e Amostragem	136
ANEXO D - Simulação das seqüências de disparo - Recepção de cana	138
ANEXO E - Simulação das seqüências de disparo - Preparo da cana	141
ANEXO F - Simulação das seqüências de disparo - Extração	142
ANEXO G - Simulação das seqüências de disparo - Clarificação	144
ANEXO H - Simulação das seqüências de disparo - Evaporação	145
ANEXO I - Simulação das seqüências de disparo - Fabricação de açúcar	146
ANEXO J - Simulação das seqüências de disparo - Fermentação	150
ANEXO K - Simulação das seqüências de disparo - Tratamento de levedura	151
ANEXO L - Simulação das seqüências de disparo - Destilação	154
ANEXO M - Simulação das seqüências de disparo - Armazenagem	156
ANEXO N - Simulação das seqüências de disparo - Geração de vapor	158
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - Proposta de sistematização dos estudos de simulação	9
FIGURA 02 - Diagrama do processo de modernização do sistema agrícola e agroindustrial	22
FIGURA 03 - Diagrama do processo produtivo de uma usina sucroalcooleira ...	26
FIGURA 04 - Carregadeira de cana	32
FIGURA 05 - Colhedora de cana	33
FIGURA 06 - Corte e carregamento de cana crua colhida mecanicamente com trator-transbordo	34
FIGURA 07 - Carregamento de cana crua colhida mecanicamente com sistema de container	35
FIGURA 08 - Caminhão simples	36
FIGURA 09 - Conjunto "Romeu e Julieta"	36
FIGURA 10 - Treminhão	36
FIGURA 11 - Rodotrem	36
FIGURA 12 - Pátio de cana	38
FIGURA 13 - Barracão de cana, com descarregamento com ponte rolante	39
FIGURA 14 - Hilo hidráulico para descarregamento de cana inteira	40
FIGURA 15 - Tombador hidráulico para descarregamento de cana picada	41
FIGURA 16 - Balanço para descarregamento de cana em barracão	42
FIGURA 17 - Mesa alimentadora com inclinação de 45°	42
FIGURA 18 - Esteira de alimentação de cana	43
FIGURA 19 - Picador (a) de facas fixas; (b) de facas oscilantes	45
FIGURA 20 - Desfibrador convencional	46
FIGURA 21 - Eletroimã na esteira de cana	47
FIGURA 22 - Terno de moenda	48
FIGURA 23 - Rolo de moenda com camisa frisada	48
FIGURA 24 - Acumulador para o sistema hidráulico de pressão do rolo superior de moenda	50
FIGURA 25 - Calha Donnelly	52
FIGURA 26 - Coluna de sulfitação	56
FIGURA 27 - Aquecedor de caldo	57
FIGURA 28 - Decantador de caldo	59
FIGURA 29 - Esquema de funcionamento do filtro rotativo a vácuo para lodo ...	60

FIGURA 30 - Evaporador de caldo em corte	62
FIGURA 31 - Esquema de múltiplo efeito da evaporação	63
FIGURA 32 - Cozedor a vácuo em corte	64
FIGURA 33 - Turbina contínua para massa cozida em corte	65
FIGURA 34 - Turbina descontínua para produção de açúcar em corte	66
FIGURA 35 - Cristalizador em corte	66
FIGURA 36 - Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 2 massas	67
FIGURA 37 - Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 3 massas	68
FIGURA 38 - Sistema de fermentação contínua	71
FIGURA 39 - Coluna de destilação	73
FIGURA 40 - Secador de açúcar	77
FIGURA 41 - Caldeira aquatubular em corte	79
FIGURA 42 - Diagrama do sistema de plantio	84
FIGURA 43 - Modelagem do sistema de plantio	86
FIGURA 44 - Diagrama do sistema de corte e carregamento	88
FIGURA 45 - Modelagem do sistema de corte e carregamento	90
FIGURA 46 - Diagrama do sistema de transporte	93
FIGURA 47 - Diagrama do sistema de pesagem e amostragem	94
FIGURA 48 - Modelagem do sistema de transporte, pesagem e amostragem ...	95
FIGURA 49 - Diagrama do sistema de recepção de cana	97
FIGURA 50 - Modelagem do sistema de recepção de cana	98
FIGURA 51 - Diagrama do sistema de preparo da cana	100
FIGURA 52 - Modelagem do sistema de preparo da cana	101
FIGURA 53 - Diagrama do sistema de extração	102
FIGURA 54 - Modelagem do sistema de extração	104
FIGURA 55 - Diagrama do sistema de clarificação	105
FIGURA 56 - Modelagem do sistema de clarificação	107
FIGURA 57 - Diagrama do sistema de evaporação	108
FIGURA 58 - Modelagem do sistema de evaporação	109
FIGURA 59 - Diagrama do sistema de fabricação de açúcar	110
FIGURA 60 - Modelagem do sistema de fabricação de açúcar	112
FIGURA 61 - Diagrama do sistema de fermentação contínua	114
FIGURA 62 - Modelagem do sistema de fermentação	114
FIGURA 63 - Diagrama do sistema de tratamento e secagem de levedura	115
FIGURA 64 - Modelagem do sistema de tratamento de levedura	117

FIGURA 65 - Diagrama do sistema de destilação	118
FIGURA 66 - Modelagem do sistema de destilação	121
FIGURA 67 - Diagrama do sistema de armazenagem dos açúcares tipos 2, 3 e 4	122
FIGURA 68 - Diagrama do sistema de armazenagem do açúcar tipo 1	123
FIGURA 69 - Modelagem do sistema de armazenamento e expedição	125
FIGURA 70 - Diagrama do sistema de geração de vapor	126
FIGURA 71 - Modelagem do sistema de geração de vapor	128

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - Composição tecnológica da cana-de-açúcar	27
TABELA 02 - Ambientes de produção em função da produtividade	30
TABELA 03 - Produtividade das áreas colhidas e áreas escolhidas para reforma	84
TABELA 04 - Características das variedades de cana utilizadas pela usina Santa Adélia	94

RESUMO

YAMADA, M. C. (1999). *Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira visando a aplicação em estudos de simulação*. São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Este trabalho apresenta um estudo sobre a utilização dos conceitos de modelagem aplicada à indústria sucroalcooleira, visando obter um maior conhecimento sobre as cadeias de atividades produtivas neste ramo de empresa e, assim, fornecer subsídios para a construção de modelos para estudos de simulação das atividades do setor de açúcar e álcool. Utilizou-se uma empresa modelo para a aquisição das informações. Os modelos das cadeias de atividades foram validados com o auxílio da ferramenta de rede de Petri, através da análise de alcançabilidade, onde são simulados todos os caminhos possíveis. O estudo resultou em 14 conjuntos de atividades, englobando todas as etapas da sistema produtivo sucroalcooleiro, desde o plantio da cana até a expedição do açúcar e do álcool.

Palavras-chave: simulação, modelagem, rede de Petri, indústria sucroalcooleira

ABSTRACT

YAMADA, M. C. (1999). *Modelling of the chains of productive activities of the sugar cane industry, seeking the application in simulation studies*. São Carlos, 1999. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This work presents a study about the use of the concepts of applied modelling to the sugar cane industry, seeking to obtain a larger knowledge on the chains of productive activities in this company section and, like this, to supply subsidies for the construction of models for simulation of the activities of the section of sugar and alcohol. A company model was used for the acquisition of the information. The models of the chains of activities are validated with the aid of the Petri net tool, through the reachability analysis, where all the possible paths are simulated. The study resulted in 14 groups of activities, including all the stages of the sugar cane productive system, from the planting of the cane to the expedition of the sugar and of the alcohol.

Keywords: simulation, modelling, Petri net, sugar cane industry

1. INTRODUÇÃO

1.1. IMPORTÂNCIA DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

O setor sucroalcooleiro constitui-se, atualmente, no principal negócio agroindustrial nacional. Na safra 1996/97, foram colhidas cerca de 302 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, que geraram uma produção aproximada de 16,3 bilhões de litros de álcool, entre anidro, hidratado e outros fins, e 15 milhões de toneladas de açúcar, das quais 8,5 milhões consumidas no mercado interno e 6,5 milhões exportadas (Ferreira, 1998).

Com isso, o Brasil posiciona-se, no cenário internacional, como: o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, respondendo por 30% da produção mundial; o maior exportador de açúcar, seguido pela Austrália, que exporta 4,5 milhões de toneladas; o terceiro maior consumidor de açúcar, logo em seguida aos Estados Unidos, com 9 milhões de toneladas, e a Índia, com 16 milhões (Cabral, 1998).

Apesar da posição significativa no cenário mundial, o plantio de cana-de-açúcar ocupa uma área de 4 milhões de hectares aproximadamente, o que equivale a pouco mais de 1% da área agricultável do país, estimada em 350 milhões de hectares (Ferreira, 1998).

Segundo Ferreira (1998), o setor sucroalcooleiro emprega cerca de 1,4 milhão de trabalhadores em empregos diretos nas atividades de plantio, colheita, esmagamento e produção de cana-de-açúcar, álcool e açúcar, contribuindo com cerca de US\$ 15 bilhões para o PIB agrícola de 1996, o que representou de 16 a 17%.

A cultura da cana-de-açúcar apresenta uma forte concentração no estado de São Paulo. Segundo Balsadi (1996), o estado responde por aproximadamente 60% da produção total de cana-de-açúcar, ocupando uma área aproximada de 2 milhões de hectares e representando cerca de 28% do valor da produção agropecuária do Estado. Olivetti (1995) apresenta um estudo no qual a cana-de-açúcar representou 30,67% da produção agrícola de 1994/95, estimada em 6,9 bilhões de reais, sendo

o principal produto em 29 das 74 Delegacias Agrícolas (DA's) nas quais encontra-se dividido o estado.

O açúcar tem o seu valor consagradamente reconhecido como fonte de energia para os seres humanos. O álcool hidratado é utilizado como combustível para veículos; o álcool anidro é misturado à gasolina numa proporção de 24%. O Brasil é líder mundial em tecnologia de produção de álcool e tecnologia automotiva para seu uso, apresentando uma grande alternativa ao petróleo, especialmente no aspecto ecológico, além de vir de uma fonte renovável. O álcool é ainda aplicado à indústria de bebidas, perfumaria e farmácia.

Tal representação significativa na economia denota a complexidade do sistema produtivo sucroalcooleiro. Deste modo, a aplicação de conceitos e técnicas de modelagem e simulação no estudo deste tipo de sistema é de relevante importância, contribuindo com o esforço para a compreensão do seu funcionamento bem como dos fatores que o influenciam, e permitindo a avaliação de opções de planejamento sem a efetiva intervenção no sistema real, evitando-se que possíveis riscos de operação ineficaz ou sobrecarga de operação, falta de suprimentos e logística incorreta, entre outros inconvenientes.

O presente trabalho procura contribuir com tal esforço, buscando gerar modelos representativos das cadeias de atividades produtivas da indústria sucroalcooleira e, desta forma, ampliar o conjunto de conhecimentos sobre o funcionamento deste tipo de empresa.

1.2. OBJETIVOS DO ESTUDO

Este trabalho tem como objetivo efetuar a modelagem das cadeias de atividades produtivas de uma usina sucroalcooleira, de forma a fornecer informações para a construção de modelos para estudos de simulação das atividades sucroalcooleiras, disponibilizando ao profissional da área de planejamento subsídios para a análise das opções mais adequadas ao sistema estudado. O estudo deverá abranger todas as etapas produtivas, desde o plantio da cana-de-açúcar até a expedição do açúcar e do álcool.

A modelagem e a análise das propriedades dos modelos serão efetuados num editor de rede de Petri intitulado "Petri Net Tool", desenvolvido pelo Laboratório de Simulação de Sistemas de Eventos Discretos, do Departamento de Engenharia

Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, e deverão fornecer condições para as suas validações e posteriores utilizações.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos:

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que abrange os conceitos básicos de simulação de sistemas, com seus procedimentos para aplicação, e de redes de Petri, com suas propriedades e métodos de análise, e além da descrição do estágio atual do sistema produtivo sucroalcooleiro em relação às tecnologias aplicadas. O capítulo é finalizado com a apresentação de algumas aplicações de modelagem e simulação na indústria sucroalcooleira.

A descrição das cadeias de atividades do sistema sucroalcooleiro é apresentada no Capítulo 3, onde cada setor produtivo é detalhado em relação aos seus processos.

No Capítulo 4 apresenta-se a modelagem das cadeias de atividades produtivas do sistema sucroalcooleiro, baseada em dados reais fornecidos pela usina Santa Adélia S. A., da cidade de Jaboticabal, SP.

O Capítulo 5 traz as conclusões e aponta propostas para futuros desenvolvimentos do tema apresentado nesta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

A simulação de sistemas é uma técnica de resolução de problemas, seguindo as mudanças durante o tempo, de um modelo dinâmico de um sistema (Gordon, 1978). Um modelo de simulação é elaborado numa série de seções (diagramas de blocos), cada uma delas descrita matematicamente, sem uma preocupação excessiva com a complexidade. As equações, entretanto, precisam ser construídas e organizadas de modo que possibilitem a sua resolução simultânea.

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

A prática da simulação proporciona um maior discernimento sobre a natureza de um processo para identificar problemas específicos ou áreas problemáticas dentro de um sistema, além de desenvolver políticas ou planos específicos para um processo, testando novos conceitos e/ou sistemas antes de sua implementação.

O processo de simulação consiste em definir, formular, validar, analisar e recomendar, fornecendo uma especificação funcional, um modelo de simulação e uma avaliação estatística para que os gerentes dos sistemas simulados possam tomar as iniciativas e decisões.

2.1.1. SISTEMAS

A resolução de problemas através da utilização da simulação necessita da compreensão do conceito de sistemas e da definição dos problemas relativos a estes sistemas.

Para Schmidt & Taylor apud Law & Kelton (1991), um sistema é definido como um conjunto de entidades, por exemplo pessoas ou máquinas, que atuam e interagem juntas em direção à realização de alguma finalidade lógica. Seu estado é o conjunto de variáveis necessárias para descrever um sistema em um determinado tempo, relativo aos objetivos de um estudo (Law & Kelton, 1991).

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

Um sistema pode ser caracterizado através de um conjunto de variáveis, com cada combinação de valores de variáveis representando um único estado ou condição do sistema. A manipulação destes valores de variáveis simula o movimento do sistema de um estado para outro.

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

Um sistema discreto é aquele no qual as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos discretos no tempo (Law & Kelton, 1991). São caracterizados pela produção de produtos individualizados cuja variedade e tamanho do lote dependem do tipo de produto, das instalações industriais e da demanda. O interesse principal está nos eventos e as equações expressam as condições para um evento ocorrer. A simulação consiste em desviar as mudanças no estado do sistema que resultam da sucessão dos eventos, e envolve a modelagem de um sistema de acordo com o seu desenvolvimento sobre um período de tempo.

Um sistema contínuo é aquele no qual as variáveis de estado mudam continuamente em relação ao tempo (Law & Kelton, 1991). São caracterizados pelo controle contínuo e quantitativo, onde o interesse principal está em mudanças suaves. A simulação começa pela modelagem matemática e lógica, definindo-se como o estado do sistema irá mudar no tempo. As variáveis de estado são

minuciosamente definidas no modelo para se avaliar as medidas estatísticas. A mudança de tempo de um sistema contínuo é dirigida por equações diferenciais que definem a mudança no estado do sistema.

2.1.2. MODELOS

Para Law & Kelton (1991), um sistema pode ser estudado através de:

- Sistema real ou modelo do sistema: experimentar o sistema real operando sob as novas condições pode ser muito oneroso ou muito arriscado para a integridade do sistema. Por estas razões, normalmente necessita-se construir um modelo como uma representação do sistema e estudá-lo como um substituto para o sistema real.
- Modelo físico ou modelo matemático: um modelo físico pode ser útil para um estudo, porém não possui muita flexibilidade quando necessita-se analisar diferentes condições de operação. A grande maioria de modelos construídos para esta finalidade são matemáticos, representando um sistema em termos de relacionamentos lógicos e quantitativos que são manipulados e modificados para ver como o modelo reage e, então, como o sistema reagiria, se o modelo matemático for válido.
- Solução analítica ou simulação: quando o modelo matemático construído é suficientemente simples, pode ser possível trabalhar com os seus relacionamentos e quantidades para se alcançar uma solução exata, analítica. Para sistemas complexos, no entanto, os modelos matemáticos válidos são também complexos, excluindo qualquer possibilidade de uma solução analítica. Neste caso, o modelo deve ser estudado através da simulação, exercitando numericamente as entradas para ver como elas afetam as medidas de desempenho.

Um modelo de simulação é, então, um modelo matemático de um sistema real a ser estudado através da simulação.

Desde que um modelo é uma descrição de um sistema, ele também é uma abstração de um sistema. Para desenvolver uma abstração, deve-se decidir quais os elementos do sistema a serem incluídos no modelo. Para tomar-se tais decisões, um objetivo para a construção do modelo deve ser estabelecido. A referência a este objetivo deve ser feita para se decidir se um elemento de um sistema é significante

e, então, se deve ser modelado. O sucesso de uma modelagem depende de quão bem definidos são os elementos significantes e os relacionamentos entre eles (Pritsker, 1994).

Os modelos de simulação podem ser classificados em (Law & Kelton, 1991):

- Estáticos ou dinâmicos: um modelo de simulação estático é uma representação de um sistema em um determinado tempo, ou de um sistema em que o tempo simplesmente não o influencia. Por outro lado, um modelo de simulação dinâmico representa como um sistema evolui com ao longo do tempo.
- Determinísticos ou estocásticos: quando o modelo de simulação não contém nenhum componente probabilístico, é chamado de determinístico e a saída é “determinada”, uma vez que o conjunto de quantidades e relacionamentos de entrada no modelo tenham sido especificados. Um modelo de simulação estocástico, por sua vez, contém ao menos algum componente de natureza randômica, produzindo saídas aleatórias que devem ser tratadas como uma estimativa das características do modelo.
- Contínuos ou discretos: os modelos de simulação discretos e contínuos são definidos analogamente às definições de sistemas discretos e contínuos, ou seja, para modelos discretos as variáveis mudam instantaneamente em pontos discretos no tempo. Por outro lado, nos modelos contínuos as variáveis mudam continuamente em relação ao tempo.

2.1.3. PASSOS PARA APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO

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

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

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

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

A aplicação da simulação a muitos tipos de sistemas com diferentes tipos de estudos resultam em muitas variações na maneira de se realizar a simulação. Os passos para um estudo de simulação foram descritos por vários autores (Banks & Carson, 1984; Law & McComas, 1990; Shannon, 1975; Gordon, 1978; Law & Kelton, 1991; Pritsker, 1994). Um estudo de simulação, porém, não é uma simples seqüência de passos. O processo é interativo porque o ato de modelar revela importantes informações conforme o estudo avança. Os relacionamentos entre o sistema em estudo e o modelo de simulação são continuamente definidos e redefinidos.

Lobão & Porto (1997) apresentam uma proposta de sistematização de estudos de simulação (figura 01), baseada nos estudos dos vários autores citados. Eles salientam que a utilização completa ou parcial dos passos depende do grau de complexidade do projeto de estudo de simulação a ser desenvolvido.

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

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

Engloba a compreensão do funcionamento do sistema, identificando-se o propósito do estudo da simulação, as entradas necessárias e as saídas desejadas do modelo, e o comportamento desejado do sistema a ser modelado. O presente estudo deverá se focalizar especialmente neste passo.

- Passo 2: Elaboração de um esboço do modelo.

Um esboço inicial do modelo do sistema deve ser elaborado com a realização dos primeiros estudos sobre o fluxo de informações, a disposição física dos componentes, a hierarquização dos módulos, etc. Dependendo da abordagem escolhida para a construção do modelo, algumas ferramentas e metodologias podem ser aplicadas, tais como: diagrama de blocos, diagrama de objetos ou diagramas de fluxo de dados.

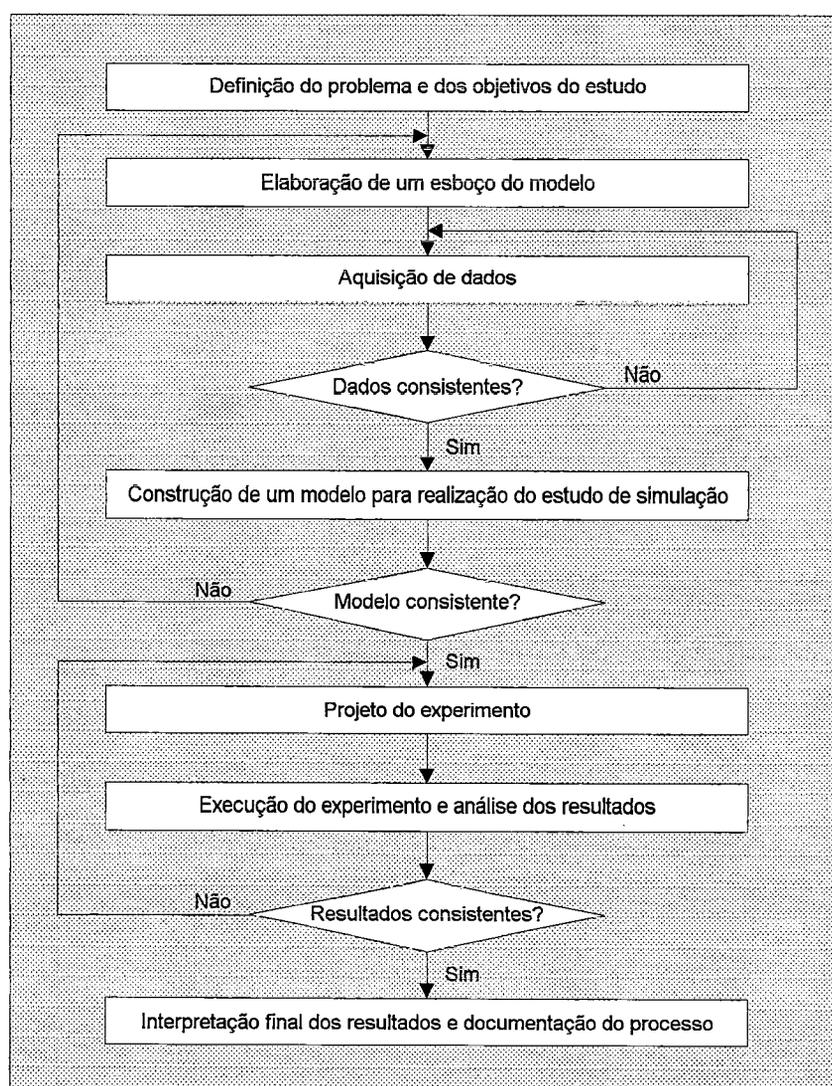


FIGURA 01 - Proposta de sistematização dos estudos de simulação (Lobão & Porto, 1997)

- Passo 3: Aquisição de dados.

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

- Passo 4: Validação dos dados.

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

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

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

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

- **Passo 6: Validação do modelo.**

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

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

- **Passo 7: Projeto do experimento.**

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

- **Passo 8: Execução do experimento e análise de resultados.**

Os dados utilizados e obtidos na execução do experimento devem ser organizados em forma de tabelas e gráficos e armazenados para posterior análise final.

- **Passo 9: Refino do projeto de experimento.**

Este passo deve ser realizado caso os resultados obtidos não sejam satisfatórios para a resolução do problema.

- **Passo 10: Análise final dos resultados e documentação do processo.**

A análise final dos resultados e a finalização do projeto devem ser organizados sob alguns aspectos:

- produção de documentação final que permita o rápido e claro entendimento do sistema por outros usuários quando da necessidade de ampliação ou manutenção do modelo;
- acesso restrito à documentação, de forma a evitar alteração involuntária da configuração do sistema, através de senhas, chaves de "hardware" e outros dispositivos.

2.2. REDE DE PETRI

2.2.1. CONCEITUAÇÃO

Redes de Petri são ferramentas de modelagem gráfica e matemática utilizadas para descrever e estudar sistemas de processamento de informações caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não determinísticos e/ou estocásticos (Murata, 1989).

Uma rede de Petri é um tipo particular de grafo direcionado, associado a um estado inicial chamado de marcação inicial (M_0). A representação gráfica consiste em 2 tipos de nós, chamados de lugares e transições, ligados por arcos direcionados, com peso. Os lugares podem conter marcas. Usando o conceito de condições e eventos, lugares representam condições e transições representam eventos. A presença de uma marca num lugar significa que a condição representada por este lugar é verdadeira. Uma transição, então, tem um certo número de lugares de entrada e saída associados a ela, representando pré-condições e pós-condições, respectivamente.

Matematicamente, uma rede de Petri pode ser definida como sendo uma quintupla $PN = (P, T, F, W, M_0)$, onde (Murata, 1989):

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ é um conjunto finito de lugares,
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições,
- $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ é o conjunto de arcos (relação de fluxo),
- $W: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ é a função peso,
- $M_0: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ é a marcação inicial,
- $P \cap T = \emptyset$ e $P \cup T \neq \emptyset$.

Normalmente uma rede de Petri sem marcação inicial é denotada por N , onde $N = (P, T, F, W)$. Para uma rede de Petri com marcação inicial a notação é (N, M_0) .

O conjunto de arcos F pode ser dividido nos seguintes subconjuntos:

- $\bullet t = \{p / (p,t) \in F\}$ é o conjunto de lugares de entrada de t ;
- $t\bullet = \{p / (t,p) \in F\}$ é o conjunto de lugares de saída de t ;
- $\bullet p = \{t / (t,p) \in F\}$ é o conjunto de transições de entrada de t ;
- $p\bullet = \{t / (p,t) \in F\}$ é o conjunto de transições de saída de t .

Para a definição de rede de Petri acima assume-se que não existam lugares e transições isolados, isto é, não há p ou t tal que $\bullet p = p\bullet = \emptyset$ ou $\bullet t = t\bullet = \emptyset$.

Para simular o comportamento dinâmico de um sistema, um estado ou marcação numa rede de Petri é modificado de acordo com a regra de disparo de uma transição:

- Uma transição t é dita habilitada se cada lugar de entrada p de t está marcada com pelo menos $w(p,t)$ marcas, onde $w(p,t)$ é o peso do arco de p para t .
- Uma transição habilitada pode ou não disparar, dependendo se o evento ocorre ou não.
- Um disparo de uma transição habilitada t remove $w(p,t)$ marcas de cada lugar de entrada p de t , e adiciona $w(t,p)$ marcas em cada lugar de saída p de t , onde $w(t,p)$ é o peso do arco de t para p .

Complementando a regra de disparo, uma transição sem lugar de entrada está incondicionalmente habilitada. Já o disparo de uma transição sem lugar de saída consome marcas, mas não produz nenhuma.

Alguns aspectos importantes das redes de Petri são abordados a seguir.

- Presença de "self-loop": um "self-loop" é um par de um lugar p e uma transição t onde p é simultaneamente um lugar de entrada e de saída de t . Uma rede de Petri sem "self-loop" é chamada de pura.
- Peso dos arcos: uma rede de Petri é chamada de ordinária se todos os pesos dos arcos forem iguais a um.
- Capacidade dos lugares: uma rede de Petri cujos lugares podem acomodar um número ilimitado de marcas é chamada de rede de capacidade infinita. Por outro lado, uma rede é chamada de rede de capacidade finita se, para cada lugar p existir uma capacidade $k(p)$ associada, representando o número máximo de marcas que o lugar p

pode conter em qualquer momento. Neste caso, para uma transição t estar habilitada, existe uma condição adicional que o número de marcas em cada lugar de saída p de t não pode exceder sua capacidade $k(p)$ após o disparo de t . Esta é a chamada regra de transição rigorosa, enquanto que a regra sem restrição de capacidade é chamada de regra de transição frágil ou simplesmente regra de transição.

Sobre o conceito de capacidade abordado acima existem características importantes. Dada um rede de Petri pura de capacidade finita (N, M_0) , obtém-se uma rede transformada (N', M_0') através da transformação complementar de lugar, baseada em 2 passos:

1° - adicionar um lugar complementar p' para cada lugar p , onde a marcação inicial de p' é dada por $M_0'(p') = k(p) - M_0(p)$;

2° - entre cada transição t e os lugares complementares p' desenhar novos arcos (t, p') ou (p', t) onde $w(t, p') = w(p, t)$ e $w(p', t) = w(t, p)$, de modo que a soma de marcas do lugar p e do seu complementar p' iguale sua capacidade $k(p)$ para cada lugar p , antes e após o disparo da transição t .

A rede transformada (N', M_0') obtida através dos passos acima apresenta uma característica que pode ser traduzida pelo seguinte teorema (Murata, 1989):

“Seja (N, M_0) uma rede pura de capacidade finita, onde a regra de transição rigorosa é aplicada. Seja (N', M_0') a rede obtida de (N, M_0) através da transformação complementar de lugar, onde a regra de transição frágil é aplicável a (N', M_0') . Então as duas redes (N, M_0) e (N', M_0') são equivalentes no sentido que ambas têm o mesmo conjunto total de seqüências possíveis de disparo.”

Deste modo, todas as propriedades associadas com uma rede de capacidade finita podem ser discutidas em termos daquelas com capacidade infinita obtidas através da transformação complementar de lugar.

2.2.2. SUBCLASSES

As subclasses das redes de Petri são definidas através da imposição de algumas restrições ao conceito geral. A seguir são apresentadas as principais.

1 - Máquina de estado (SM) é uma rede de Petri ordinária tal que cada transição t tenha exatamente um lugar de entrada e um lugar de saída, isto é:

$$|\bullet t| = |t\bullet| = 1 \text{ para todo } t \in T.$$

Esta subclasse tem a capacidade de representar conflitos, decisões ou escolhas, caracterizados pela estrutura na qual um lugar p tem 2 ou mais transições de saída.

2 - Grafo marcado (MG) é uma rede de Petri ordinária tal que cada lugar p tenha exatamente uma transição de entrada e uma transição de saída, isto é:

$$|\bullet p| = |p\bullet| = 1 \text{ para todo } p \in P.$$

Esta subclasse tem a capacidade de representar concorrências ou paralelismos de atividades, caracterizados pela estrutura na qual uma transição t tem 2 ou mais lugares de saída.

3 - Rede de escolha livre (FC) é uma rede de Petri ordinária tal que todo arco de um lugar é um único arco de saída ou um único arco de entrada para uma transição, isto é:

$$\text{para todo } p \in P, |\bullet p| \leq 1 \text{ ou } \bullet(p\bullet) = \{p\}; \text{ equivalentemente,}$$

$$\text{para todo } p_1, p_2 \in P, p_1\bullet \cap p_2\bullet \neq \emptyset \Rightarrow |p_1\bullet| = |p_2\bullet| = 1.$$

4 - Rede de escolha livre estendida (EFC) é uma rede de Petri ordinária tal que

$$p_1\bullet \cap p_2\bullet \neq \emptyset \Rightarrow p_1\bullet = p_2\bullet \text{ para todo } p_1, p_2 \in P.$$

5 - Rede de escolha assimétrica (AC) ou rede simples é uma rede de Petri ordinária tal que

$$p_1\bullet \cap p_2\bullet \neq \emptyset \Rightarrow p_1\bullet \subseteq p_2\bullet \text{ ou } p_1\bullet \supseteq p_2\bullet \text{ para todo } p_1, p_2 \in P.$$

2.2.3. PROPRIEDADES DE COMPORTAMENTO

As propriedades de uma rede de Petri podem ser divididas em 2 tipos: aquelas que são dependentes da marcação inicial, chamadas de propriedades de comportamento; e aquelas independentes da marcação inicial, chamadas de estruturais (Desrochers & Al-Jaar, 1994). Algumas das principais propriedades de comportamento são comentadas a seguir.

- “Alcançabilidade” (“Reachability”): uma marcação M_n é dita “alcançável” de uma marcação M_0 se existir uma seqüência de disparo que transforme M_0 em M_n . O conjunto de todas as possíveis marcações

alcançáveis a partir de M_0 é denotada por $R(M_0)$. Esta propriedade será utilizada na análise dos modelos a serem desenvolvidos neste trabalho.

- Limitação (“Boundedness”): uma rede de Petri (N, M_0) é dita k -limitada ou simplesmente limitada se o número de marcas em cada lugar não exceder um número finito k para qualquer marcação alcançável de M_0 . Para $k = 1$ a rede é dita segura. Pela verificação que a rede é limitada ou segura garante-se que não ocorrerá ultrapassagem de limite (“overflow”) de marcas nos lugares em qualquer seqüência de disparo que se execute.
- “Liveness”: uma rede de Petri (N, M_0) é dita “live” se, de qualquer marcação alcançada de M_0 , seja possível disparar qualquer transição da rede pela progressão através de alguma seqüência de disparo posterior. Isto significa que uma rede de Petri “live” garante uma operação livre de travamentos (“deadlocks”), não importando qual seqüência de disparo seja escolhida. É uma propriedade ideal para muitos sistemas. Desta forma, são definidos diferentes níveis de “liveness”. Uma transição t numa rede de Petri (N, M_0) é dita:
 - 0) morta (L0-“live”) se t nunca puder ser disparada em qualquer seqüência de disparo em $L(M_0)$, que é o conjunto de todas as seqüências possíveis de disparo de M_0 ;
 - 1) L1-“live” (potencialmente disparável) se t puder ser disparada pelo menos uma vez em alguma seqüência de disparo em $L(M_0)$;
 - 2) L2-“live” se, dado qualquer número inteiro positivo k , t puder ser disparada pelo menos k vezes em alguma seqüência de disparo em $L(M_0)$;
 - 3) L3-“live” se t aparecer infinitamente, com freqüência em alguma seqüência de disparo em $L(M_0)$;
 - 4) L4-“live” ou “live” se t é L1-“live” para toda marcação M em $R(M_0)$.
- Reversibilidade (“Reversibility”) e “Home state”: uma rede de Petri (N, M_0) é dita reversível se, para cada marcação M em $R(M_0)$, M_0 é alcançável de M . Então, numa rede reversível sempre se pode retornar à marcação inicial. Quando não há a necessidade de se retornar ao estado inicial mas somente a um determinado estado, define-se então um “home state”. Uma marcação M' é dita “home state” se, para cada marcação M em $R(M_0)$, M' é alcançável de M .

- Cobertura (“Coverability”): uma marcação M numa rede de Petri (N, M_0) é dita coberta se existir uma marcação M' em $R(M_0)$ tal que $M'(p) \geq M(p)$ para cada p na rede.
- Persistência (“Persistence”): uma rede de Petri (N, M_0) é dita persistente se, para quaisquer duas transições habilitadas, o disparo de uma transição não desabilita a outra. Uma transição numa rede persistente, uma vez habilitada, permanece habilitada até que seja disparada.

2.2.4. MÉTODOS DE ANÁLISE

As propriedades das redes de Petri podem ser analisadas através de alguns métodos, que podem ser classificados em 3 grupos (Murata, 1989): 1) Árvore de cobertura (alcunçabilidade), 2) Equação de estado, e 3) Técnicas de redução ou decomposição. O primeiro método pode ser aplicado a todas as classes de redes, mas é limitado a redes “pequenas” devido à complexidade de sua representação para redes “grandes”. Por outro lado, a equação de estado e as técnicas de redução são poderosas, porém, em muitos casos são aplicáveis somente em subclasses especiais das redes de Petri ou em situações especiais.

2.2.4.1. ÁRVORE DE COBERTURA (ALCANÇABILIDADE)

A partir da marcação inicial M_0 de uma rede de Petri (N, M_0) , pode-se obter uma nova marcação a cada transição habilitada. Este processo resulta numa representação em forma de árvore T , onde os nós representam marcações geradas de M_0 (a raiz) e suas sucessoras, e cada arco representa um disparo de transição que transforma uma marcação na outra.

No caso de redes ilimitadas, para manter-se a árvore com uma representação finita, utiliza-se um símbolo especial ω , representando a idéia de “infinito”. Para cada número inteiro n , valem as propriedades: $\omega > n$, $\omega \pm n = \omega$ e $\omega \geq \omega$.

A construção da árvore de cobertura segue o seguinte algoritmo:

- 1) Rotular a marcação inicial M_0 como a raiz e nomeá-la como “nova”.
- 2) Enquanto existirem novas marcações, fazer:

- 2.1) Selecionar uma nova marcação M .
- 2.2) Se M é idêntica a uma marcação no caminho da raiz até M , então nomear M como "velha" e escolher outra nova marcação.
- 2.3) Se não houverem transições habilitadas em M , nomear M como "fim".
- 2.4) Enquanto existirem transições habilitadas em M , fazer, para cada transição habilitada t em M :
 - 2.4.1) Obter a marcação M' que resulta do disparo de t em M .
 - 2.4.2) Se existir no caminho da raiz até M uma marcação M'' tal que $M'(p) \geq M''(p)$ para cada lugar $p \in M' \neq M''$, isto é, M'' é coberta, então substituir $M'(p)$ por ω para cada p tal que $M'(p) > M''(p)$.
 - 2.4.3) Introduzir M' como um nó, desenhar um arco com rótulo t de M até M' , e nomear M' como "nova".

Algumas das propriedades das redes de Petri podem ser estudadas através da árvore de cobertura T :

- Uma rede (N, M_0) é limitada e, então, $R(M_0)$ é finita se e somente se ω não aparecer em quaisquer rótulos dos nós em T .
- Uma rede (N, M_0) é segura se e somente se zeros e uns aparecerem nos rótulos dos nós em T .
- Uma transição t é morta se e somente se não aparecer como um rótulo de arco em T .
- Se M é alcançável de M_0 , então existe um nó M' tal que $M \leq M'$.

Para uma rede de Petri limitada, a árvore de cobertura é chamada de árvore de alcançabilidade, pois contém todas as possíveis marcações alcançáveis. Neste caso, todas as propriedades apresentadas na seção anterior podem ser estudadas pela árvore de alcançabilidade.

A desvantagem do método da árvore de cobertura é ser um método exaustivo. Além disso, devido à perda de informação causada pelo uso do símbolo ω , os problemas de alcançabilidade e "liveness" geralmente não podem ser resolvidos pela aplicação isolada do método.

2.2.4.2. MATRIZ DE INCIDÊNCIA E EQUAÇÃO DE ESTADO

O comportamento dinâmico de vários sistemas estudados em engenharia podem ser descritos através de equações diferenciais ou algébricas. Para sistemas modelados por redes de Petri existem matrizes de equações, porém a possibilidade de solução destas equações é um tanto limitada, em parte por causa da natureza não-determinística inerente aos modelos e por causa da restrição que as soluções devem ser números inteiros não-negativos.

Para uma rede de Petri pura N com n transições e m lugares, a matriz de incidência $A = [a_{ij}]$ é uma matriz $n \times m$ de inteiros, com $a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^-$, onde $a_{ij}^+ = w(i,j)$ é o peso do arco da transição i para seu lugar de saída j e $a_{ij}^- = w(j,i)$ é o peso do arco para a transição i do seu lugar de entrada j .

Com isso, pode-se escrever a equação de estado para uma rede de Petri:

$$M_k = M_{k-1} + A^T \cdot u_k, \quad k = 1, 2, \dots, \text{ onde:}$$

- M_k é um vetor coluna $m \times 1$ que representa a marcação atual ou estado atual da rede; a j -ésima entrada de M_k representa o número de marcas no lugar j imediatamente após o k -ésimo disparo em alguma seqüência de disparo;
- M_{k-1} é um vetor coluna $m \times 1$ que representa a marcação ou estado da rede de Petri antes do k -ésimo disparo;
- A^T é a transposta da matriz de incidência A ;
- u_k é um vetor coluna $n \times 1$ com $n - 1$ entradas iguais a zero e uma entrada igual a 1 na i -ésima posição, indicando que a transição i dispara no k -ésimo disparo.

Supondo que uma marcação desejada M_d seja alcançável de uma marcação inicial M_0 de uma rede de Petri através de uma seqüência de disparo $\{u_1, u_2, \dots, u_d\}$, a equação de estado pode ser rescrita como:

$$A^T \cdot x = \Delta M, \text{ onde:}$$

- A^T é a transposta da matriz de incidência A ;
- $x = \sum_{k=1}^d u_k$ é um vetor coluna $n \times 1$ de números inteiros não-negativos chamado de vetor contador de disparo; a i -ésima entrada de x denota o número de vezes que a transição i deve disparar para transformar M_0 em M_d ;
- $\Delta M = M_d - M_0$.

Logo, se uma marcação M_d é alcançável de uma marcação inicial M_0 o sistema de equações algébricas lineares descrito acima tem solução.

2.2.4.3. REGRAS DE REDUÇÃO SIMPLES

Para facilitar a análise de um sistema grande, o modelo em rede de Petri pode ser reduzido, preservando-se as suas propriedades. Existem muitas técnicas de transformação, sendo que as mais simples são (Murata, 1989): fusão de lugares e/ou transições em série, fusão de lugares e/ou transições em paralelo e eliminação de lugares e/ou transições em "self-loop". Estas transformações conservam as propriedades de "liveness", segurança e limitação.

O desenvolvimento de métodos de transformação que permitam reduções que preservem as propriedades dos sistemas a serem analisados é muito importante, pois a maior fraqueza das redes de Petri é o problema da complexidade na modelagem de grandes sistemas.

2.2.5. ALGUMAS APLICAÇÕES

A ferramenta de rede de Petri tem sido aplicada em diversos campos. Murata (1989) apresenta aplicações nas áreas de fluxo de dados em informática, protocolos de comunicação, sistemas multiprocessadores ou distribuídos.

Wieting (1996) utilizou redes de Petri de alto nível para representar a estrutura discreta no desenvolvimento de uma metodologia para modelagem e simulação de sistemas híbridos.

Redes de Petri do tipo lugar-transição temporizadas foram usadas para simular a dinâmica da porção contínua de sistemas de produção por lote (Barros, 1996).

Fanni (1998) apresenta uma discussão sobre a modelagem qualitativa de sistemas físicos através de redes de Petri.

Desrochers & Al-Jaar (1994) apresenta diversas aplicações em sistemas de manufatura, tais como modelagem de linhas de transferência, funcionamento de máquinas e controles de sistemas flexíveis de manufatura, entre outros modelos.

2.3. INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A exemplo das demais atividades econômicas, o setor agroindustrial vem passando, nos últimos anos, por um processo marcante de transformações.

Segundo Portugal (1998), a abertura do mercado e a rápida evolução da ciência têm pressionado os produtos agrícolas e as suas respectivas cadeias produtivas por maior competitividade e desenvolvimento tecnológico, seja como fator de manutenção ou ganho de posições no mercado internacional, seja para evitar perdas no mercado interno. Ainda segundo este autor, a pesquisa neste setor deve buscar novas ferramentas como complemento ao planejamento determinístico, de modo a redesenhar a sua postura estratégica neste contexto turbulento e de mudanças aceleradas.

Deste modo, a necessidade da implantação de alternativas de técnicas, equipamentos e recursos que beneficiem o planejamento e controle do processo produtivo faz-se presente devido às pressões de mercado, onde a busca por incrementos na produtividade e na melhoria da qualidade dos produtos foi adotada por várias usinas sucroalcooleiras como uma estratégia para manter sua competitividade no setor.

O processo de modernização do sistema agrícola e agro-industrial é apresentado na figura 02 (Kato, 1997). Neste contexto muitos dos conjuntos de conhecimentos do campo da ciência e da tecnologia ainda aguardam novas soluções para viabilizar a sua incorporação ao desenvolvimento do sistema produtivo das usinas sucroalcooleiras.

2.3.1. PANORAMA ATUAL DAS TECNOLOGIAS APLICADAS AO SISTEMA SUCROALCOOLEIRO

A busca por novas estratégias de crescimento tornou-se mais clara a partir do final da década de 80, com a crise do Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL). Com a retração do mercado de álcool hidratado, diversas usinas e destilarias promoveram a diversificação de suas atividades econômicas através do processamento e comercialização dos subprodutos (Vian, 1997).

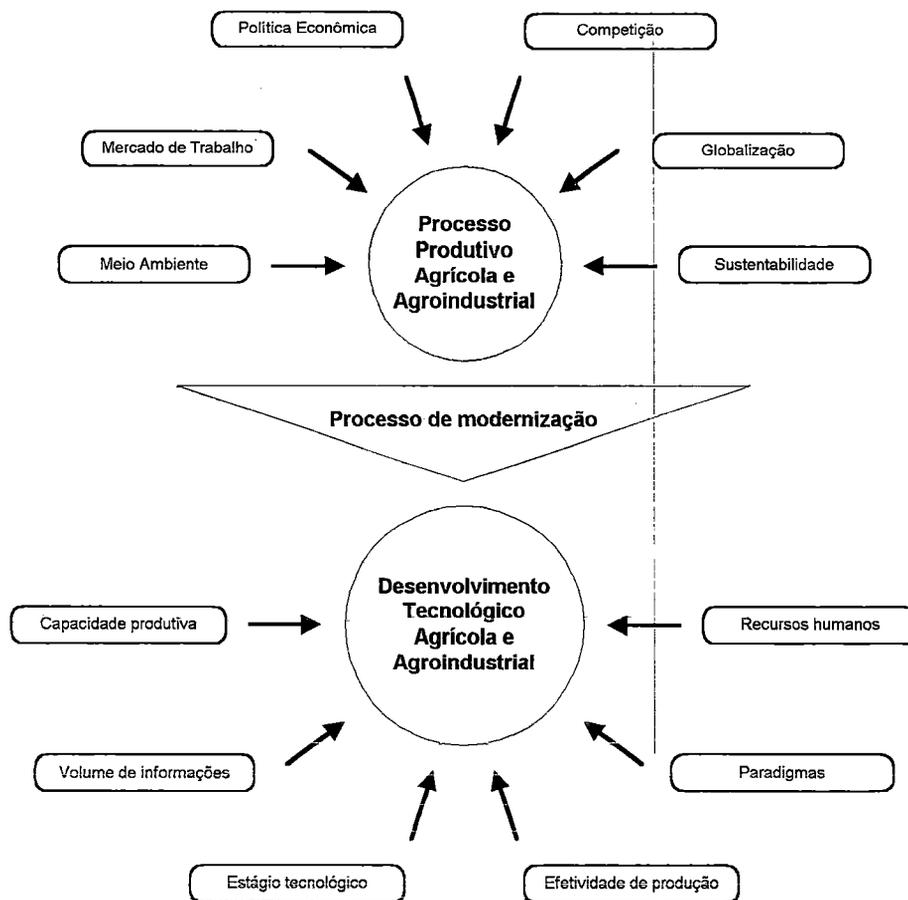


FIGURA 02 - Diagrama do processo de modernização do sistema agrícola e agroindustrial (Kato, 1997)

Desta forma, grupos econômicos pertencentes ao setor sucroalcooleiro têm implantado e difundido rapidamente novas tecnologias agrícolas no setor. Eid (1996) aborda esse progresso técnico e seu efeito no aumento da produtividade, relatando algumas tecnologias recentes:

- modernização do transporte de cana, com o uso de caminhões cada vez mais adaptados à essa atividade;
- implantação do carregamento mecânico e do corte mecanizado da cana em substituição ao trabalho manual dos operários agrícolas;
- utilização da biotecnologia para obtenção de variedades de cana com melhor qualidade, bem como para o desenvolvimento do controle biológico de doenças da cana-de-açúcar;

- racionalização do sistema de transporte de cana, com estudos de logística para melhor aproveitamento das viagens dos caminhões;
- crescimento na utilização da tecnologia digital para automação industrial;
- utilização de equipamentos mais eficazes e eficientes, como o difusor, para o aumento da produtividade;
- co-geração de energia elétrica com o excedente de bagaço da cana;
- diversificação na utilização do bagaço da cana, com o desenvolvimento de estudos para sua utilização em vários setores: na alimentação animal, como combustível, como adubo orgânico, na produção de celulose, papel e embalagens, e na fabricação de aglomerados para a indústria de construção, entre outros;
- aproveitamento dos resíduos do processamento industrial, tais como a fuligem da queima do bagaço, a torta da filtragem do caldo e a vinhaça da destilação do caldo fermentado, na adubação orgânica em substituição parcial à adubação química.

Em relação ao setor agrícola, Milan (1992) desenvolveu um modelo representativo da produção de cana-de-açúcar, considerando os relacionamentos entre quatro subsistemas: agrônômico, colheita, transporte e mecanização, para identificar fatores críticos dos custos do processo de desenvolvimento da cana-de-açúcar, bem como estratégias que possam levar à redução desses custos, tanto em relação às decisões gerenciais quanto em relação a alternativas de equipamentos ou técnicas.

A mecanização do processo de corte da cana tem merecido muitos estudos. Tillman (1994) avaliou o sistema de colheita semi-mecanizada em cana-de-açúcar com e sem queima prévia, constatando que, embora tanto o desempenho operacional quanto o econômico do sistema de colheita para a condição de cana sem queima prévia foram relativamente inferiores aos verificados para a condição de cana queimada, há evidências de benefício sob os aspectos ambientais e energéticos na adoção do sistema de colheita de cana crua, em relação ao aproveitamento racional do potencial energético disponível na biomassa vegetal não queimada.

Em relação à utilização de colhedora de cana, Furlani Neto (1995) avaliou o desempenho deste equipamento em canaviais com e sem queima prévia, concluindo que, embora o sistema de colheita mecânica de cana crua resulte numa diminuição no rendimento de corte em relação ao sistema de colheita mecanizada

com queima prévia, observa-se melhoria na qualidade tecnológica e diminuição nas impurezas minerais, além da eliminação da perda energética pela queima dos canaviais.

Segundo Eid et al. (1998) a co-geração de energia elétrica pelas indústrias sucroalcooleiras através da queima do bagaço pode ser uma alternativa viável às hidrelétricas e ao uso de gás natural como complemento da oferta de energia elétrica, especialmente por estar disponível nos meses de seca, quando a capacidade de fornecimento das usinas hidrelétricas diminui.

A base para automatização de uma usina foi apresentada por Kato (1995), que descreveu o percurso da cana pelos processos industriais a serem controlados, até a obtenção do açúcar e do álcool.

No setor de planejamento e controle da produção Rocha (1995) apresentou a aplicação de uma nova tecnologia de gerenciamento agrícola para usinas e destilarias através de SIG - Sistema de Informação Geográfica.

2.3.2. ESTÁGIO ATUAL DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO NA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

A indústria sucroalcooleira é caracterizada pelo processo contínuo na fabricação de seus produtos finais e pela sazonalidade no período de produção, que é coincidente com o período que compreende as estações secas, onde o cultivo e desenvolvimento da cana-de-açúcar são mais favorecidos. Logo, o faturamento do período produtivo de uma usina responde por todo os custos anuais, inclusive os do período em que não se tem produção.

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

Neste sentido, diversos estudos investigam estas possibilidades.

Mathew & Rajendran (1993) utilizaram a simulação para analisar a programação das atividades de manutenção de uma usina açucareira a fim de

determinar o melhor intervalo entre as paradas para manutenção, visando a minimização de perda por paradas em função de quebra de equipamentos.

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

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

Hahn (1995) desenvolveu um software para o planejamento de transporte de cana, visando minimizar o número de equipamentos necessários para efetuar o transporte.

O balanço de massa e energia de uma usina é de vital importância para o dimensionamento das capacidades necessárias de energia e insumos para o pleno funcionamento do sistema produtivo, a fim de satisfazer as necessidades de produção. Camargo (1990) apresentou um procedimento para o equacionamento desse balanço, baseando-se na Lei de Conservação de Massa e na Lei de Conservação de Energia, e subdividindo o modelo de uma usina em oito módulos integrados: lavagem, preparo e moagem, tratamento de caldo, evaporação, cozimento e centrifugação de açúcar, fermentação, destilação, turbo-geração e geração de vapor. Além do balanço de massa e energia, o modelo apresenta cálculos de rendimento e de eficiência de produção, entre outros parâmetros importantes.

3. DESCRIÇÃO DO SISTEMA PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO

O núcleo central da indústria sucroalcooleira pode ser descrito como uma seqüência de processos agrícolas e industriais que geram a cana-de-açúcar e a transformam em produtos finais, o açúcar e o álcool, e em subprodutos, como o bagaço e a vinhaça, que servem como insumos para o próprio funcionamento dos processos. O bagaço é utilizado principalmente como matéria-prima para a geração de vapor para os processos industriais e para a geração de energia elétrica. A vinhaça é utilizada na irrigação dos canaviais.

A seqüência de processos agrícolas e industriais está representada no diagrama da figura 03.

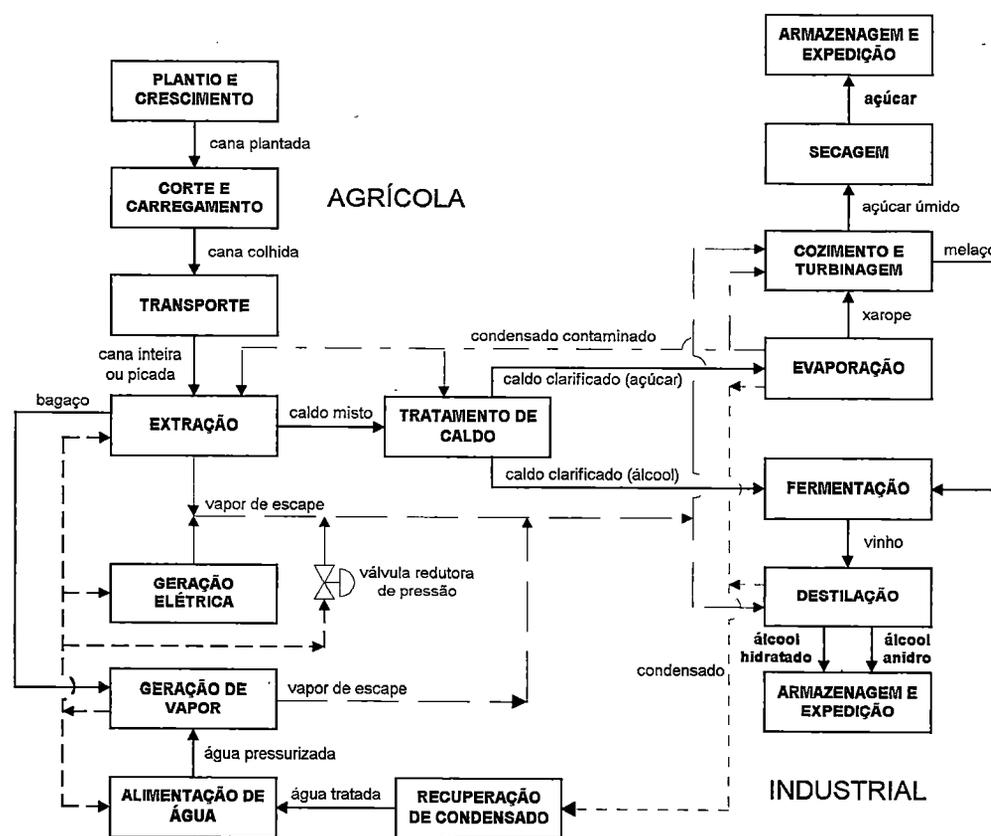


FIGURA 03 - Diagrama do processo produtivo de uma usina sucroalcooleira

3.1. SETOR AGRÍCOLA

3.1.1. CANA-DE-AÇÚCAR

A matéria-prima para a produção de açúcar e álcool na indústria sucroalcooleira nacional é a cana-de-açúcar. É uma planta da família *Gramineae*, do gênero *Saccharum*.

Segundo Delgado et al. (1975), para a indústria de açúcar e álcool, a composição considerada da matéria-prima é a composição tecnológica apresentada na tabela 01, sendo que os principais elementos são:

TABELA 01 - Composição tecnológica da cana-de-açúcar (Delgado et al., 1975)

ELEMENTO / TEOR (%)				
Fibra / 8 - 14	Caldo / 86 - 92			
	Celulose Pentosanas Lignina	Água / 75 - 82	Sólidos solúveis / 18 - 25	
Açúcares / 15,5 - 24			Não-açúcares / 1 - 2,5	
			Orgânicos / 0,8 - 1,8	Inorgânicos / 0,2 - 0,7
			Sacarose / 14,0 - 23,8	Aminoácidos Gorduras Ceras Matérias corantes Ácidos etc.
Glicose / 0,2 - 1,0	Frutose / 0,0 - 0,5			

- fibra: é o conjunto de substâncias insolúveis em água, sendo constituída principalmente de celulose, lignina e pentosanas. A porcentagem depende da variedade e da idade da cana e das condições climáticas, entre outros fatores. Valores entre 8 e 14% são os mais comuns, sendo o teor ideal da ordem de 12,5%.

Os altos teores de fibra dificultam a extração do caldo, necessitando-se de um melhor preparo da cana para moagem, além de uma maior embebição que, apesar de ser benéfica à extração, pode criar dificuldades nas demais fases do processamento, especialmente na

evaporação. Por outro lado, o baixo teor de fibra pode diminuir sensivelmente a produção de bagaço, provocando o desequilíbrio térmico da fábrica.

- caldo: é uma solução diluída e impura de sacarose. É constituído de água e de sólidos solúveis, sendo estes caracterizados como:
 - açúcares: são representados pela sacarose, pela glicose e pela frutose. Do ponto de vista qualitativo, a sacarose é o componente mais importante, com teor médio de 18%. Os demais açúcares aparecem em menores proporções, dependendo do estágio de maturação da cana que lhe deu origem, sendo, em média, de 0,4 e 0,1% para a glicose e para a frutose, respectivamente. A mistura, em partes iguais, destes 2 açúcares denomina-se açúcar invertido.
 - não-açúcares orgânicos: são representados por uma série de substâncias como: matéria nitrogenada, gorduras, ceras, pectinas, ácidos livres e combinados e matérias corantes.
 - não-açúcares inorgânicos: representam as cinzas e têm como componentes principais sílica, potássio, fósforo, cálcio, sódio, magnésio, enxofre, ferro, alumínio e cloro. Em geral, esses elementos são fatores negativos de recuperação de sacarose, afetando a eficiência da evaporação e cristalização da sacarose na fábrica. O potássio aparece em maior proporção e, devido à sua alta solubilidade em água, é de difícil eliminação no processo de clarificação, comportando-se como substância formadora de melado. O cálcio, o magnésio e a sílica depositam-se nas tubulações dos vasos evaporadores, provocando as incrustações. A exceção deste grupo é o fósforo, que assume papel importante na clarificação do caldo.

3.1.2. PLANTIO

A área de plantio de uma usina é dividida em talhões, porções de terreno que possuem uma certa homogeneidade física. Normalmente a determinação dos tamanhos dos talhões é feita através da delimitação por cursos d'água, elevações abruptas do terreno, rodovias, entre outros. Para a otimização das manobras e do

trânsito dos veículos para o carregamento da cana dentro da área plantada são feitos carreadores dentro do canavial.

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

A qualidade da cana-de-açúcar é muito variável, chegando a divergir dentro de uma mesma região, em diferentes anos, sofrendo influência especialmente das condições climáticas, das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, do tipo de cultivo empregado, da variedade e idade da cana, da irrigação e da fertirrigação. Assim, a qualidade da cana tem como características principais:

- período de maturação – corresponde ao período necessário para que a planta atinja o seu pico de concentração de sacarose. Esse período é maior para o 1º corte, sendo diminuído para os cortes seguintes. As qualidades mais comuns são: precoce, de 6 meses; média, de 12 meses; e tardia, de 18 meses.
- adaptabilidade ao ambiente de produção – os ambientes de produção são determinados em função das condições de umidade, relevo, composição química do solo, entre outros fatores. A COOPERATIVA DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO (1995) desenvolveu uma classificação dos ambientes de produção (tabela 02), elaborada em função da produtividade média ponderada real de 4 cortes de cana-de-açúcar nas safras 88/89 a 92/93. De acordo com essa classificação existem qualidades de cana mais adequadas, em termos de produtividade, para determinados tipos de ambientes de produção.

Através da análise dessas características, cada usina desenvolve um conjunto de variedades comerciais de cana adequados à sua realidade.

Após o corte, uma pequena porção da planta, denominada de soqueira, permanece no solo, juntamente com as raízes. O crescimento e desenvolvimento da soqueira origina uma nova planta. Para isso, o talhão com soqueira deve ser preparado, através de algumas etapas:

TABELA 02 - Ambientes de produção em função da produtividade (COPERSUCAR, 1995)

Ambiente	Produtividade (toneladas por hectare)
A	acima de 95
B	de 90 a 95
C	de 85 a 90
D	de 80 a 85
E	abaixo de 80

- limpeza das palhas e outros resíduos sólidos;
- tratamento através de adubação química;
- irrigação com chuvas e/ou fertirrigação com vinhaça.

Um talhão pode ser colhido algumas vezes sem a necessidade de ser replantado. A cada corte, porém, as plantas diminuem gradativamente seu potencial de concentração de sacarose e sua produtividade (toneladas de cana por hectare), até atingir um ponto no qual sua colheita torna-se inviável economicamente. Em média, é no 4º corte que o canavial atinge essa condição.

Nestas condições, as áreas que abrigam tais plantas devem passar por um estágio de reforma, na qual as soqueiras são retiradas do solo, e este passa por um processo mais elaborado de preparo, que consiste nas seguintes etapas:

- limpeza das palhas e outros resíduos sólidos;
- tratamento para correção da deficiência nutricional do solo decorrente do próprio cultivo da cana-de-açúcar;
- pousio ou repouso do solo para que este possa atingir o equilíbrio na sua composição, pela absorção dos componentes adicionados na etapa de tratamento;
- plantio e colheita de cultura leguminosa, tal como o amendoim ou a soja, para propiciar a reabsorção e fixação de nitrogênio no solo;
- irrigação com chuvas e/ou fertirrigação com vinhaça.

Após estas etapas, o talhão está preparado para o plantio de novas mudas de cana-de-açúcar produzidas em viveiros, que são locais dentro da área de plantio designados para a produção de mudas. Uma boa muda deve ter uma relação de 1 para 10, ou seja, uma muda deve ter o potencial de gerar 10 plantas. A multiplicação pode ser feita de duas formas: no campo, onde a muda é dividida e as

partes resultantes são novamente plantadas em repetidas etapas até atingir-se um número de mudas satisfatório; e em laboratório, através da multiplicação de gemas com a aplicação de hormônios que proporcionam um crescimento acelerado.

A fertirrigação através da vinhaça e das águas residuais utilizada durante o crescimento do canavial tem por objetivo aproveitar o potencial de fertilização da composição da vinhaça na lavoura, além de irrigá-la em períodos secos. O transporte do material a ser aplicado pode ser realizado de duas formas:

- caminhões-tanque, que são abastecidos com vinhaça e encaminhados até a lavoura;
- canais de aspersão, projetados dentro da lavoura de modo a transportar o material por gravidade, aproveitando a declividade do terreno.

A forma de aplicação pode ser por:

- montagem direta, onde um sistema de bombeamento, constituído por uma moto-bomba e um bico aspersor com possibilidade de rotação, é instalado no caminhão-tanque ou em algum ponto dos canais de aspersão;
- veículos auto-propelidos, constituídos de um carretel de mangueira cilíndrica adaptado com um bico aspersor. O carretel é desenrolado com o auxílio de um trator. Uma bomba envia o material a ser aplicado para dentro da mangueira. Conforme o bico aspersor vai distribuindo o material, o carretel vai sendo enrolado e a mangueira recolhida. Com isso, o bico aspersor vai se movendo a uma velocidade constante e irrigando áreas diferentes.

3.1.3. CORTE E CARREGAMENTO

Com o canavial desenvolvido, passa-se à fase do corte da cana, que pode ser manual ou mecanizado.

Para o corte manual normalmente efetua-se a queima prévia do canavial, com o intuito de eliminar palhas, facilitando a entrada dos cortadores na lavoura. Após a queima, a cana deve ser colhida dentro de um certo limite de tempo, que é o tempo de pós-queima, pois a partir desse ponto, a ação de microorganismos na decomposição da cana pode atingir um nível elevado e comprometer significativamente a sua qualidade. Além disso, ocorre a intensificação do processo

de transformação da sacarose em outros tipos de açúcares que não são cristalizáveis, o que diminui a produtividade. Em média, esse tempo gira em torno de 72 horas.

A produtividade média dos trabalhadores do corte de cana é de 10 toneladas por 10 horas de trabalho, em áreas com queima da cana, caindo para 6 toneladas em áreas sem queima, o que demonstra a utilidade da queima para este tipo de corte.

Após o corte, a cana fica depositada em fileiras sobre o solo, sendo carregada para o reboque através de uma carregadeira (figura 04), que amontoa os feixes de cana e os deposita no reboque que a acompanha ao longo do talhão.



FIGURA 04 - Carregadeira de cana

O corte mecanizado é efetuado normalmente sem queima prévia da cana. Neste caso, a colhedora de cana separa as palhas, corta e pica a cana, e carrega até um reboque tracionado por um trator que vai acompanhando a colhedora (figura 05). As palhas são separadas por exaustores, e ficam depositadas no solo.

O trabalho de uma colhedora de cana corresponde ao trabalho de 50 trabalhadores aproximadamente, e pode ser realizado também no período noturno. Para um bom rendimento neste tipo de corte devem ser observados alguns pontos:

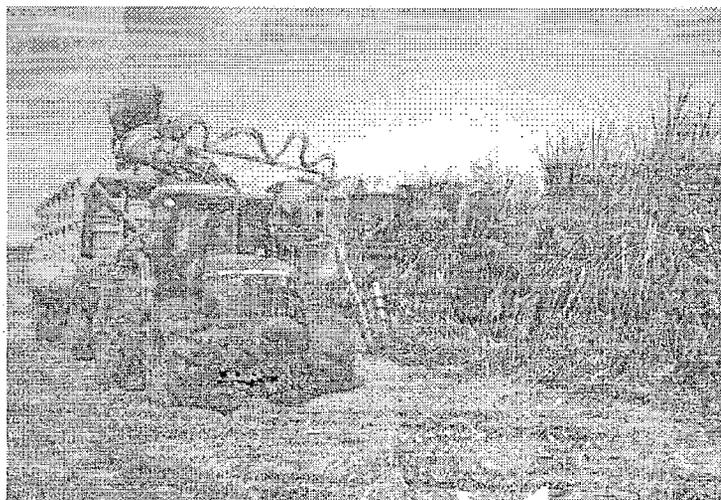


FIGURA 05 - Colhedora de cana

- lay-out de sulcação: os sulcos devem ser eqüidistantes, as fileiras de cana devem ser longas e deve-se evitar ruas mortas, ou seja, duas ou mais ruas que terminam num mesmo ponto;
- relevo: deve-se colher preferencialmente em terrenos planos ou levemente inclinados, embora colhedoras mais modernas, adaptadas com esteira para movimentação, já conseguem trabalhar nesses tipos de terreno, e deve-se evitar terrenos irregulares ou pedregosos.

Tanto para o corte manual quanto para o mecanizado existem alguns sistemas de carregamento da cana nos caminhões que a transportam até a usina.

Alguns dos mais utilizados são:

- trator-reboque: o reboque vazio é desengatado do caminhão e engatado num trator, que o movimenta durante o carregamento, evitando a entrada do caminhão dentro do canavial (figura 04). Além do carregamento de cana nos reboques, o trator realiza a movimentação destes no campo, com operações como engate e desengate dos caminhões, mudança de talhão e manobras de posicionamento.
- trator-transbordo: neste caso, o trator é engatado num par de caçambas com basculamento lateral (figura 06), que são carregadas e transbordadas para dentro dos reboques, evitando-se as operações de engate e desengate.

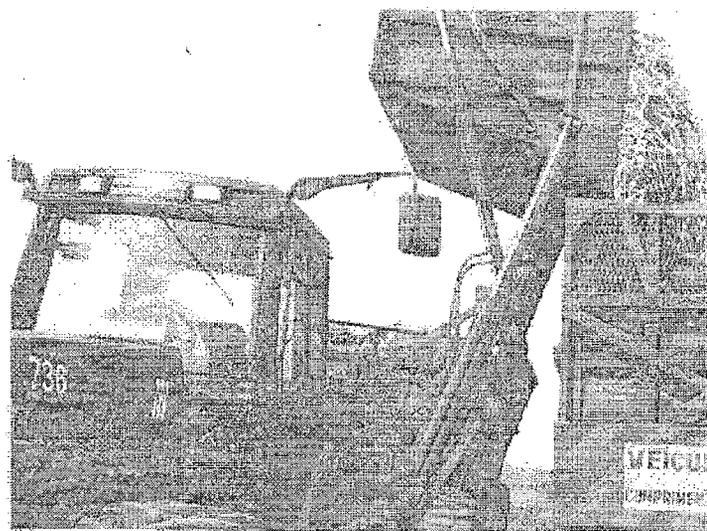


FIGURA 06 - Corte e carregamento de cana crua colhida mecanicamente com trator-transbordo

- container: o carregamento é feito em containers apoiados em carrocerias puxadas por um trator durante o carregamento (figura 07), sendo, em seguida, colocados na carroceria do caminhão, com o auxílio de uma empilhadeira.

Atualmente, o Decreto Estadual N°. 42056 de 06/08/97 que, em conjunto com o Decreto Federal N°. 2661 que regulamenta o Código Florestal (Lei N°. 4771 de 15/09/65), legislam, entre outros assuntos, sobre cronogramas para a eliminação gradual da queima (Macedo, 1998). Dessa forma, o índice de mecanização do corte da cana deve aumentar, o que gera a necessidade um investimento em novas colhedoras, assim como um replanejamento do sistema de colheita e recepção de cana.

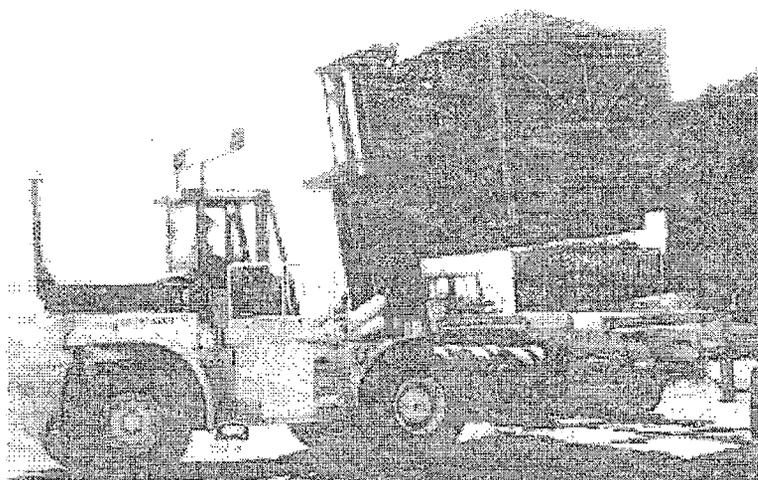


FIGURA 07 - Carregamento de cana crua colhida mecanicamente com sistema de container

3.1.4. TRANSPORTE

O transporte da cana da lavoura para o setor industrial de uma usina se dá através de caminhões. Após o carregamento, a cana deve ser transportada até a usina, onde deve ser descarregada, liberando o caminhão para retornar à lavoura.

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

As configurações mais comuns são:

- caminhão simples ou trucado (figura 08), com capacidade de carga de 10 a 20 toneladas.

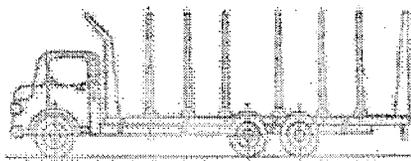


FIGURA 08 - Caminhão simples (Sato)

- caminhão trucado com um reboque ("Romeu e Julieta"), com capacidade de carga de 30 a 35 toneladas (figura 09).

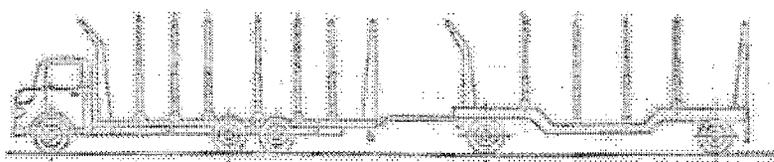


FIGURA 09 – Conjunto "Romeu e Julieta" (Sato)

- caminhão trucado com dois reboques (Treminhão), com capacidade de carga de 45 a 50 toneladas (figura 10).



FIGURA 10 – Treminhão (Sato)

- cavalo mecânico com dois reboques (Rodotrem), com capacidade de carga de 50 a 60 toneladas (figura 11).

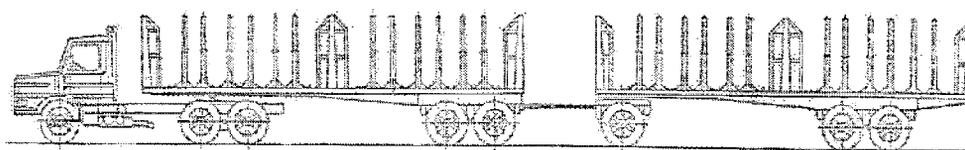


FIGURA 11 – Rodotrem (Sato)

A capacidade de carga está ligada à densidade do feixe de cana transportado. Esta, por sua vez, depende de alguns fatores, tais como: variedade da cana, arranjo do feixe (cana ordenada em fileiras ou aleatoriamente), forma de corte (cana inteira ou picada), altura do feixe, entre outros.

As configurações descritas atendem tanto o transporte de cana inteira quanto o de cana picada.

Os caminhões com grande capacidade de carga são os mais utilizados, pois sua utilização tem-se mostrado mais viável economicamente, sendo os caminhões simples ou trucados utilizados para distâncias curtas ou em algumas situações emergenciais, tais como insuficiência de espaço para manobra e condições desfavoráveis das estradas.

Cada viagem de um caminhão consome um considerável tempo, especialmente quando estão carregados. Desse modo, deve-se analisar quais distâncias são viáveis para se transportar cana, pois quanto maior a distância do local de carregamento de cana em relação à usina, maior o tempo e energia consumidos para a chegada dessa cana, além de aumentar o risco de uma falha no abastecimento, que pode ocasionar a interrupção do processo industrial. Através dessa análise, chega-se ao raio econômico, que se traduz na maior distância economicamente viável para se efetuar o transporte de cana até a unidade produtora. Algumas soluções podem ser implementadas para a melhoria desse índice, tais como a troca de áreas distantes por áreas mais próximas à usina e o investimento no aumento da produtividade das áreas mais próximas, em substituição à busca de cana em áreas distantes

3.2. SETOR INDUSTRIAL

3.2.1. PESAGEM E AMOSTRAGEM

Ao entrar na usina, o caminhão passa pela balança para ser pesado com carga. Após a descarga, é pesado novamente, agora vazio. A diferença entre as duas pesagens é o peso total transportado.

Após a 1ª pesagem (carregado) o caminhão segue para o Laboratório de PCTS (Pagamento de Cana por Teor de Sacarose) para a amostragem, que

consiste na coleta de amostras em 3 pontos pré-determinados na lateral de cada de cada reboque para determinar-se o teor de sacarose da carga. É com base nesse teor de sacarose que são pagos os fornecedores de cana.

3.2.2. RECEPÇÃO DE CANA

A recepção da cana proveniente da lavoura é feita através do descarregamento dos caminhões no pátio ou barracão, ou diretamente nas mesas alimentadoras.

O pátio de cana é um espaço a céu aberto no qual são estocadas pilhas de cana inteira (figura 12). A movimentação dessa cana é feita por tratores adaptados com garras, tanto para empilhamento quanto para posterior suprimento das mesas alimentadoras. A capacidade de armazenamento do pátio está limitada à altura de elevação da garra do trator.

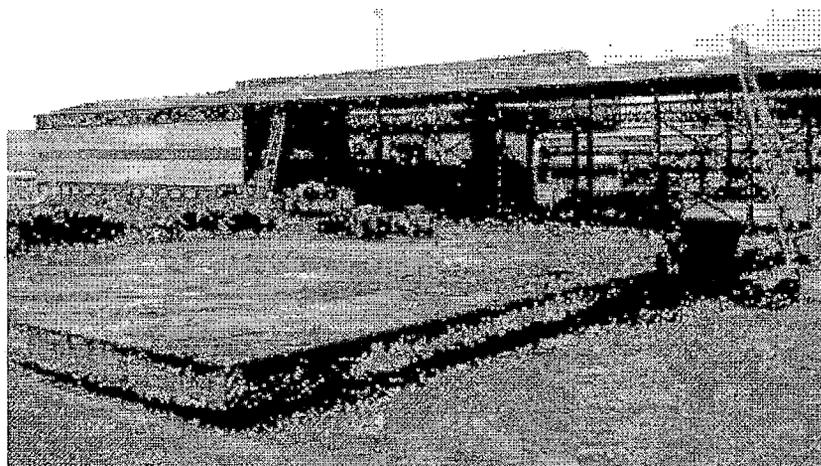


FIGURA 12 - Pátio de cana

Outras características do sistema de armazenamento em pátio são (Sato):

- investimento inicial menor em infra-estrutura;
- custo elevado de manutenção dos tratores;
- limitação na altura de armazenamento, necessitando de área proporcionalmente maior;

- consumo elevado de combustível dos veículos utilizados para a movimentação da cana;
- necessidade de mesa alimentadora com parte traseira aberta ou com mecanismo de abertura e fechamento.

O barracão é um galpão coberto, normalmente sem paredes, que pode ser o prolongamento do próprio edifício das moendas (figura 13). Possui ao menos uma ponte rolante munida de garra hidráulica ou balanço para movimentação da cana.

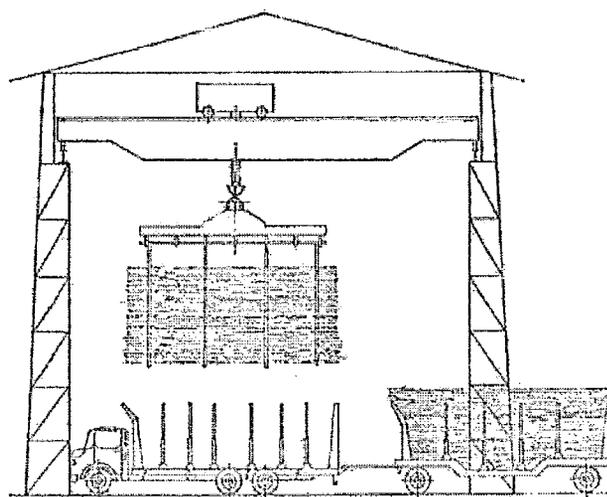


FIGURA 13 - Barracão de cana, com descarregamento com ponte rolante (Sato)

Outras características desse sistema são (Sato):

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

Algumas usinas não utilizam o armazenamento de cana em pátio ou barracão. Neste caso, o descarregamento dos caminhões é feito diretamente nas mesas alimentadoras. A vantagem desse sistema, em relação ao sistema de armazenamento em pátio, é que não há necessidade da utilização das máquinas

carregadoras; em relação ao armazenamento em barracão, não há o investimento na construção de um barracão e na aquisição de uma ponte rolante. Por outro lado, existe a necessidade de um controle rigoroso da programação de chegada de caminhões na usina, visto que a formação de filas de caminhões na recepção, ocasionada por falhas na programação, gera desperdício de tempo dos caminhões parados. Além disso, existe o risco de interrupção de fornecimento de cana devido às quebras de caminhões durante o transporte.

Segundo Sato, o descarregamento de cana dos caminhões é realizado normalmente por:

- hilo: equipamento mecânico ou hidráulico composto de uma estrutura tubular com altura variando entre 13 e 15 m, que sustenta um sistema de cabos e polias que movimentam uma viga horizontal no sentido ascendente e descendente (figura 14). Os cabos, que ficam sob a carga de cana, são presos na traseira da mesa alimentadora ou da rampa e a outra extremidade é engatada na viga horizontal. O descarregamento ocorre pelo tombamento da carga através da elevação da viga horizontal. O hilo pode ser fixo ou móvel, onde a estrutura é presa numa plataforma que se move sobre trilhos. É utilizado mais comumente para o descarregamento de cana inteira.

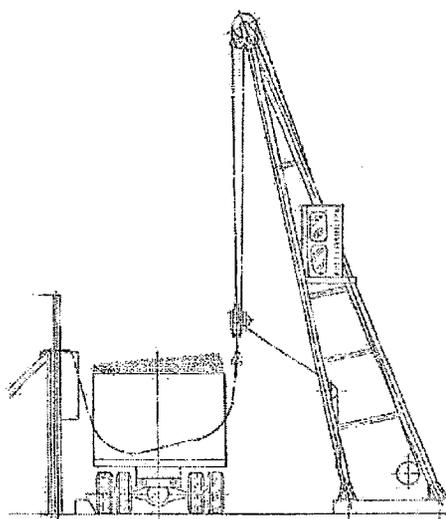


FIGURA 14 - Hilo hidráulico para descarregamento de cana inteira (Sato)

- tombador hidráulico: guindaste hidráulico fixo no solo, composto por dois braços mecânicos articulados que, acoplados à base da carroceria, bascula-a lateralmente enquanto a tampa lateral se abre, fazendo a carga fluir diretamente para a esteira de alimentação de cana (figura 15). É o sistema mais prático para descarregamento de cana picada.

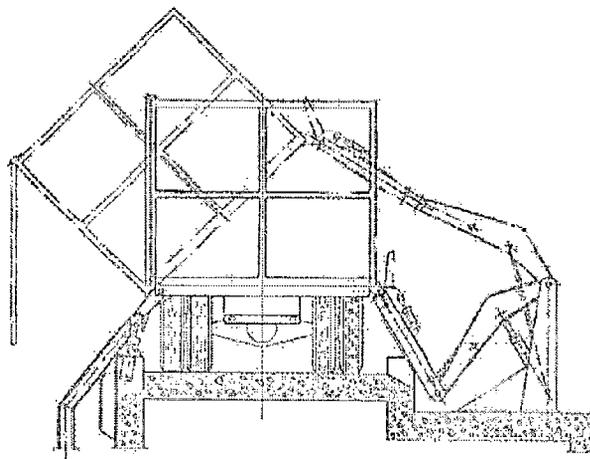


FIGURA 15 - Tombador hidráulico para descarregamento de cana picada (Sato)

- balanço: guindaste hidráulico utilizados em conjunto com pontes rolantes para descarga de cana inteira dentro do barracão (figura 16). A cana é suspensa por cabos pendentes da viga colocados manualmente de forma a laçar o feixe de cana. O desenlace do feixe é feito hidráulicamente pelo operador da ponte.

A cana descarregada deve ser conduzida à moendas ou difusores de uma maneira uniforme e contínua. Essa interligação é feita através de mesas alimentadoras e esteiras transportadoras.

A mesa alimentadora tem como função principal interligar a cana descarregada e a esteira de cana. É um equipamento transportador muito largo e curto, com leito retangular ou mesmo quadrado, sempre posicionado perpendicularmente às esteiras de cana (figura 17). Tal formato é devido à necessidade do recebimento de uma carga completa dos caminhões de uma só vez, o que não é conveniente para uma esteira de cana.

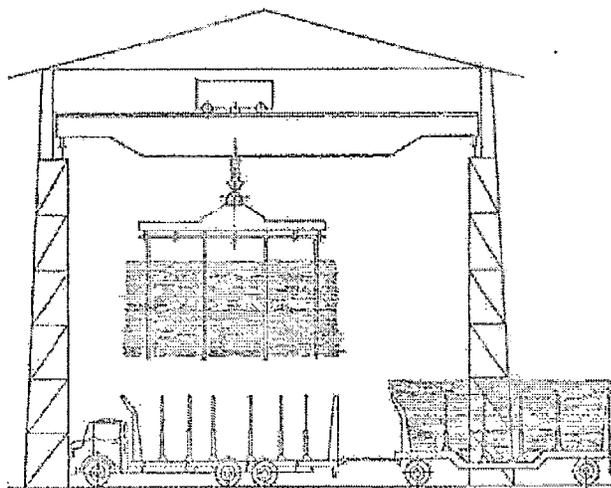


FIGURA 16 - Balanço para descarregamento de cana em barracão (Sato)

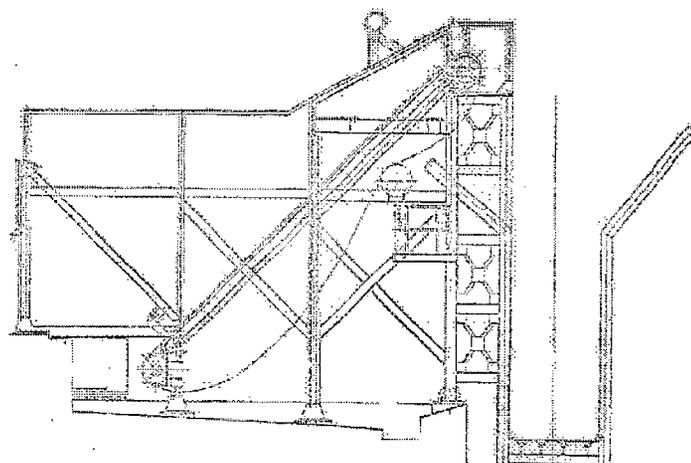


FIGURA 17 - Mesa alimentadora com inclinação de 45° (Sato)

Outra função da mesa é propiciar a lavagem da cana sobre o seu leito. Por um tubo perfurado que a cruza de um lado a outro, a água para lavagem é aplicada sobre a camada de cana, retirando parte da terra e outras impurezas sólidas presentes. Após essa operação, a água é enviada para um sistema de decantação, sendo, então, retornada às mesas alimentadoras por bombeamento. Tal lavagem é utilizada somente em canas inteiras, pois as picadas perderiam uma quantidade

significativa de sacarose devido à maior área de exposição. Muitas usinas, porém, estão procurando eliminar esta operação do processo, a fim de aumentar o rendimento industrial pela eliminação de perda de sacarose.

As mesas alimentadoras podem ser divididas em:

- convencionais: a inclinação do leito em relação à horizontal varia de 0 a 18° no sentido ascendente. A capacidade de alimentação é elevada, pois a camada de cana sobre a mesa é espessa. A lavagem de cana é deficiente, devido a esta espessa camada de cana dificultar a penetração de água. O controle da alimentação é difícil, dependendo muito da habilidade do operador.
- 45°: a inclinação é de 45°. Fornece uma camada de cana mais uniforme, de pouca espessura, possibilitando uma lavagem mais eficiente da cana, utilizando uma quantidade menor de água. Entretanto a capacidade de alimentação é menor, sendo necessária uma maior velocidade. O controle da alimentação torna-se mais fácil.

As esteiras de cana complementam o processo de transporte e alimentação de cana para as moendas. Uma esteira de cana é um transportador metálico, fechado lateralmente com chapas de aço, onde o fundo é constituído de chapas perfiladas, chamadas taliscas, presas às correntes e que se movem juntas (figura 18). A função é conduzir a cana para o setor de preparo. Podem transportar tanto cana inteira quanto picada.

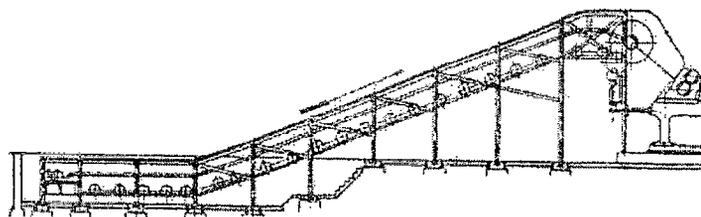


FIGURA 18 - Esteira de alimentação de cana (Hugot, 1977)

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

Para a alimentação com cana inteira, a obtenção de uma boa alimentação, segundo Sato, inicia-se no carregamento de cana no campo. Um feixe bem distribuído, com as canas bem alinhadas, faz com que o caminhão consiga carregar uma boa quantidade de cana de uma forma segura. O descarregamento fica facilitado, com as canas bem soltas umas em relação às outras. Com as canas “desembaraçadas” aumenta-se a probabilidade delas caírem na esteiras na posição horizontal, o que proporciona a formação de camadas bem uniformes de cana, sem falhas ou excessos.

3.2.3. PREPARO DA CANA

A cana possui uma estrutura sólida e a sacarose encontra-se na polpa interna envolta em casca dura. Portanto, antes de ser realizado o trabalho de extração do caldo, a cana deve passar por um processo de preparo, com o intuito de (Sato):

- romper a estrutura dura da cana, desagregando os tecidos fibrosos e transformando-os em partículas com granulometria uniforme;
- abrir e romper o maior número de células possíveis, sem que ocorra extração de caldo;
- aumentar a densidade da cana.

Para a extração do caldo com moendas, o aumento da densidade da cana proporciona um material homogêneo que facilita o controle e a uniformidade de alimentação. O rompimento de células torna a embebição mais eficiente, pois promove uma maior diluição e lavagem da sacarose nas células abertas. Portanto, um bom preparo de cana é de fundamental importância para se obter um compromisso entre alta moagem e elevada extração.

Para o processo de difusão, a combinação de células abertas e fibras longas é um fator decisivo para se conseguir boa permeabilidade no colchão de cana, tornando, assim, o processo físico-químico de lixiviação e percolação eficiente dentro do difusor para se obter elevada extração de sacarose.

Os principais equipamentos utilizados para o preparo de cana são:

- nivelador: eixo formado por braços curvos, girando de forma que a parte mais próxima à esteira tenha movimento discordante à mesma, cuja

finalidade é regularizar a distribuição da cana na esteira e nivelar a camada a uma medida determinada.

- picador: eixo giratório robusto no qual são montados suportes que sustentam jogos de facas, que são lâminas com gumes cortantes que rompem as canas sobre a esteira (figura 19). Os jogos de facas podem ser fixos ou oscilantes, sendo os primeiros utilizados geralmente no preparo de cana para moendas, e os segundos para o preparo de cana para difusor. A prática universal é utilizar o picador girando de tal forma que a parte inferior se mova em sentido concordante ao movimento da esteira.

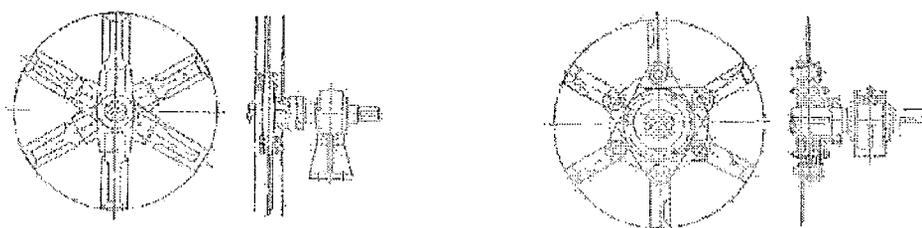


FIGURA 19 - picador (a) de facas fixas; (b) de facas oscilantes (Sato)

- desfibrador: normalmente é posicionado após o picador, para complementar o trabalho deste. A forma construtiva deste equipamento é semelhante à do picador, porém conta com uma placa desfibradora e o tambor alimentador (figura 20). As lâminas, chamadas de martelos, não possuem gumes cortantes. O desfibrador gira de modo que a parte inferior se mova em sentido contrário ao movimento da esteira. O tambor alimentador é posicionado em frente ao rotor do desfibrador em um nível um pouco acima e tem a função de direcionar a cana entre o martelo e a placa desfibradora. Esta tem formato curvo que acompanha o diâmetro de giro dos martelos e possui saliências na sua parte interna. Pelo próprio movimento do rotor do desfibrador, auxiliado pelo tambor alimentador, a cana é forçada a passar entre a placa e o martelo onde ocorre o desfibramento devido ao cisalhamento da camada.

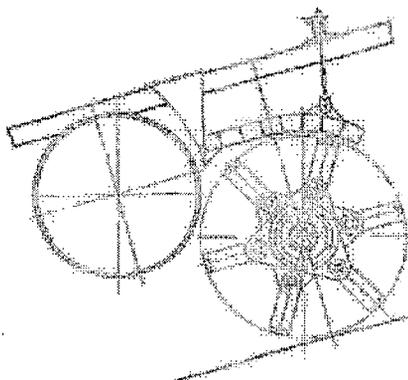


FIGURA 20 - Desfibrador convencional (Sato)

Existem também desfibradores alimentados verticalmente, de construção semelhante aos convencionais, porém mais robustos. São montados na queda da cana na ponta da esteira de cana. Necessitam de faca espalhadora ou outro tipo de equipamento para uniformizar a alimentação. Fornecem um preparo melhor, porém a potência consumida é maior.

O trabalho realizado pelos equipamentos de preparo de cana são medidos através do índice de preparo, que mede a relação percentual de pol (porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada) das células abertas em relação ao pol total da cana (COPERSUCAR, 1996). No preparo convencional, com um picador e um desfibrador convencional, o índice varia de 80 a 85%. Na instalação com desfibrador vertical o índice varia de 90 a 92%.

Finalizando o preparo, a cana deve passar por um eletroimã (figura 21), para que sejam retirados materiais metálicos estranhos ao processo que porventura estejam no meio da camada de cana. Podem ser partes de esteiras, pedaços das garras das máquinas carregadoras, facas ou martelos, etc.

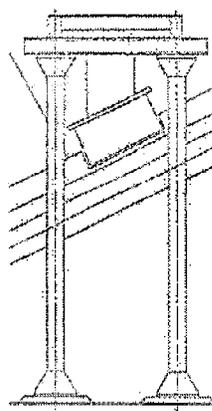


FIGURA 21 – Eletroimã na esteira de cana (Sato)

3.2.4. EXTRAÇÃO

A extração consiste em retirar o máximo de açúcar contido na cana através da remoção do seu caldo e pode ser realizada por um dos processos: moagem ou difusão.

3.2.4.1. MOAGEM

Na moagem a extração do caldo é obtida por sucessivos esmagamentos da camada de bagaço. Além disso, deve ser gerado um bagaço final em condições de umidade favoráveis a uma queima eficiente nas caldeiras. O processo é efetuado pelos termos de moenda, conjuntos de rolos que, girando engrenados, esmagam a cana, retirando seu caldo e eliminando o bagaço para o próximo esmagamento (figura 22). Seus principais componentes são:

- Castelo, a estrutura na qual são apoiados os rolos da moenda, os mancais e cabeçotes;
- Rolo, o eixo cilíndrico ajustado com um cubo usinado com frisos, chamada de camisa que, trabalhando em conjunto com outro, promove o esmagamento e a conseqüente extração do caldo presente na cana (figura 23). Cada terno possui um rolo superior, um de entrada, um de saída e um de pressão. A cana sofre dois esmagamentos, sendo o 1º

entre o superior e o de entrada e o 2º entre o superior e o de saída. O rolo de pressão auxilia na alimentação adequada da cana para o terno.

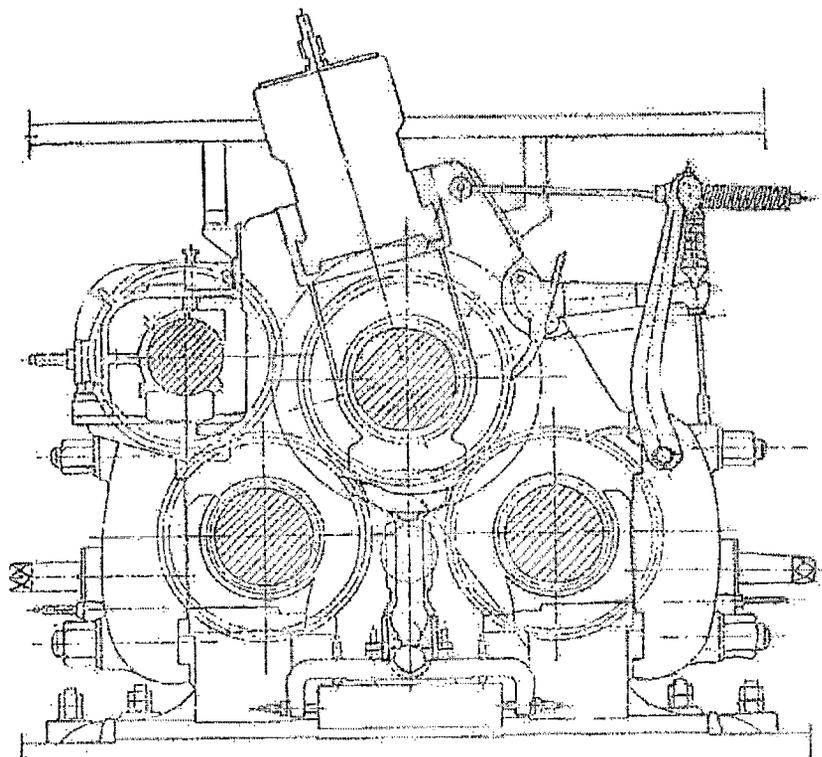


FIGURA 22 - Terno de moenda (Sato)

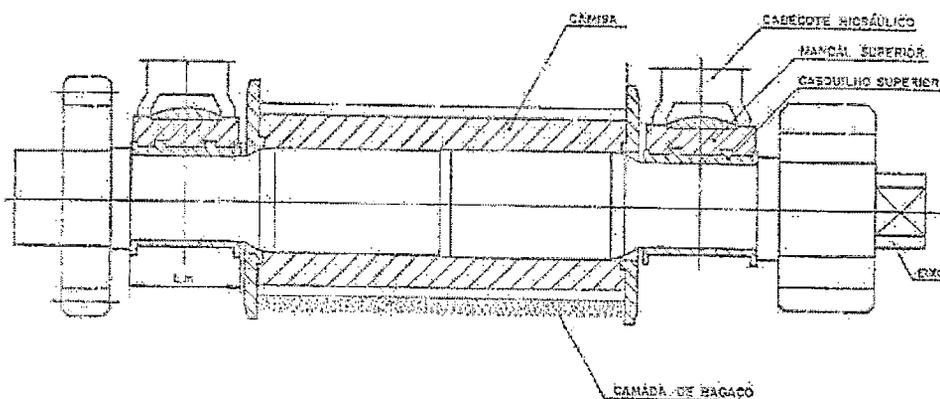


FIGURA 23 - Rolo de moenda com camisa frisada (Sato)

- Cabeçote hidráulico, situado acima do mancal do rolo superior, compõe o sistema hidráulico responsável pela absorção de oscilações do rolo superior.
- Bagaceira, estrutura instalada abaixo do rolo superior, é responsável pela continuidade do fluxo de bagaço da entrada para a saída do terno, sem a intenção de extrair caldo.
- Pente, estrutura encaixada nos rolos superior e de saída que tem como função retirar o bagaço aderido aos frisos destes rolos em consequência do processo de esmagamento. Com isso, os frisos drenam mais facilmente o caldo e o bagaço é quase que completamente enviado ao próximo terno.

Para o bom funcionamento dos ternos de uma moenda alguns fatores são fundamentais (Nunes):

- Sistema de preparo de cana: a eficiência da moagem aumenta à medida que se aumenta a densidade da cana na entrada do 1º. terno, o que é obtido através do rompimento das células da cana pelo sistema de preparo. Quanto maior o índice de rompimento obtido, maior a facilidade na extração do caldo.
- Alimentação de cana no 1º. terno: a eficiência na alimentação de cana no 1º. terno depende de condições anteriores ao processo de moagem, como o carregamento uniforme de cana nos caminhões e o descarregamento adequado da cana nas mesas alimentadoras, entre outros. Logo, qualquer controle no setor de moagem deve ser precedido de uma alimentação extremamente regular no 1º. terno, procurando-se minimizar as falhas de alimentação de cana ou os picos de carga.
- Carga hidráulica: o sistema hidráulico de pressão no cabeçote do rolo superior tem a função de manter uma pressão constante sobre a camada de bagaço, independentemente da ocorrência de oscilações. Isso é feito através da atuação de um acumulador (figura 24), que consiste de um recipiente metálico que apresenta em seu interior uma bexiga de borracha cheia com nitrogênio, que se comprime ou se dilata, conforme o volume de fluido é deslocado devido à oscilação do rolo superior.

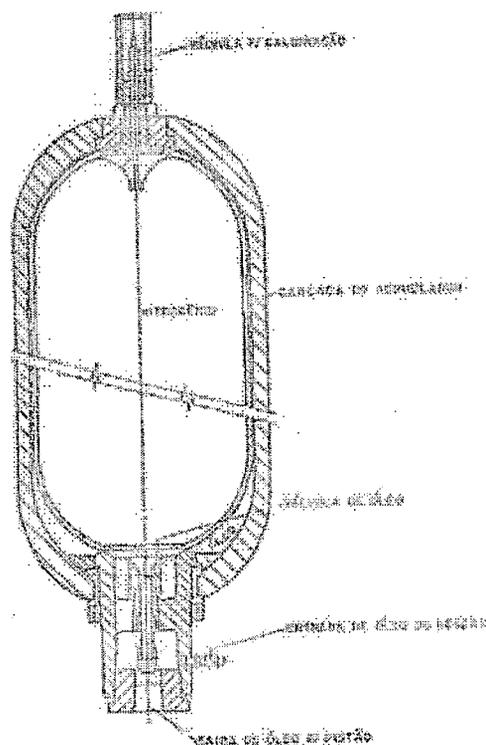


FIGURA 24 - Acumulador para o sistema hidráulico de pressão do rolo superior de moenda (Nunes)

- Oscilação: a passagem do bagaço pelas aberturas da moenda a uma determinada velocidade provoca, no rolo superior, um movimento de oscilação limitado pela pressão hidráulica aplicada sobre o mesmo. Variações excessivas da oscilação ou oscilações desiguais nos dois lados da moenda podem significar problemas na alimentação das moendas, na embebição, na carga hidráulica, no balão de nitrogênio do acumulador hidráulico ou na guia dos mancais.
- Rotação: a extração aumenta com a diminuição da rotação da moenda. Porém, como a rotação é diretamente proporcional à moagem, deve-se buscar uma mínima rotação que possibilite alcançar a moagem desejada, além de estar dentro da faixa de rotação das turbinas de acionamento.
- Controle das aberturas: após os ajustes iniciais no começo da safra, deve-se proceder à 1ª. medição de aberturas, que deve ser considerado

como parâmetro ideal de comparação para futuras medições e correções, que possivelmente ocorrerão devido às condições de trabalho e desgaste da moenda.

- Ajuste de bagaceiras e pentes: no decorrer da safra, as bagaceiras e pentes devem ser periodicamente examinados a fim de ajustá-los novamente aos rolos de entrada, no caso da bagaceira, e superior e de saída, no caso dos pentes.
- Alimentação dos ternos intermediários: a utilização de esteiras intermediárias de arraste com calha Donnelly fornece uma alimentação mais uniforme nos ternos intermediários, além de propiciar a absorção de altas taxas de embebição, tornando esta operação mais eficiente.

Um parâmetro importante para a moagem é o trabalho de extração realizado pelo 1º. terno. O objetivo é obter uma extração máxima de sacarose no 1º. terno, conjuntamente com uma elevada capacidade de moagem. Por outro lado, deve-se manter uma uniformidade e constância da alimentação deste terno para que os demais trabalhem no mesmo ritmo.

O modo mais eficiente de se alimentar o 1º. terno da moenda é através da alimentação com rolo de pressão em conjunto com a calha Donnelly, que consiste numa calha fechada totalmente em formato retangular e com abertura divergente no sentido da queda da cana (figura 25). Quando esta se enche, o peso próprio formado pela coluna de cana preparada aumenta a densidade no fundo da calha, tornando a alimentação eficiente e possibilitando elevada moagem e extração. Além de regularizar e uniformizar a moagem, a calha torna a pressão dos rolos sobre o colchão de cana mais constante durante todo o processo de moagem, desde que seja mantida cheia.

No processo de moagem da cana, o simples esmagamento da cana não é suficiente para se obter bons níveis de extração. A cana que vai ser moída no 1º. terno apresenta uma relação em torno de 7 partes de caldo para cada parte de fibra, e terá essa relação diminuída para valores em torno de 2 a 2,5 após a 1ª. unidade de moagem, o que aumenta gradativamente, a cada terno, a dificuldade da extração do caldo remanescente. Para se obter um aumento na extração do caldo nos ternos seguintes é necessário a utilização do processo de embebição, que consiste na adição de água ou caldo ao bagaço a partir do 2º. terno, visando aumentar a diluição do açúcar existente no bagaço e a pressão de moagem. A

eficiência da embebição depende do volume de água aplicado e da baixa concentração do caldo de embebição. Existem vários tipos de embebição (Nunes):

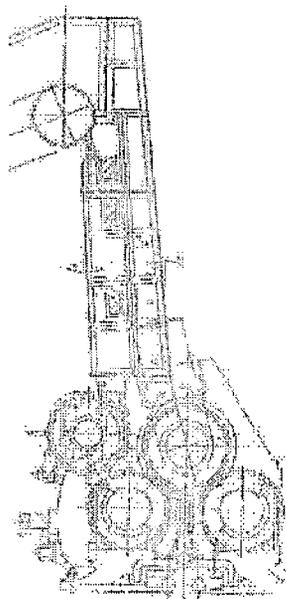


FIGURA 25 - Calha Donnelly (Sato)

- simples: consiste na simples aplicação de água no bagaço de cada terno, a partir do 2º. A eficiência desse sistema é baixa, pois o volume de água aplicado é pequeno. Por outro lado, o aumento da quantidade de água para valores muito elevados torna o sistema antieconômico, pois exige um superdimensionamento dos demais setores da usina para a eliminação deste excesso de água.
- composta convencional: método mais empregado, consiste na aplicação de toda a água de embebição no último terno da moenda; o caldo deste é então enviado ao terno anterior para efetuar a embebição deste. Este procedimento é repetido sucessivamente até o caldo atingir o 2º. terno. Este sistema é mais eficiente que a embebição simples, uma vez que, para uma mesma quantidade de água aplicada, obtém-se um volume de caldo maior aplicado ao bagaço em cada terno. A concentração do caldo de embebição mantém-se sempre menor que a do caldo contido no bagaço a ser embebido, garantindo-se a diluição deste.
- 1ª. variação da composta: alternativa à embebição composta convencional, com adição de água no penúltimo e no último ternos, em

quantidades aproximadamente iguais. Em seguida, o caldo do último terno recircula para o 2º. terno anterior a ele, e assim sucessivamente. Desse modo, tem-se dois fluxos paralelos de embebição, com cerca de metade do volume de caldo em cada terno, porém com as respectivas concentrações mais baixas. Assim, elimina-se uma recirculação e o caldo misto é formado pelo caldo dos três primeiros ternos.

- 2ª. variação da composta: alternativa à 1ª. variação da composta, com divisão da água de embebição em quantidades iguais no penúltimo e último ternos recirculando o caldo desses dois ternos para o anterior; a partir deste, recircula-se o caldo terno a terno, até o segundo, como no sistema convencional. Desta maneira, o volume normal de embebição fica reduzido à metade, apenas nos dois últimos ternos.
- com recirculação do caldo: partindo-se da embebição composta convencional acrescenta-se ao caldo de embebição de cada terno parte do caldo do próprio terno, com o objetivo de aumentar o volume de caldo de embebição no terno considerado para se aproximar mais do ponto de saturação do bagaço. Ao atingir-se esse ponto, ter-se-ia a embebição integral, que representaria a elevação da relação caldo/fibra para valores bem próximos de 7.

O caldo extraído no 1º terno, que está isento da água de embebição, é chamado de caldo primário. A maior parte da sacarose da cana está nesse caldo. O caldo do 2º terno, resultado da moagem nos ternos seguintes, é chamado de caldo misto e contém a água de embebição. Geralmente, o caldo primário é enviado para o setor de fabricação de açúcar e o caldo misto para o setor de fabricação de álcool.

Para complementar o conjunto de procedimentos para se obter as melhores condições de alimentação e extração, efetua-se a regulagem da moenda, que consiste em descrever os posicionamentos geométricos dos componentes dos ternos para uma determinada condição de trabalho desejada. Ela leva em consideração, entre outros fatores, a moagem horária, a fibra da cana, o comprimento dos rolos da moenda, a velocidade de rotação dos rolos, a fibra do bagaço na saída dos ternos, o tipo de frisos, o diâmetro das camisas, o número de ternos da moenda, a forma de alimentação do 1º terno, a qualidade do preparo de cana e a utilização de rolo de pressão.

Os principais cálculos efetuados são:

- aberturas, que definem o espaço que o bagaço tem para passar entre os rolos. São calculadas as aberturas de entrada, de saída e do rolo de pressão. Através delas, chega-se ao diagrama chamado de triangulação, que define as posições relativas entre os centros dos 4 rolos.
- traçado da bagaceira: seu correto posicionamento propicia um funcionamento uniforme e contínuo da moenda e também um bom desempenho da extração. Uma bagaceira numa posição muito elevada aumenta excessivamente a carga no rolo superior, gerando desgaste acentuado da bagaceira, aumentando a potência absorvida e sufocando a passagem de bagaço, o que resulta em alimentação deficiente do terno. Por outro lado, um posicionamento muito baixo não fornece condições para uma compressão suficiente do bagaço a fim de impedir que o rolo superior deslize sobre a camada, propiciando o acúmulo de bagaço sobre a bagaceira, que pode resultar no travamento do fluxo de bagaço no terno.

3.2.4.2. DIFUSÃO

A difusão é uma técnica mais recente de extração que utiliza o processo físico-químico de lixiviação e percolação. A extração do caldo efetua-se em função da ruptura das células e da lavagem destas com a água ou com o caldo em que ficam mergulhadas. O equipamento utilizado é o difusor, uma caixa retangular para onde a cana é enviada após seu preparo e onde fica circulando, mergulhada em água, com tempo de permanência alto, em torno de 1 h, dependendo da concepção do difusor.

Dentro dessa caixa existem mexedores que misturam a água com a cana. Após o processo de difusão o bagaço passa por 1 ou 2 ternos de moenda para a complementação da extração, já que o bagaço sai do difusor com uma umidade em torno de 85%. Esse sistema necessita de um alto índice de preparo, em torno de 90%, porém atinge índices de extração em torno de 98%.

3.2.5. CONCENTRAÇÃO

Após a extração, o caldo primário e o caldo misto resultantes devem passar por um processo de concentração, que compreende as seguintes etapas: clarificação, evaporação, cozimento, cristalização e centrifugação, para a obtenção do açúcar. Um dos principais índices para medição da eficiência da concentração é dada pela recuperação, que é a relação entre a sacarose obtida no açúcar fabricado e a sacarose contida no caldo misto.

As perdas consideradas na concentração são:

- perdas de açúcar na torta
- perdas de açúcar no melaço
- perdas indeterminadas (vazamentos, arrastes, inversões, etc.)

A etapa de clarificação do caldo tem por finalidade limpar e preparar quimicamente o caldo para que este tenha condições adequadas para as etapas seguintes.

Dentro do tratamento, o caldo misto pode seguir dois processos diferentes: um para a fabricação de açúcar e outro para a fabricação de álcool.

3.2.5.1. CLARIFICAÇÃO DO CALDO PARA FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Para a fabricação de açúcar, o caldo passa primeiramente por um processo de sulfitação, que é a adição de vapor de enxofre proveniente da combustão do enxofre. A sulfitação tem como efeito eliminar matérias corantes e transformar em compostos ferrosos incolores os sais férricos que o contato com as moendas, tubulações e outros componentes metálicos possa ter formado.

O sistema é composto por uma enxofreira, forno rotativo onde ocorre a combustão do enxofre, originando o ácido sulfuroso. A mistura do vapor de enxofre com o caldo ocorre dentro da coluna de sulfitação (figura 26), estrutura cilíndrica composta por diversas bandejas com passagens alternadas de uma para outra, fazendo com que o caldo, que é introduzido na parte superior, percorra um caminho maior dentro da coluna, absorvendo melhor o vapor de enxofre, que é introduzido próximo à base da coluna.

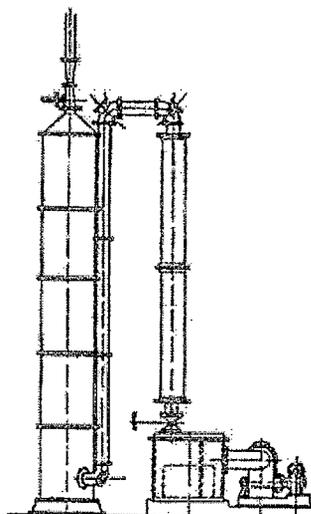


FIGURA 26 - Coluna de sulfitação (Hugot, 1977)

A sulfitação pode ser:

- fria: partindo-se do caldo bruto sem aquecimento, faz-se a sulfitação até um pH próximo de 3,8.
- quente: partindo-se do caldo bruto, faz-se um aquecimento até uma temperatura próxima de 70°C para, em seguida, efetuar-se a sulfitação até um pH próximo de 3,8. Este tipo de sulfitação reduz significativamente as quantidades necessárias de cal, sendo a mais utilizada.

Em termos gerais, segundo Hugot (1977), a sulfitação proporciona uma maior velocidade de decantação, além de propiciar massas cozidas menos viscosas e que se concentram mais rapidamente, melhorando o processo de cristalização. Há um melhoramento nítido na cor do açúcar e uma melhor eliminação dos fosfatos e ceras, permitindo uma filtração melhor e uma qualidade superior do açúcar produzido. Em contrapartida, ocorrem depósitos maiores nos aquecedores, que podem ser eliminados pela sulfitação quente, sendo necessário o aumento da superfície de aquecimento.

A adição de enxofre provoca a diminuição do pH. O caldo resultante é chamado de caldo sulfitado, e deve ser neutralizado antes do processo de decantação. Esta é a função do processo de calagem, que consiste na adição de cal ao caldo sulfitado. A cal forma um precipitado com matérias coaguladas, que

será separado no decantador. É adicionada ao caldo em forma de leite de cal, resultante da mistura preliminar de cal e caldo.

Existem várias formas de calagem, sendo as mais comuns:

- fria: consiste na adição de cal ao caldo logo após este sair da moenda ou da coluna de sulfitação, modificando seu pH de aproximadamente 5,5 para 7,0 a 8,0.
- quente: consiste no mesmo procedimento que na calagem fria, porém aquece-se o caldo a cerca de 70°C antes da adição de cal. Economiza-se de 15 a 20% na quantidade de cal necessária, em relação à calagem fria.

Após a calagem, adiciona-se ácido fosfórico, que auxilia no processo de formação de precipitado iniciado na calagem, precipitando uma parte dos colóides e de matérias corantes do caldo.

Em seguida, o caldo é enviado aos aquecedores para elevar sua temperatura a um valor entre 103 e 105°C. Os aquecedores são trocadores de calor verticais tubulares, onde o caldo circula dentro dos tubos e o vapor de aquecimento em volta (figura 27). São divididos em compartimentos, o que obriga o caldo a subir e descer diversas vezes pelos tubos, aumentando a eficiência da troca de calor. O caldo deve ser aquecido para melhorar o rendimento da decantação.

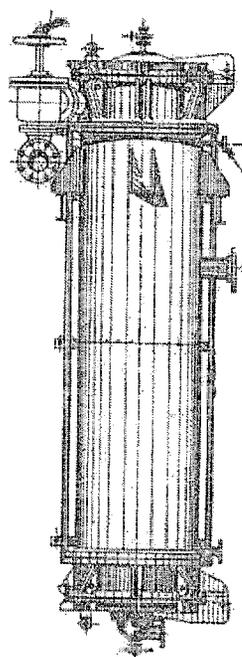


FIGURA 27 - Aquecedor de caldo (Hugot, 1977)

Normalmente, utiliza-se um conjunto de aquecedores em série, para dividir o aquecimento em estágios e possibilitar a utilização de aquecedores de dimensões razoáveis. A temperatura final do caldo após o aquecimento não ultrapassa os 105°C, pois acima desta aumenta-se a possibilidade que as ceras fundidas a estas temperaturas se emulsionem com a ebulição produzida no balão de flash, tornando sua eliminação mais difícil no decantador (Hugot, 1977).

Os decantadores são normalmente precedidos por um balão de flash. É um simples recipiente cilíndrico, colocado imediatamente antes e acima do decantador, com uma chaminé aberta para a atmosfera. O caldo vindo dos aquecedores chega tangencialmente a uma temperatura entre 102 e 105°C, ocorrendo uma evaporação espontânea assim que chega a este recipiente, à pressão atmosférica. Esse fenômeno libera todas as partículas em suspensão das bolhas de ar que ali estão agregadas e que impediriam a deposição das partículas de bagaço durante a decantação, caso não fossem retiradas.

Junto à entrada do caldo no decantador é adicionado um polímero para facilitar a aglutinação das partículas sólidas e a formação dos flocos a serem decantados. Tem efeito clarificante também.

A seguir, dentro dos decantadores ocorre o processo de separação do caldo clarificado do precipitado formado em sua massa pelos processos anteriores. O tempo necessário para a decantação depende do fator de decantação, que é a diferença de densidade entre a matéria a ser decantada e o líquido no qual está contido. Além disso, a superfície e a forma das partículas, bem como a viscosidade do líquido, também exercem sua influência.

O decantador é constituído por um tanque cilíndrico ao qual se introduz, de modo regular e contínuo, o caldo a ser decantado (figura 28).

Deve ter dimensões suficientes para que a velocidade de escoamento e de circulação do caldo seja lenta o suficiente para permitir a decantação. Geralmente, é dividido em vários compartimentos, com a finalidade de aumentar-se a superfície de decantação. Os compartimentos são constituídos por bandejas inclinadas e vazadas no centro. Apresenta um eixo central que gira lentamente, sustentando vários raspadores que varrem vagarosamente o fundo dos compartimentos, enviando o lodo, material rico em precipitado, para o fundo do decantador.

O caldo clarificado decantado é retirado do decantador pela parte superior de cada compartimento, por um tubo que sai pelo canto superior e leva o caldo a um tanque de caldo externo. Canecas móveis que prolongam a extremidade vertical

dos tubos permitem regular a vazão relativa de cada compartimento. O nível de transbordamento é o nível de caldo no tanque.

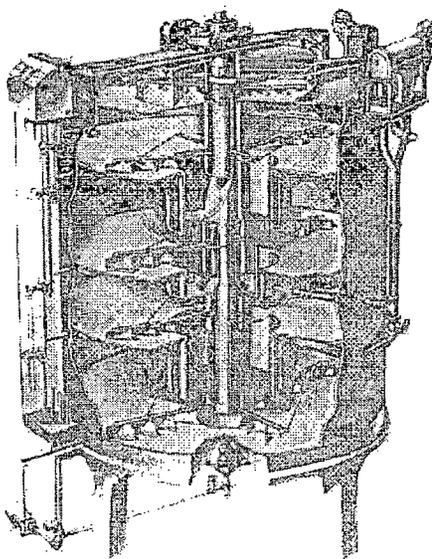


FIGURA 28 - Decantador de caldo em corte (Hugot, 1977)

O lodo pode ser retirado pelo mesmo princípio descrito. Porém, é preferível a utilização de uma bomba de ação positiva para esta operação, pois o lodo torna-se muito espesso.

O decantador é fechado e isolado, para minimizar a perda de temperatura durante a decantação. Após a decantação, o caldo está pronto para iniciar o processo de evaporação.

A filtração é uma operação que visa separar o caldo do precipitado contido no lodo, juntamente com os sais insolúveis formados e o bagacilho arrastado. Para uma boa filtração deve ser observada uma temperatura alta para o caldo, pois sua viscosidade diminui com o aumento da temperatura, facilitando a retenção do caldo na superfície filtrante.

O equipamento utilizado é o filtro rotativo a vácuo, que compõe-se de um tambor rotativo girando em torno de um eixo horizontal, mergulhado parcialmente no líquido a ser filtrado.

A periferia forma a superfície filtrante, que é dividida em seções independentes, ligadas individualmente a uma tubulação de vácuo. A parede externa do tambor é formada por chapas com perfurações muito finas. Quando o

filtro gira, a parte mergulhada no líquido aspira-o, obstruindo imediatamente as pequenas perfurações com pedaços de bagaço e matérias em suspensão (figura 29). Esse material recebe o nome de torta. Assim, o caldo é filtrado por meio de suas próprias impurezas e o bagaço que contém. A seção passa, então, por pulverizadores de água aquecida que lavam a torta, facilitando a extração do açúcar existente nela. Pouco antes de mergulhar novamente no líquido, a seção chega a um raspador, que separa a torta do superfície filtrante.

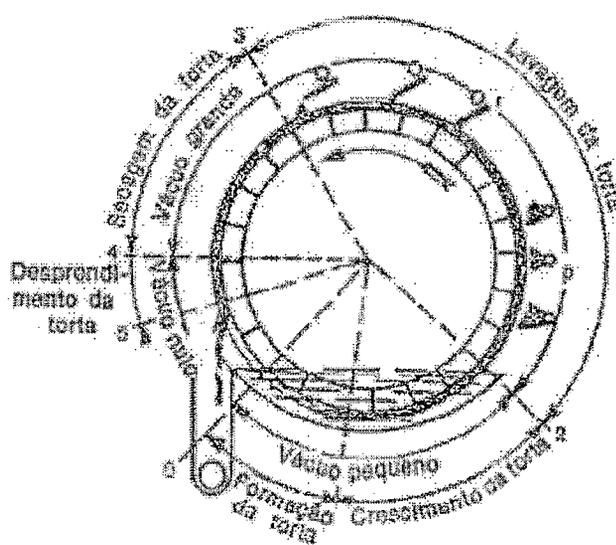


FIGURA 29 - Esquema de funcionamento do filtro rotativo a vácuo para lodo
(Hugot, 1977)

O caldo resultante é chamado caldo filtrado e retorna para o tanque de caldo misto. A torta é carregada em caminhões que distribuem-na na lavoura, visto que contém uma boa quantidade de material fertilizante, especialmente fibra.

3.2.5.2. CLARIFICAÇÃO DO CALDO PARA FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL

O tratamento de caldo para a fabricação de álcool é semelhante ao da fabricação de açúcar, porém o caldo não sofre sulfitação, nem a calagem, processos desnecessários para a obtenção do álcool.

3.2.5.3. EVAPORAÇÃO

Para a obtenção do açúcar, o caldo clarificado deve passar pelos processos de evaporação, cozimento, cristalização e centrifugação.

O objetivo da evaporação é evaporar a maior parte de água contida no caldo clarificado. Com isso, o açúcar fica concentrado, aproximando-se do seu ponto de saturação, no qual os cristais começam a aparecer na massa. Usualmente, procura-se atingir, na evaporação, um brix (porcentagem em massa de sólidos solúveis aparentes contidos no caldo de cana) de cerca de 65%. Além desse valor, torna-se mais difícil a obtenção de um cristal uniforme no cozimento. O caldo, após a evaporação, passa a ser denominado xarope.

O evaporador é constituído por um cilindro vertical conectado a um conjunto de tubos, que servem de aparelho de troca de calor (figura 30): o vapor de aquecimento envolve os tubos externamente e o caldo a ser evaporado passa pelo interior dos tubos. Na parte superior do cilindro existe um separador de arraste cuja finalidade é separar gotas de líquido que poderiam ser arrastadas com o vapor vegetal, originado da evaporação da água contida no caldo.

O esquema de evaporação mais utilizado é o de múltiplo efeito (figura 31). Vários evaporadores são alinhados em série. Cada evaporador corresponde a um efeito.

Para o 1º. efeito, utiliza-se o vapor de escape. Nesse efeito o vapor está geralmente a pouco mais de 100°C, aquecendo e evaporando o caldo à pressão atmosférica. O vapor resultante dessa evaporação, chamado vapor vegetal, é utilizado para a evaporação no 2º. efeito. Como ele se encontra a 100°C aproximadamente e o caldo atinge a ebulição nessa mesma temperatura à pressão atmosférica, não existe a possibilidade de troca de calor entre o vapor vegetal e o caldo. Faz-se necessária, então, a diminuição do ponto de ebulição do caldo através da introdução de vácuo no 2º. efeito, para que seja possível a evaporação da água nesse efeito. Assim, a cada efeito aumenta-se gradativamente o vácuo para que a água contida no caldo possa evaporar em temperaturas cada vez menores. O vácuo é originado no último efeito, diminuindo à medida que se passa dele para os anteriores.

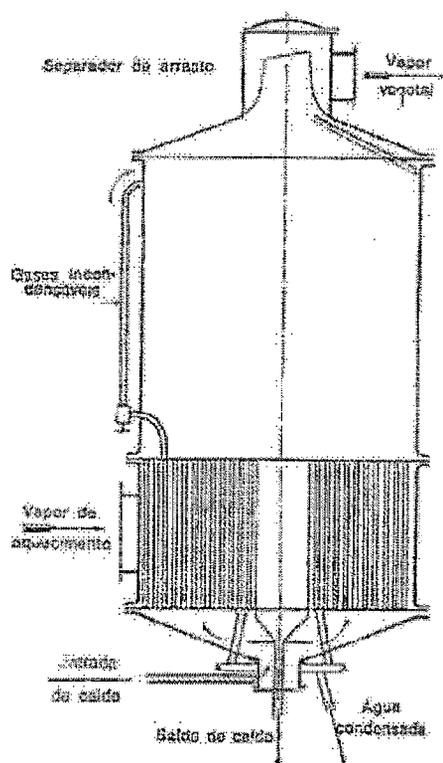


FIGURA 30 - Evaporador de caldo em corte (Hugot, 1977)

Este esquema aumenta a diferença total de temperaturas entre vapor e caldo, numa medida igual à queda do ponto de ebulição do caldo entre a pressão do 1º. e do último efeito. Além disso, permite continuar a evaporação com temperaturas menos prejudiciais sob o ponto de vista da inversão e da coloração do caldo, à medida que o caldo se torna mais concentrado e mais viscoso. A temperaturas muito altas, o açúcar do caldo pode caramelizar, provocando perda de sacarose e coloração indesejada nos cristais de açúcar.

3.2.5.4. FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Quando os xaropes são concentrados, sua viscosidade aumenta rapidamente com o brix e, quando este alcança de 78 a 80%, os cristais começam a aparecer no xarope, passando-o progressivamente do estado líquido para um

estado parcialmente líquido e sólido, perdendo sua fluidez. Nesse ponto, passa-se a utilizar o cozimento para atingir-se a concentração máxima.

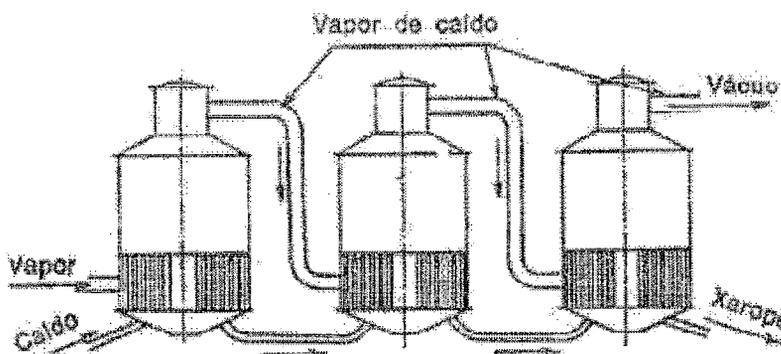


FIGURA 31 - Esquema de múltiplo efeito da evaporação (Hugot, 1977)

O cozimento ocorre no cozedor a vácuo, que é basicamente um evaporador de simples efeito, com tubos de maior diâmetro, melhor adaptados ao produto viscoso que deve ser concentrado (figura 32).

A substância obtida no cozimento é uma mistura sólido-líquida denominada massa cozida, que contém cristais de açúcar e o licor-mãe (que é a fase líquida da mistura), que são separados através de centrifugação. O licor-mãe separado recebe o nome de mel. A 1ª. massa cozida obtida com o xarope puro é chamada massa cozida A, e o licor-mãe separado na centrifugação, de mel A.

O mel A contém ainda uma grande proporção de sacarose cristalizável e serve, em geral, para aumentar cozimentos com um pé de cozimento. O pé de cozimento é o volume do cozedor que já contém núcleos de cristais de sacarose, ou no qual são injetados pequenos cristais para a formação dos núcleos de cristais de sacarose em número e tamanho ideais, e sobre os quais a sacarose deverá depositar-se em fases posteriores do cozimento (Camargo, 1990). É produzido nos cozedores de pé, de menor dimensão e próprios para sua fabricação.

A semente é um componente desenvolvido em laboratório, a partir da mistura de álcool e açúcar diluído de boa qualidade, constituído por núcleos de cristais de sacarose, a partir dos quais se formarão os cristais de açúcar final pelo seu crescimento através de deposição em torno desses núcleos.

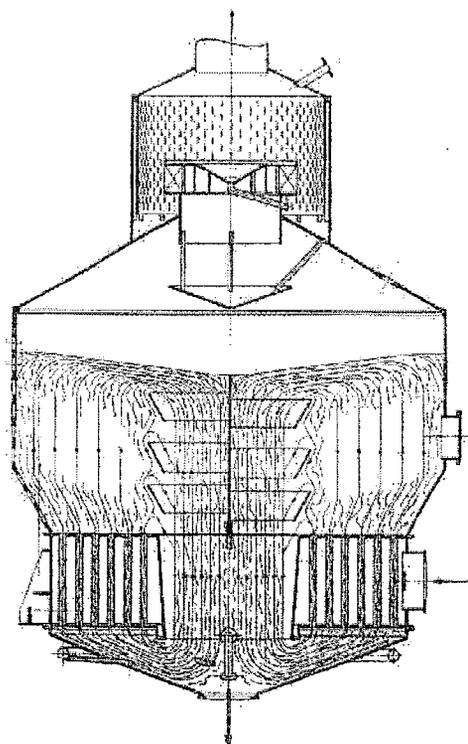


FIGURA 32 - Cozedor a vácuo em corte (Hugot, 1977)

A segunda massa cozida, então, é chamada massa cozida B e o licor-mãe separado na centrifugação, de mel B. Esta operação pode ser repetida mais vezes, porém o número de massas cozidas é rapidamente limitado porque (Hugot, 1977):

- o mel fica cada vez mais pobre em açúcar;
- nem todo o açúcar contido é cristalizável, pois os não-açúcares imobilizam uma certa proporção de açúcar;
- os cozimentos, as cristalizações e as centrifugações sucessivos, assim como a conseqüente diminuição de pureza, esgotam o açúcar e aumentam a viscosidade dos méis sucessivamente obtidos, tornando o tratamento e a circulação das últimas massas cozidas muito difíceis nos cozedores.

O último mel obtido é chamado melaço e é enviado para a destilaria para a produção de álcool.

A centrifugação pode ser realizada basicamente por dois tipos de turbinas:

- contínua, onde a turbina gira a uma mesma velocidade sem parar, alimentada por um fio contínuo de massa, fornecendo uma vazão constante de açúcar (figura 33). Normalmente é utilizada quando o licor-mãe não está próximo do esgotamento, ou seja, da centrifugação resultam massa e mel.

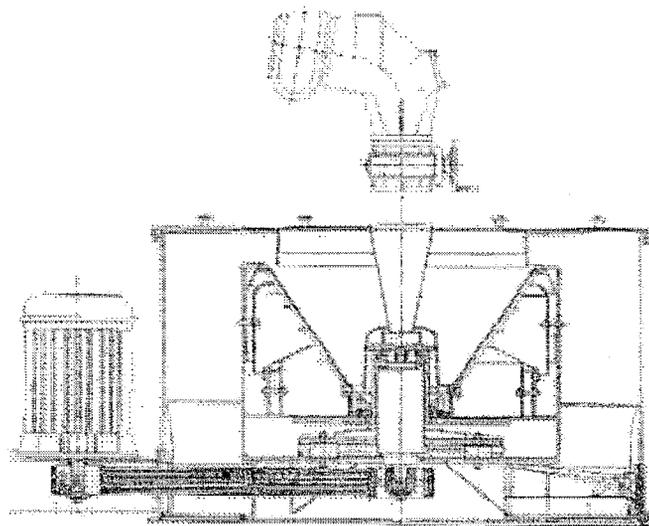


FIGURA 33 - Turbina contínua para massa cozida em corte (Hugot, 1977)

- descontínua, que funciona em ciclos, onde uma carga de massa é introduzida e inicia-se um processo de aceleração, constância e desaceleração da velocidade de rotação da turbina (figura 34). Esse tipo de centrifugação é utilizado normalmente quando o licor-mãe está praticamente esgotado, necessitando ser separado dos cristais para a obtenção do açúcar comercial.

Entre as sucessivas turbinagens, o licor-mãe resultante é armazenado em estruturas chamadas cristalizadores, que têm a função de agitá-lo a fim de modificar constantemente as posições relativas das moléculas de açúcar, a fim de completar a formação dos cristais e aumentar o esgotamento do licor-mãe (figura 35).

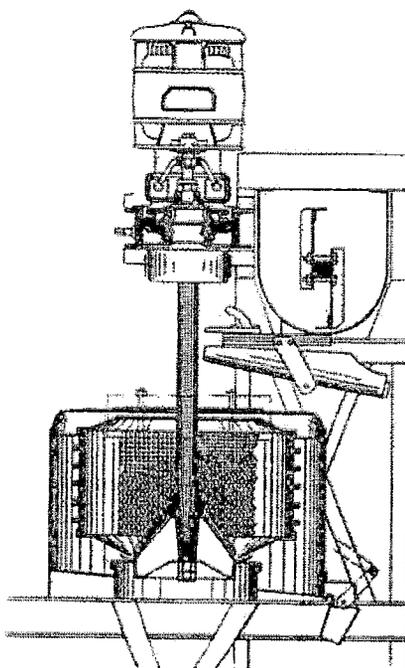


FIGURA 34 - Turbina descontínua para produção de açúcar em corte (Hugot, 1977)

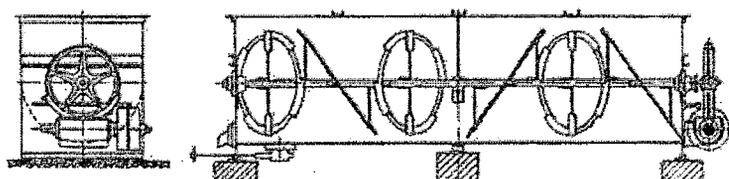


FIGURA 35 – Cristalizador em corte (Hugot, 1977)

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

Os métodos de esgotamento do açúcar mais utilizados, segundo Hugot (1977) são:

- processo com 2 massas cozidas: este processo é também chamado trabalho com duas massas. É pouco empregado, normalmente quando a

pureza do xarope é muito baixa. Consiste em formar dois tipos de massa cozida A e B (figura 36).

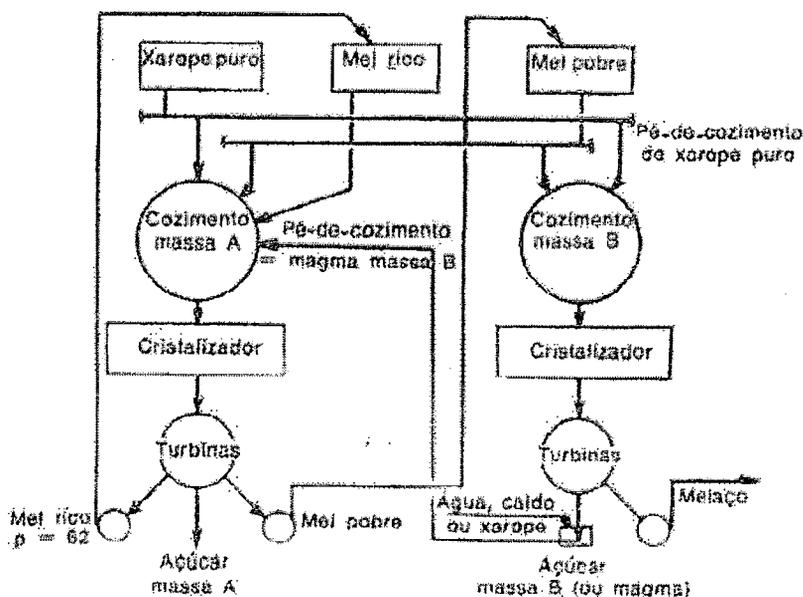


FIGURA 36 - Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 2 massas (Hugot, 1977)

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

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

- processo de 3 massas cozidas: é o processo empregado com mais freqüência. Formam-se 3 tipos de massa cozida, A, B e C (figura 37). Separam-se os açúcares A e B, cuja centrifugação é, geralmente, efetuada com uma pequena lavagem com água. Neste caso, obtém-se um açúcar claro. A lavagem pode ser modificada de acordo com a

qualidade de açúcar desejada. É mais freqüente efetuar uma lavagem bastante intensa com vapor. Geralmente, não se separam os méis rico e pobre, para não complicar a operação, porque estes 2 méis diferem pouco um do outro, com os tempos indicados de lavagem com água.

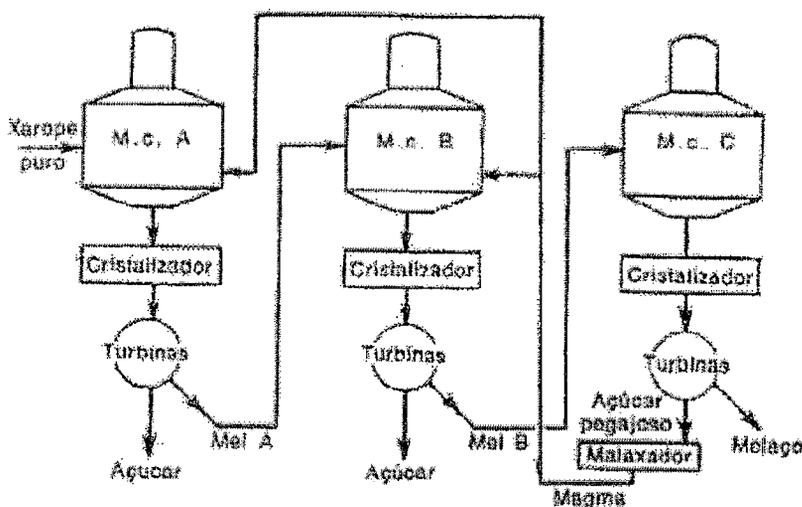


FIGURA 37 - Diagrama do sistema de fabricação de açúcar com 3 massas (Hugot, 1977)

Este sistema apresenta a vantagem do açúcar comercial não conter mais de cerca de 13% de açúcar B. Permite uma centrifugação mais rápida da metade do açúcar B, com um esgotamento melhor, porque não há lavagem. E, ao contrário do que possa parecer, praticamente não exige uma capacidade maior dos cozedores ou das turbinas A do que a exigida para o processo com magma simples.

- processo com 4 massas cozidas: formam-se 4 tipos de massa cozida, A, AB, B e C.

As 3 primeiras massas cozidas são centrifugadas e fornecem açúcar comercial, com pureza em torno de 99,5, 99 e 98% respectivamente.

O processo utiliza-se de magma e pés de cozimento, como para o precedente. Em geral, leva a um aumento dos retornos de méis e,

consequentemente, de sua viscosidade, numa proporção que pode comprometer o benefício obtido com o trabalho suplementar.

3.2.6. FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL

A produção de álcool é um processo bioquímico que compreende as etapas de fermentação e destilação, além do processo paralelo de tratamento da levedura. A matéria-prima utilizada é o caldo clarificado obtido na fase de clarificação do caldo, além do mel final da fabricação de açúcar, genericamente chamado de melaço. Essa mistura é denominada mosto.

3.2.6.1. FERMENTAÇÃO

O mosto inicia sua fermentação através da adição de levedura. A fermentação permite a produção de etanol a partir da inversão, através da atuação da levedura, da sacarose em frutose e glicose, matérias que podem ser diretamente transformadas em álcool.

Os principais fatores que influenciam o processo de fermentação são:

- pH: sendo um processo bioquímico, a fermentação tem um ponto ótimo para o funcionamento das enzimas envolvidas. Para um pH baixo, tem-se um melhor controle de infecção por parte de microorganismos contaminantes, mas o meio pode se tornar extremamente ácido, o que é impróprio para a levedura.
- temperatura: o processo fermentativo é exotérmico, portanto, ocorre uma elevação da temperatura do mosto, podendo atingir valores elevados que desfavorecem a atividade das leveduras e favorecem o desenvolvimento de infecções, além da perda de álcool por evaporação.
- teor de sacarose do mosto: o mosto deve apresentar uma concentração de açúcares que seja compatível com a natureza e composição da matéria-prima, com o tipo de levedura utilizado e com o processo de condução da fermentação. Em geral, o mosto apresenta um brix entre 14 e 28°. O nível elevado de sacarose no mosto faz com que a levedura produza mais álcool, o que pode tornar o meio impróprio para sua

sobrevivência. A utilização de mosto muito diluído, por sua vez, provoca, entre outros efeitos, um volume maior nas dornas e depósitos, o favorecimento de infecções, um maior consumo de água e de vapor e um menor rendimento dos aparelhos de destilação. Dessa forma, o melão deve ser preparado, pois apresenta um brix médio de 88°, devendo ser diluído para um brix em torno de 22°, através de diluição intermitente ou contínua.

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

Um resultado satisfatório da fermentação é a obtenção de um vinho com teor alcoólico entre 7 e 8° de brix.

A fermentação acontece em recipientes cilíndricos, chamados de dornas de fermentação, onde adiciona-se o leite de levedura ao mosto.

Após a fermentação completa do mosto, este passa a se chamar vinho.

Existem basicamente dois tipos de fermentação:

- por batelada: as dornas são individuais, sem ligação entre elas, sendo que todo o processo de fermentação ocorre dentro de cada uma delas, com tempo de residência em torno de 6 h. Após a fermentação total a dorna é esvaziada, sendo o vinho encaminhado para uma dorna volante, que serve de reservatório para as turbinas de separação de levedura.
- contínua: várias dornas são ligadas fisicamente em série, através de uma tubulação, sendo que a fermentação ocorre parcialmente em cada uma (figura 38). Nesse caso, o processo não sofre interrupção. À medida que a fermentação vai se completando, o vinho é enviado à dorna volante, enquanto novos volumes de mosto são introduzidos na 1ª. dorna. Portanto, a produção de vinho é constante.

O processo de fermentação deve ter temperatura controlada, como já discutido anteriormente, em torno de 30 a 35°C. Para isso, utilizam-se resfriadores

nas domas. Normalmente são trocadores de calor a placas, nos quais trocam calor o mosto e água resfriada em torres de resfriamento.

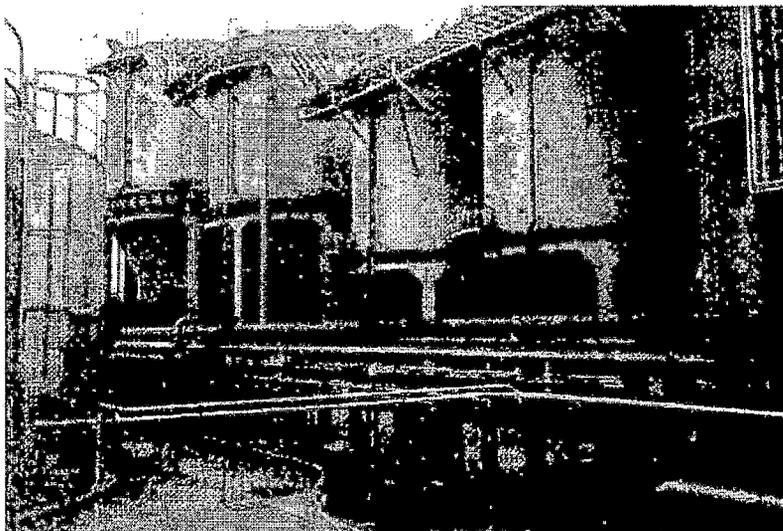


FIGURA 38 - Sistema de fermentação contínua

O índice que traduz a eficiência do processo de fermentação é o rendimento da fermentação alcoólica, representado pela relação entre a quantidade de álcool produzido e a quantidade de álcool que deveria ser produzido em função do teor de açúcares existentes no mosto.

3.2.6.2. TRATAMENTO DE LEVEDURA

No final do processo de fermentação tem-se o vinho misturado com levedura. A levedura deve ser separada antes do início do processo de destilação. Para isso, o vinho passa por uma operação de centrifugação. Após essa operação, o vinho está pronto para iniciar a destilação.

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

- velocidade de fermentação: é traduzida na quantidade de açúcar fermentado, numa unidade de tempo. Uma alta velocidade de

fermentação propicia fermentações rápidas, além de reduzir o risco de infecções.

- tolerância ao álcool: permite obter vinhos de grande riqueza alcoólica, gerando, conseqüentemente, um maior rendimento dos aparelhos e uma possibilidade menor da ocorrência de infecções, já que o álcool é um antisséptico natural.
- rendimento: é a relação entre açúcar consumido e álcool produzido.
- resistência à acidez: no controle de infecções adota-se a diminuição do pH quando as leveduras apresentam alta resistência à acidez do meio.
- estabilidade: representa a capacidade das leveduras de manterem suas propriedades estáveis face às variações do meio.

3.2.6.3. DESTILAÇÃO

O vinho resultante da fermentação do mosto tem uma composição complexa, que depende da matéria-prima empregada, do preparo do mosto e das condições em que se desenvolveu a fermentação alcoólica (Delgado et al., 1975).

Seus principais componentes são:

- líquidos: o álcool etílico é o principal componente (5 a 10%), aparecendo a água como elemento predominante (89 a 94%), além de outros elementos como a glicerina, furfural, álcoois homólogos superiores, aldeídos e ácidos.
- sólidos: encontram-se em suspensão, como as células de levedura ou de bactérias; e em solução, como os açúcares não fermentados, substâncias infermentescíveis e sais minerais.
- gasosos: o principal representante é o gás carbônico (CO₂), em pequena proporção.

Dessa forma, os componentes do vinho podem ser classificados em: voláteis, representados pelos líquidos e gases; ou fixos, representados pelos sólidos.

Como as substâncias voláteis têm diferentes graus de volatilidade, é possível a sua separação e identificação, através da diferença do ponto de ebulição, sendo o processo conhecido como destilação. É uma operação na qual os componentes de uma mistura de duas ou mais substâncias são separados,

mediante aquecimento e evaporação de uma parte da mistura e sucessiva condensação do vapor obtido, em duas ou mais frações diferentes, entre os intervalos de temperatura a que foram destilados (Carnevalli, 1981). Recebe denominações específicas, em função da natureza do produto a ser destilado.

De acordo com o tipo e a qualidade do álcool que se quer obter, o equipamento para destilação é composto por um número variado de colunas (figura 39). Cada coluna é constituída por um conjunto de câmaras superpostas, separadas por bandejas com calotas.

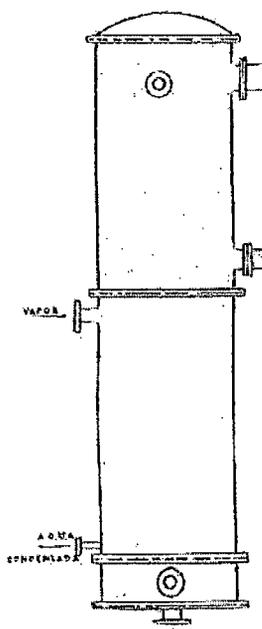


FIGURA 39 - Coluna de destilação (Carnevalli, 1981)

Cada conjunto de duas ou mais câmaras recebe o nome de gomo, sendo que a superposição destes recebe o nome de coluna. O número e espaçamento nos gomos, o número de gomos na coluna e o tipo de calota utilizada dependem da finalidade da coluna.

Desta forma, tem-se 2 fluxos na coluna:

- ascendente, constituído de vapores que vão se enriquecendo de álcool à medida que se vai distanciando da base da coluna, sendo retirados no topo.
- descendente: constituído pela parte líquida que desce, empobrecendo-se e aumentando o ponto de ebulição, sendo retirada na base da coluna,

praticamente isenta de álcool, porém carregando consigo as substâncias fixas contidas no vinho.

A exceção dos sentidos dos fluxos acima é o processo de desidratação, em função da formação da mistura azeotrópica, que será abordado posteriormente.

Os vapores de misturas ricas em álcool, gerados durante os diversos processos de destilação devem ser condensados para a recuperação do álcool. A condensação é realizada por condensadores, que são trocadores de calor utilizados para a separação dos componentes de uma mistura líquida.

3.2.6.3.1. EPURAÇÃO

Quando o vinho é submetido à epuração, são gerados dois produtos principais, o flegma e a vinhaça. O processo ocorre na coluna de destilação, que é constituída por:

- coluna de esgotamento de vinho A: tem por finalidade esgotar o vinho do álcool, saindo pela base como vinhaça, que é o resíduo da destilação do vinho, praticamente isento de álcool. O flegma, que é a fração principal da destilação, constituída por uma mistura hidroalcoólica impura (40 a 50°GL), livre de substâncias fixas e de uma parte das voláteis que acompanham o álcool no vinho, é retirado pelo topo. O aquecimento desta coluna é feito diretamente pelo vapor de escape.
- coluna de epuração de vinho A1: tem a finalidade de purificar o vinho das impurezas de cabeça e de outras impurezas que se comportam como tal, melhorando a qualidade do álcool. É chamada também de coluna de degasagem ou de retirada de CO₂. Normalmente é colocada sobre a coluna A, aproveitando os vapores desta coluna para o seu aquecimento.
- coluna de concentração de cabeça D: tem a finalidade de concentrar os produtos de cabeça, originados nas colunas A1 e A.

Os condensadores R e R1 são responsáveis pela condensação dos vapores da coluna D. A porção do condensado que sai do condensador R retorna à coluna D, enquanto que no R1, uma parte é retirada como álcool de segunda e o excesso é retornado para a coluna D. Podem ter auxiliar R2.

3.2.6.3.2. RETIFICAÇÃO

Para a obtenção do álcool praticamente livre das impurezas, é necessário submeter o flegma a um processo de purificação, ainda através de um processo de destilação especial, denominado de retificação, que é efetuado através da coluna de retificação, constituída por:

- coluna de esgotamento B1: tem a finalidade de esgotar o flegma do álcool, saindo na base isento de álcool, na forma de flegmaça. O álcool retificado é retirado pelo meio. É o produto principal da retificação, também chamado de álcool hidratado, com teor alcoólico entre 96 e 96,5°GL. O aquecimento desta coluna é feito diretamente pelo vapor de escape.
- coluna de retificação B: tem a função de proporcionar uma purificação e concentração do álcool, eliminando impurezas originadas na própria fermentação ou em reações do próprio meio. Estas impurezas podem ser:
 - de cauda, sendo retiradas antes que o álcool, pois apresentam ponto de ebulição menor que o álcool etílico, tais como aldeídos e ésteres, além óleo fúsel, com teor alcoólico entre 50 e 70°GL, que possui algum valor comercial;
 - de cabeça, sendo retiradas posteriormente ao álcool, pois apresentam ponto de ebulição maior que o álcool etílico, tais como álcoois superiores e furfurool.

O produto principal é o álcool bruto, também chamada de álcool de segunda, com teor alcoólico entre 92 e 96°GL. O aquecimento desta coluna é realizado pelos vapores provenientes da coluna de esgotamento B1.

Os condensadores E, E1 e E2 efetuam a condensação dos vapores da coluna de retificação. O condensador E tem por finalidade aquecer o vinho que vai alimentar a coluna A1. O condensado dos condensadores E e E1 retorna ao topo da coluna B, enquanto que no condensador E2, parte retorna ao topo da coluna B e parte é desviada para a coluna D, a fim de aliviar o topo da coluna B de produtos de cabeça, que aumentam a acidez acética do álcool retificado.

3.2.6.3.3. DESIDRATAÇÃO

O álcool retificado resultante da retificação não ultrapassa 97,2°GL de teor alcoólico. A explicação para tal fato é a formação de uma mistura binária entre álcool e água, em proporções aproximadas de 97,2 e 2,8% respectivamente, denominada azeotrópica, de ponto de ebulição de 78,15°C, inferior ao dos componentes isoladamente e que não se fraciona pelos processos normais de destilação.

Para a desidratação deste álcool, transformando-o em anidro, com teor alcoólico entre 99,5 e 99,8°GL, é necessário introduzir uma substância desidratante ao processo, de maneira a fracionar a mistura azeotrópica. Quando o desidratante entra em contato com o álcool retificado, formam-se novas misturas azeotrópicas, sendo as mais importantes a ternária, entre a água, o álcool e o desidratante; e a binária, entre o álcool e o desidratante. As novas misturas azeotrópicas formadas apresentam as mesmas propriedades da original, funcionando o álcool anidro como resíduo, pois sobra nas proporções em que são formadas.

Para este processo utiliza-se os seguintes equipamentos:

- coluna de desidratação C: tem por finalidade desidratar o álcool retificado, com o auxílio de um desidratante que desloca o ponto de azeotropismo. Esta coluna é aquecida indiretamente, com o auxílio do vaporizador L, por onde o álcool anidro circula. O aquecimento não pode ser direto porque o álcool anidro sai pela base da coluna e com o aquecimento direto haveria a condensação do vapor com o álcool anidro que passaria a se hidratar. No gomo superior existe um decantador por onde o desidratante circula, com finalidade de se regenerar, retornando ao processo. A camada inferior deste decantador, rica em água e álcool mas contendo ainda desidratante, deve ser enviada para a coluna de recuperação de desidratante P. Nesta coluna são empregados 2 condensadores denominados H e H1, responsáveis pela condensação dos vapores. O condensado é retornado totalmente ao topo da coluna C. Podem ter auxiliar H2.
- coluna de recuperação de desidratante P: tem a finalidade de regenerar o desidratante da camada inferior do decantador da coluna C, para retornar ao processo. Nesta coluna, a camada inferior volatiliza-se através de aquecimento direto, sendo o desidratante condensado no

condensador I, que retorna parte para a coluna P e parte para a coluna C. Pode ter auxiliar I1. A mistura de álcool e água que sai pela base desta coluna é enviada para a coluna B para a recuperação do álcool.

O processo de destilação é complementado pelos seguintes aparelhos:

- resfriadeira de álcool J: é um trocador de calor tubular, cuja finalidade é de resfriar o álcool hidratado ou anidro que deixa a coluna para a armazenagem, evitando as perdas por evaporação.
- trocador de calor da vinhaça K: tem por finalidade recuperar o calor da vinhaça que deixa a coluna A e aquecer o vinho antes de entrar na coluna A1, proporcionando uma economia de vapor.

3.2.7. ARMAZENAGEM E EXPEDIÇÃO

Após a centrifugação, o açúcar é encaminhado para o setor de armazenamento. Para ser ensacado, deve alcançar condições apropriadas de umidade e temperatura, próximas de 0,02% e 38 °C, respectivamente, para evitar-se problemas como o empedramento e perda de cor do açúcar dentro da embalagem.

Para isso, o açúcar passa por um secador, que movimenta o açúcar dentro de uma estrutura cilíndrica rotativa (figura 40).

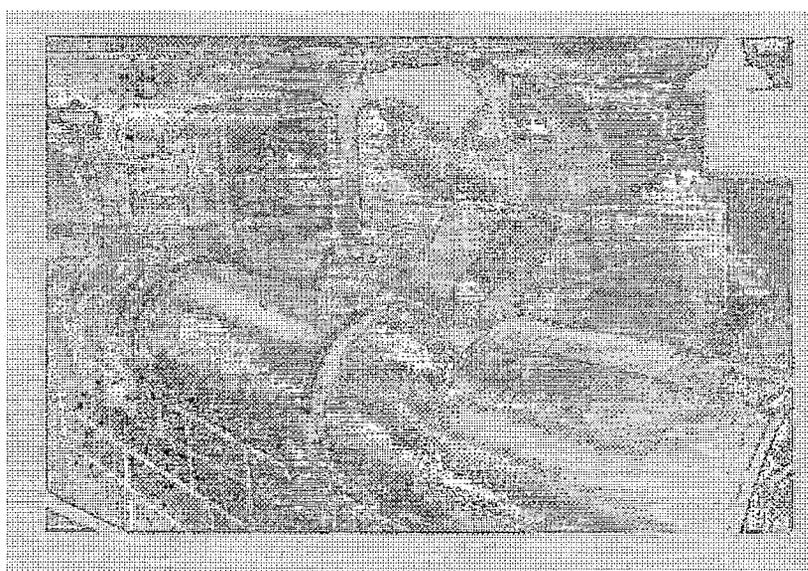


FIGURA 40 - Secador de açúcar

É dividido em uma parte de secagem e outra de resfriamento. A secagem consiste no aquecimento do ar, através de um radiador, alimentado com vapor, para provocar a evaporação da umidade do açúcar, enquanto que no resfriamento utiliza-se um ventilador para esfriá-lo, pois temperaturas elevadas podem provocar o amarelamento do açúcar.

O pó de açúcar gerado dentro do secador deve ser separado, pois é explosivo. Isso é feito através de um exaustor, que envia o pó para um lavador de pó. Este consiste em um tanque onde o pó é molhado com água através de aspersores. A mistura resultante é enviada para o setor de fabricação.

Após a secagem, o açúcar é carregado por esteiras até as bicas de ensaque ou para silos ou armazéns.

Nas bicas de ensaque, o açúcar pode ser ensacado em sacos de 50 kg, normalmente para exportação, ou em sacos "big-bag" com capacidade nominal de 1200 kg, normalmente para o mercado interno. Para o mercado externo o açúcar é do tipo 1 ou refinado, para o mercado interno é do tipo 2, 3 ou 4.

3.2.8. GERAÇÃO DE VAPOR

A produção de vapor numa indústria sucroalcooleira depende do índice de fibra presente na cana. Este determina a quantidade de bagaço disponível que será utilizado como matéria-prima para a combustão nas caldeiras, gerando a energia necessária para a transformação da água em vapor. Geralmente, este índice é suficiente para que a quantidade de bagaço gerado pelas moendas produza todo o vapor necessário ao funcionamento das máquinas e ao processo em geral.

Com uma fibra normal (12 a 14%) e um funcionamento bem balanceado dos setores da usina, normalmente há ocorrência de um excedente de bagaço (ou de vapor) que pode ser utilizado para outros fins: bombeamento da água de irrigação, fabricação de subprodutos, fornecimento de energia elétrica à rede, etc.

O bagaço final, ou simplesmente bagaço, é a matéria fibrosa sólida expulsa da abertura de saída do último terno de moenda, após a extração do caldo. Sua propriedade mais importante, sob o ponto de vista da produção de vapor, é a umidade. Além da água, o bagaço contém:

- fibra, principalmente constituída por celulose;

- matérias em solução na água, constituídas por açúcar e impurezas.

O poder calorífico do bagaço, traduzido pela quantidade de calor que a combustão de 1 kg de bagaço pode fornecer, é obtido pela combustão do carbono e do hidrogênio presentes na sua composição. Na prática é impossível queimar um combustível em condições industriais, fornecendo-lhe apenas a quantidade de ar teoricamente necessária, pois a combustão seria incompleta. Para obter uma combustão completa, sem matérias não queimadas, e para que todo o carbono queime sob forma de gás carbônico (CO_2), é preciso admitir um certo excesso de ar. Com efeito, uma grande parte do calor obtível seria perdida, deixando-se queimar uma parte do carbono sob forma de monóxido de carbono (CO).

A produção de vapor varia em função de alguns fatores, tais como: umidade do bagaço, excesso de ar utilizado na combustão, perdas da combustão em função de queima incompleta de sólidos, radiação e convecção externa, combustão deficiente de carbono e temperatura de expulsão dos gases.

Caldeiras a vapor são responsáveis pela obtenção de vapor para o funcionamento de diversos equipamentos industriais. Na indústria sucroalcooleira, normalmente utiliza-se a caldeira a vapor aquatubular alimentada por bagaço (figura 41).

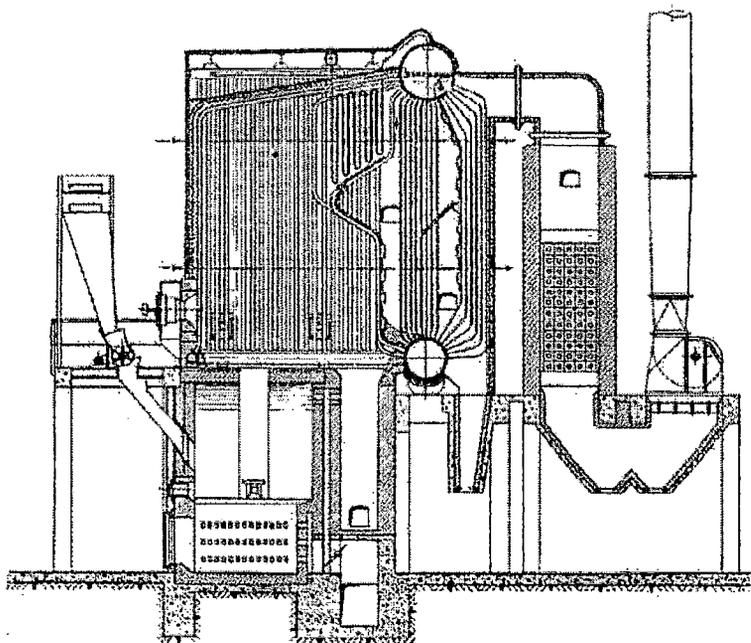


FIGURA 41 - Caldeira aquatubular em corte (Hugot, 1977)

Um conjunto de caldeiras para geração de vapor bem dimensionado fornece toda a energia necessária para o funcionamento do setor industrial de uma usina. O vapor é utilizado no acionamento de turbinas a vapor e nos diversos sistemas de troca de calor do processo industrial. Uma das turbinas acionadas por vapor é a do gerador de energia elétrica, que fornece energia suficiente para o acionamento dos demais equipamentos, geralmente por motor elétrico.

Após a utilização no processo industrial, o condensado resultante pode ser retornado para as caldeiras para realimentá-las, fechando o ciclo de geração e utilização de vapor. O condensado, porém, deve ser classificado da seguinte forma:

- água proveniente da condensação do vapor direto ou do vapor de escape: não corre o risco de contaminação e deve ser enviado ao tanque de alimentação.
- água proveniente da condensação do vapor vegetal: sofre contaminação direta pelo caldo. Esta água pode conter açúcar, proveniente de arrastes nos evaporadores. Mesmo em quantidades imperceptíveis, estes iriam às caldeiras e acabariam formando em seus tubos um depósito carbonatado prejudicial. Dessa forma, ela deve ser utilizada para outros fins, tais como embebição, lavagem de torta, diluição de méis, lavagem dos equipamentos, etc.

Logo, nem todo o vapor utilizado no processo industrial retorna como condensado para realimentação das caldeiras. Com isso, existe a necessidade de reposição da quantidade de água perdida. A quantidade para reposição gira em torno de 10 a 20%.

O condensado resultante da utilização do vapor no processo industrial é recolhido num equipamento chamado desaerador, cuja função é eliminar bolhas de ar contidas dentro do condensado através do aquecimento. Nele é coletada, além do condensado, a água fria tratada para complementação da água a ser fornecida para as caldeiras.

O vapor gerado tem um circuito de distribuição geral. O circuito mais simples, em uma indústria sucroalcooleira, consiste em produzir vapor em caldeiras de alta pressão e expandi-lo à pressão necessária à fabricação, em turbo-geradores, da potência elétrica necessária à usina. As moendas movidas a turbinas a vapor são alimentadas com uma derivação direta na tubulação de vapor de alta pressão.



Como a quantidade de vapor de escape fornecida pelos turbo-geradores é insuficiente, o circuito de alta pressão é ligado ao circuito de baixa pressão pelo intermédio de um expensor-redutor do superaquecimento, o qual fornece o suplemento necessário.

Nas usinas há 3 tipos de pressão de vapor principais (Hugot, 1977):

- alta pressão: normalmente utilizado para o acionamento de turbinas a vapor, sendo necessário dispor de uma pressão entre 16 e 45 kgf/cm². Abaixo de 16 kgf/cm² o consumo das turbinas a vapor aumenta rapidamente. De outro lado, acima de 45 kgf/cm² o custo de instalação diminui o interesse pela economia do vapor, devido ao preço das caldeiras, o qual aumenta rapidamente com a pressão.
- média pressão: mais interessante para as máquinas a vapor. Para obter seu funcionamento econômico, necessita-se de vapor entre 6 e 15 kgf/cm².
- baixa pressão: serve tanto como limite superior para a fabricação quanto como contrapressão para as máquinas. Normalmente, utiliza-se pressões de 1,5 kgf/cm².

4. MODELAGEM DO SISTEMA PRODUTIVO SUCROALCOOLEIRO

A modelagem desenvolvida baseia-se em dados reais fornecidos pela Usina Santa Adélia, localizada no município de Jaboticabal, estado de São Paulo, relativos à safra de 1998. Os valores médios citados correspondem a estimativas de funcionários ou levantamentos históricos.

A modelagem das atividades do sistema produtivo sucroalcooleiro através da utilização da rede de Petri permite a fácil visualização da seqüência de operações, bem como os recursos necessários em cada etapa.

Os lugares representam estados e/ou recursos do sistema, modelando as condições necessárias para que uma determinada atividade tenha início.

As transições modelam as atividades que levam o sistema de um estado a outro.

As relações entre as condições necessárias para o início de uma determinada atividade e a atividade em si são representadas por arcos.

Para os modelos de rede de Petri do sistema produtivo sucroalcooleiro foram adotadas as seguintes convenções:

- ○ lugar de entrada do modelo, representando recursos e/ou interfaces de saída de outros modelos
- ○ lugar de saída do modelo, representando produtos finais, subprodutos e/ou interfaces de entrada para outros modelos
- ○ lugar intermediário, representando estados que o modelo atinge ao longo do desenvolvimento do sistema
- □ transição de saída do sistema, representando atividades de interface do sistema sucroalcooleiro com outros sistemas
- □ transição intermediária, representando atividades que o modelo realiza ao longo do desenvolvimento do sistema
- □ bloco de saída do modelo, representando a interface com outros modelos intermediários que estão contidos no modelo em questão
- → arco de entrada para lugar ou de saída de transição

- → arco de entrada para transição ou de saída de lugar

Em complemento à modelagem de atividades produtivas, foi feita a caracterização das principais variáveis que compõem os modelos, com o intuito de criar uma estrutura favorável ao desenvolvimento de estudos de simulação.

4.1. PLANTIO

A área plantada com cana é de cerca de 15000 ha. Ela área inclui áreas para corte, para plantio, com mudas e em pousio, entre outras. Dos 15000 ha, aproximadamente 11500 ha são colhidos. Os carregadores representam 6,5% da área total disponível.

Para a divisão dos talhões nas áreas homogêneas de dimensões elevadas utiliza-se o critério da declividade, que consiste na divisão destas áreas em lotes de 500 m de comprimento, com uma largura que compreenda uma declividade de 6 m do terreno. O comprimento de 500 m leva em consideração condições de otimização de tempo e de preservação do solo no caso de corte mecanizado, pois esse comprimento corresponde, em média, ao carregamento completo de um reboque, fazendo com que este percorra o terreno já colhido somente uma vez, minimizando a compactação do solo.

O processo de plantio, crescimento e reforma nos canaviais pode ser visualizado na figura 42.

Os ambientes de produção enquadram-se nas categorias C, com produtividade média entre 85 e 90 toneladas de cana por hectare (tch), e D, com produtividade média entre 80 e 85 tch.

Trabalha-se no regime de plantio de verão, com plantas de 18 meses de maturação para o 1º corte. O plantio é realizado entre fevereiro e março de um certo ano, sendo que o 1º corte ocorre no ano seguinte, a partir de junho. Para os cortes seguintes, o período de maturação gira em torno de 12 a 13 meses.

No 1º corte obtém-se, em média, 125 t/ha (tabela 03), enquanto que no 4º corte em diante, o rendimento cai para cerca de 90 t/ha. Em média, esse é o corte escolhido para se iniciar o processo de reforma da área em questão. Nenhum talhão ultrapassa o 5º. corte sem reforma.

Na reforma, além da adubação normal efetua-se a correção no pH, através da aplicação de calcário, bem como a adubação para reposição de nutrientes,

através de fertilizantes químicos, vinhaça e torta de filtro, sendo estes dois últimos resíduos do processo industrial sucroalcooleiro.

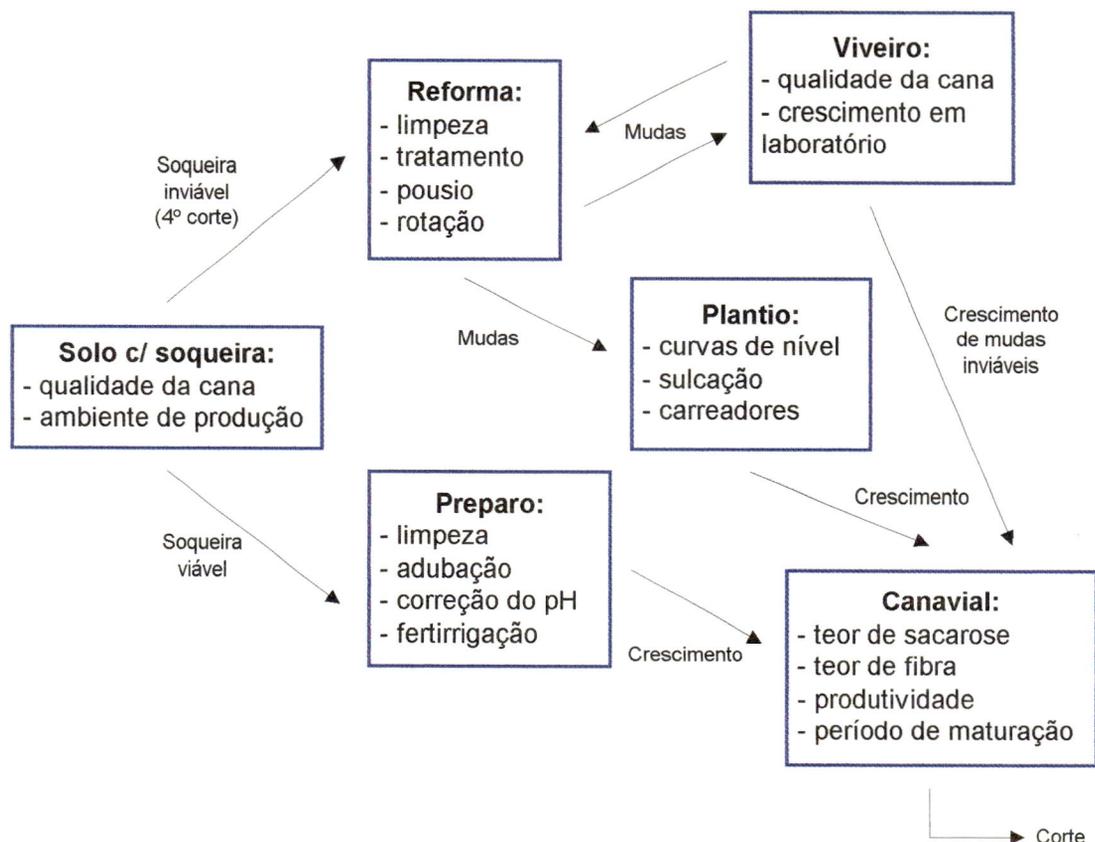


FIGURA 42 - Diagrama do sistema de plantio

TABELA 03 - Produtividade das áreas colhidas e áreas escolhidas para reforma

(Fonte: Usina Santa Adélia)

PRODUTIVIDADE DAS ÁREAS COLHIDAS E ÁREAS P/ REFORMA - SAFRA 1998					
Número de cortes	Área colhida (ha)	Produção (t)	Produtividade (t/ha)	Área p/ reforma (ha)	Área p/ reforma (%)
1	2599,65	325080	125,05	0	0,00
2	2931,85	343030	117,00	127,46	4,35
3	3490,32	370480	106,14	349,71	10,02
4	2132,75	193930	90,93	1096,26	51,40
5	725,81	59030	81,33	691,42	95,26

O pousio dura, em média, 60 dias, após os quais o solo é entregue a terceiros para o cultivo de amendoim. O amendoim é uma das leguminosas mais adequadas, pois o seu ciclo de produção (do plantio até a colheita) dura em torno de 120 dias, permitindo que o solo esteja pronto para o plantio das mudas de cana ainda no verão. A usina utiliza a multiplicação em laboratório para a produção de mudas, sendo que a relação considerada viável é de 1 para 7, no mínimo.

Para a fertirrigação utiliza-se os sistemas de caminhão-tanque e canais de aspersão para o transporte da vinhaça, e a aspersão com veículo auto-propelido para a aplicação. Os canais de aspersão mantêm uma distância média de 200 m um do outro, que corresponde ao comprimento total da mangueira de aplicação do veículo auto-propelido, otimizando o processo.

A rede de Petri representativa do sistema de plantio tem como entrada principal o lugar "Talhão com soqueira", que representa o estado do talhão após o corte, sendo sua saída principal o lugar "Canavial", representando o canavial pronto para o corte. Existem 2 alternativas:

- crescimento do canavial sem reforma, quando a produtividade do talhão no corte anterior atinge valores acima de 90 t/ha.
- crescimento do canavial com reforma, quando a produtividade do talhão no corte anterior atinge valores abaixo de 90 t/ha. Neste caso, as soqueiras são retiradas e efetua-se o replantio de novas mudas de cana, visando a aumento da produtividade.

A marca inicial no lugar "Talhão com soqueira" (figura 43) habilita 2 transições: "Limpeza" e "Limpeza / retirada de soqueira", que representam as 2 opções discutidas acima.

As 2 opções foram simuladas, sendo encontrado um único caminho para cada uma (anexo A). Isso denota a inexistência de atividades paralelas em cada opção, o que reflete o sistema real, validando o modelo apresentado.

A decisão sobre o conflito entre o disparo da transição "Limpeza / retirada de soqueira" e da transição "Limpeza" depende da produtividade alcançada, podendo a reforma ser realizada desde o 2º até o 5º corte.

Para a opção com reforma, existe uma saída secundária que é a colocação de uma marca no lugar "Leguminosa p/ venda", indicando a geração de leguminosa no processo de reforma do talhão.

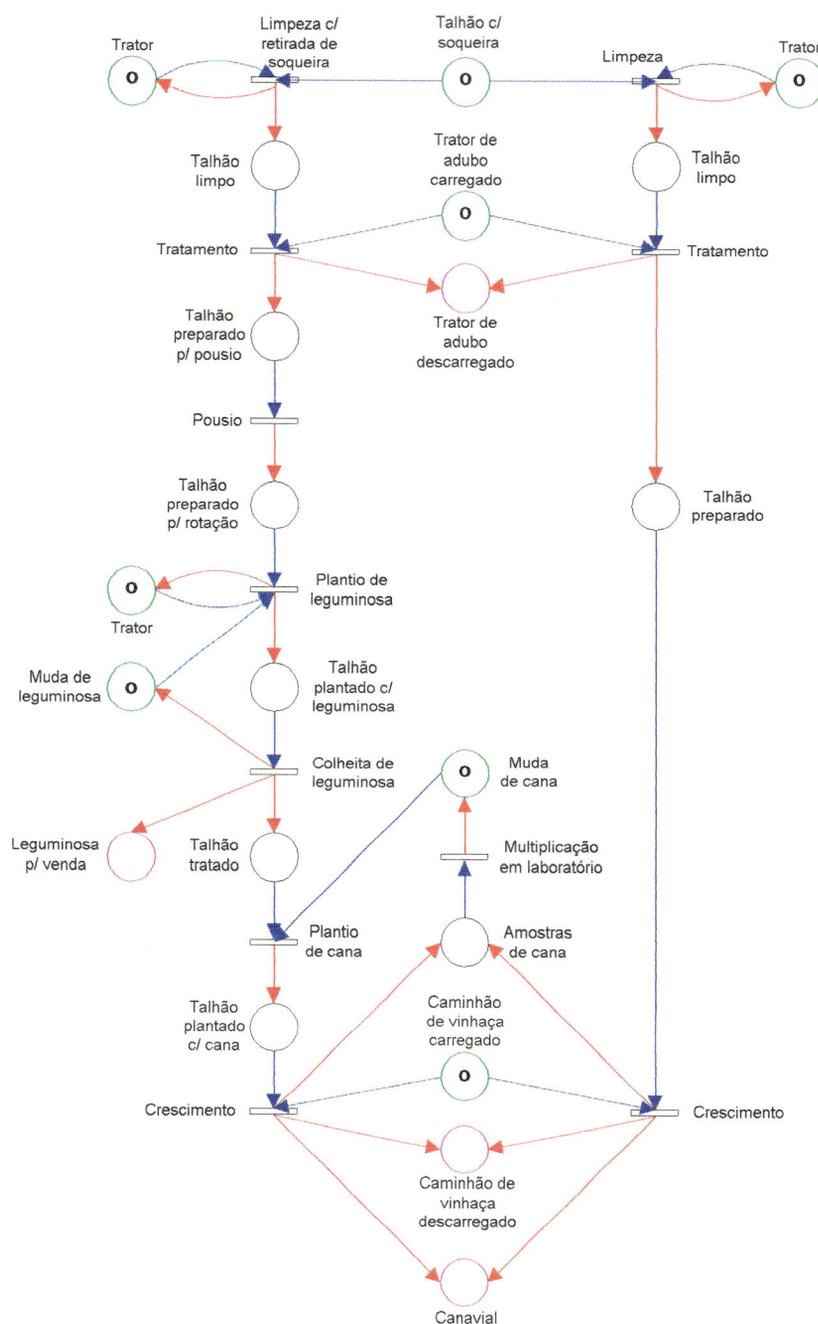


FIGURA 43 - Modelagem do sistema de plantio

A reforma do talhão após o corte é realizada em função da previsão de baixa produtividade para o corte seguinte. Tal previsão tem caráter estocástico, considerando-se alguns fatores:

- A qualidade da cana, aliada ao tipo de ambiente de produção, definem uma faixa de valores para a produtividade. A cada ano, novas qualidades são testadas, em condições climáticas diferentes. Logo,

novos valores incrementais para a produtividade do talhão são alcançados.

- A produtividade do talhão diminui em função do aumento do número de cortes sofrido pela planta, onde pode-se gerar uma relação entre essas variáveis.

Com a análise desses fatores, pode ser obtido um levantamento histórico de produtividade do talhão, com a geração de uma frequência de ocorrência de reforma, em função do índice de produtividade e do número de cortes.

A diferença fundamental entre fazer-se ou não a reforma do talhão, além do sensível aumento nos índices de produtividade, está no intervalo de tempo em que o talhão estará disponível para o corte. O crescimento do canavial sem reforma engloba os seguintes intervalos de tempo:

- limpeza do talhão após o corte, de natureza determinística;
- tratamento do solo, de natureza determinística;
- crescimento do canavial propriamente dito, de natureza estocástica em função da influência das condições climáticas.

Para o crescimento do canavial com reforma, além dos intervalos de tempo já descritos, existem os seguintes:

- pousio, de natureza determinística;
- rotação de cultura, que pode ser considerada de natureza determinística, pois apesar de sofrer influência climática, o processo de rotação de cultura normalmente é bem controlado ao longo do tempo;
- 1º crescimento do canavial a partir de mudas, de natureza estocástica pela influência climática, maior em relação ao tempo de crescimento a partir de soqueiras.

4.2. CORTE E CARREGAMENTO

O sistema de corte e carregamento de cana utilizado está representado na figura 44.

O corte manual é utilizado em 70% da cana moída, com queima prévia da cana. O tempo de pós-queima médio utilizado é de 36 h.

Atualmente, a usina passa por um período de transição, com parte do corte mecanizado sendo realizado em cana com queima prévia, pois algumas colhedoras

são de uma geração projetada para a colheita de cana queimada. Se utilizadas para a colheita de cana crua, apresentam deficiência no rendimento e um índice preocupante de quebra de peças. A usina já adquiriu modelos mais adequados e resistentes, apropriados para a colheita da cana crua.

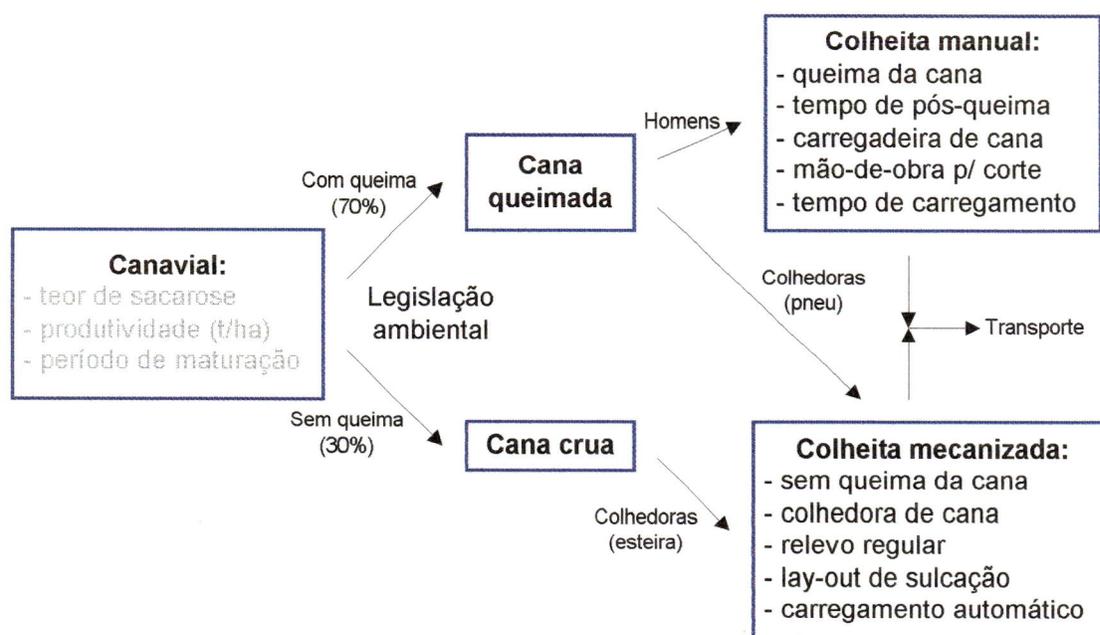


FIGURA 44 - Diagrama do sistema de corte e carregamento

O modelo de colhedora mais atual adotado pela usina tem capacidade média de colheita de 700 toneladas de cana em 24 horas.

Existe um planejamento para se alcançar, até o ano de 2004, o índice de mecanização da colheita de 100% do total da área plantada, que corresponde ao total da área mecanizável, adequando-se, desta forma, à lei ambiental que restringe as queimadas.

Os tipos de veículos e máquinas utilizados no corte e carregamento da cana são:

- carregadeira de cana: são 33 unidades. A capacidade diária é de 350 t/dia/equipamento.
- trator-reboque: são 18 unidades. A capacidade diária é de 415 t/dia/equipamento.
- trator-transbordo: a usina está testando este tipo de equipamento. Possui 1 unidade.

- colhedora de cana: são 7 unidades. A capacidade diária é de 500 t/dia/equipamento.
- equipamento de apoio: são moto-bombas, caminhões tipo Munck, comboio, caminhões de vinhaça, entre outros.

No sistema em análise, as opções de corte são:

- corte manual de cana queimada
- corte mecanizado de cana queimada
- corte mecanizado de cana crua

As opções de carregamento da cana no caminhão são:

- trator-reboque
- trator-transbordo

Essas alternativas geram 6 combinações possíveis de corte e carregamento que a cana pode seguir para alcançar o estado final desejado.

O modelo em rede de Petri apresentado na figura 45 mostra essas alternativas. As decisões sobre o tipo de corte são modeladas pelos lugares:

- Canavial: habilita a transição "Queima", que modela a opção de queima prévia da cana para o corte, e as transições "Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque" e "Corte mecanizado de cana crua c/ trator-transbordo", que representam as opções de corte sem queima.
- Canavial queimado: habilita a transição "Corte manual", que modela a opção de corte manual com queima, e as transições "Corte mecanizado de cana queimada c/ trator-reboque" e "Corte mecanizado de cana crua c/ trator-transbordo", que representam as opções de corte mecanizado com queima.

As opções de carregamento são modeladas pelos lugares "Trator-reboque vazio" e "Trator-transbordo vazio", ambos disponíveis para todos os tipos de corte.

A simulação do modelo apresentou os seguintes resultados (anexo B):

- Em todas as opções de corte com carregamento com trator-transbordo chegou-se a um único caminho para cada opção, mostrando a inexistência de atividades paralelas, o que era esperado, pois este tipo de carregamento não necessita de atividades preliminares ao carregamento em si.
- Para as opções de corte com trator-reboque a atividade "Desengate entre caminhão e reboque" pode ser realizada paralelamente às atividades anteriores à atividade "Desengate entre trator e reboque".

Alem disso, existe o paralelismo entre as atividades “Engate entre reboque e trator” e “Engate entre reboque e caminhão”. Com estas alternativas, o corte mecanizado de cana crua apresentou 6 caminhos possíveis; o corte mecanizado de cana queimada, 8; e o corte manual de cana queimada, 10.

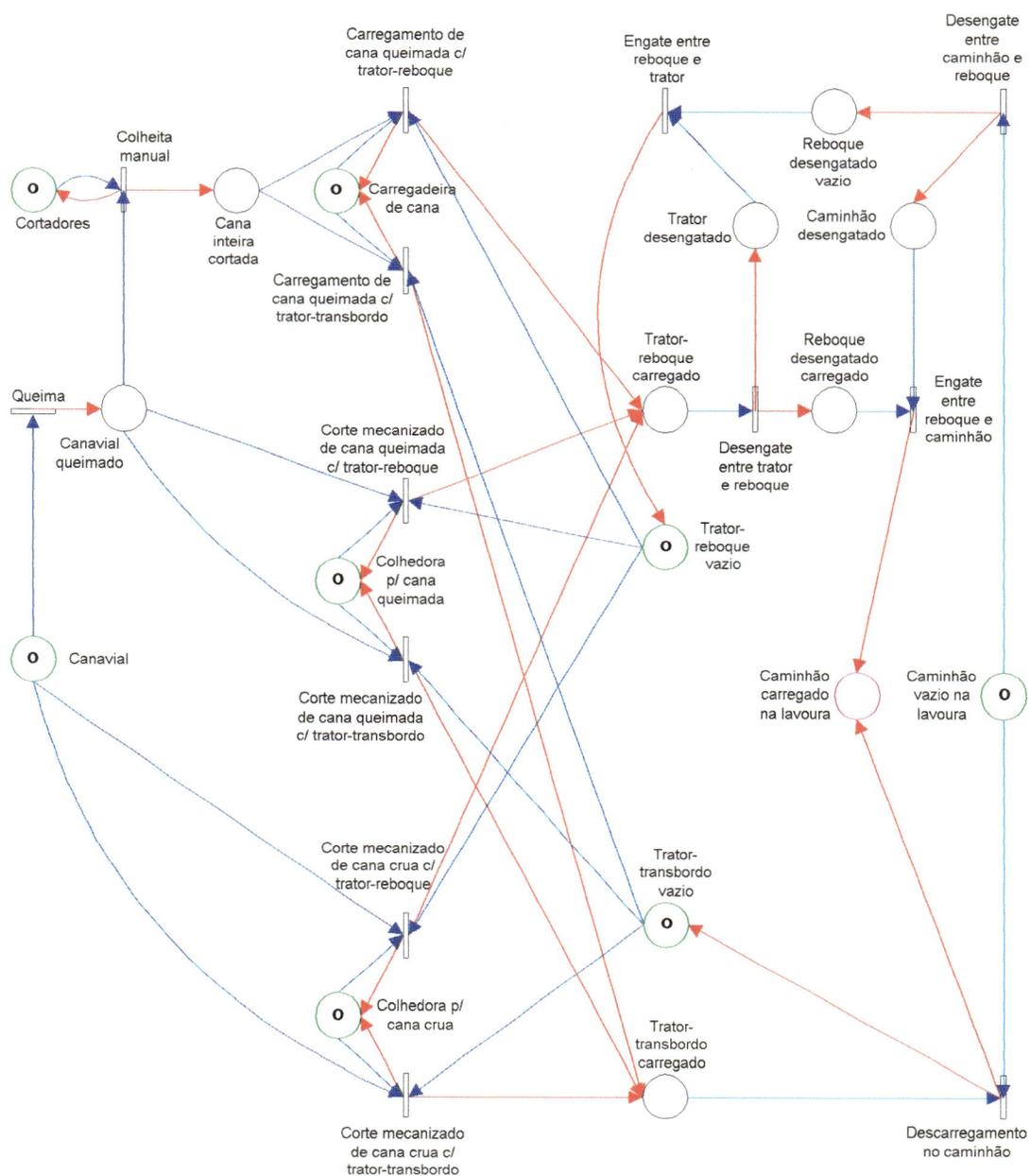


FIGURA 45 - Modelagem do sistema de corte e carregamento

O corte manual é caracterizado pelas variáveis:

- Queimada, sendo seus atributos principais: o tempo de queima, de natureza estocástica em função da influência climática; a seqüência de queima e o tempo de pós-queima, ambos de natureza estocástica em função da influência do sistema de logística de alimentação de cana para a usina.
- Cortadores, onde os principais atributos são: quantidade, produtividade e período de trabalho, que definem a demanda deste fator cuja natureza é estocástica pelas características peculiares de cada cortador; e o custo financeiro por cortador, que define o aspecto econômico, podendo ser determinístico.
- Carregadeira, cujos atributos principais são: quantidade, que é claramente determinístico; tempo de carregamento, freqüência e tempo de manutenção e/ou abastecimento, que são operacionais e de natureza estocástica em função das diferentes condições climáticas e de trabalho ao longo do talhão e do período do dia; custos econômicos de manutenção e abastecimento, de natureza estocástica pela dependência de sua ocorrência aleatória.

Para o corte mecanizado a variável principal é a colhedora, cujos atributos principais são os mesmos descritos para a carregadeira.

O sistema de carregamento com trator-transbordo tem como fator principal o trator-transbordo, cujos atributos operacionais são: quantidade, de natureza determinística; tempo de deslocamento até o caminhão, tempo de transbordamento, freqüência e tempo de manutenção, todos de natureza estocástica, pois dependem de condições climáticas e de trabalho que variam ao longo do dia.

Para o sistema de carregamento com trator-reboque as principais variáveis são:

- trator-reboque, cujos atributos principais são: quantidade; os tempos de engate e desengate entre o trator e o reboque; os tempos de deslocamento do trator para o local de engate com o reboque vazio, para o local de carregamento e para o local de desengate do reboque cheio; o tempo de carregamento do reboque, que depende do tipo de corte; a freqüência e o tempo de manutenção e/ou abastecimento; o custo de manutenção do trator. Todos, exceto o primeiro, têm caráter

estocástico em função de dependerem de condições climáticas e de operação que variam ao longo do talhão e do período do dia.

- caminhão, onde os principais atributos são: quantidade, frequência de chegada ao talhão; os tempos de engate e desengate entre o caminhão e o reboque; a frequência e o tempo de manutenção e/ou abastecimento. Todos, exceto o primeiro, são de caráter estocástico em função de dependerem de condições climáticas e de operação que variam ao longo do talhão e do período do dia.

Cada setor onde está havendo corte e carregamento de cana é chamado de frente de corte. Sua caracterização é um importante componente para a definição da logística de corte, carregamento e transporte a ser adotada, sendo seus atributos principais: quantidade e a seqüência de abertura das frentes, ambos de natureza determinística.

4.3. TRANSPORTE / PESAGEM E AMOSTRAGEM

São utilizados 2 tipos de caminhões para o transporte de cana (figura 46):

- "Romeu e Julieta": a frota é de 32 caminhões.
- Treminhão: a frota é de 22 caminhões.

Os treminhões têm permissão de trafegar das 6 h às 18 h e das 23 h às 4 h.

Fora destes períodos, devem trafegar somente com 2 reboques.

O raio econômico da usina gira em torno de 20, 79 km.

As máquinas, equipamentos e veículos do setor agrícola passam por manutenção: preventiva, feita pela usina, baseada na vida útil das peças que possuem movimento no seu funcionamento; e corretiva, quando da quebra de peças estacionárias, quebra por mau uso, entre outros.

São adotadas algumas medidas de segurança contra eventuais quebras de equipamentos que possam comprometer o abastecimento de cana para a indústria, entre elas:

- aproveitamento das horas de parada de transporte: o transporte ocorre em 20 das 24 horas do dia, sendo as 4 horas de folga utilizadas para situações emergenciais;
- equipamentos em manutenção: em média, são previstos que 10% dos equipamentos estejam em manutenção;

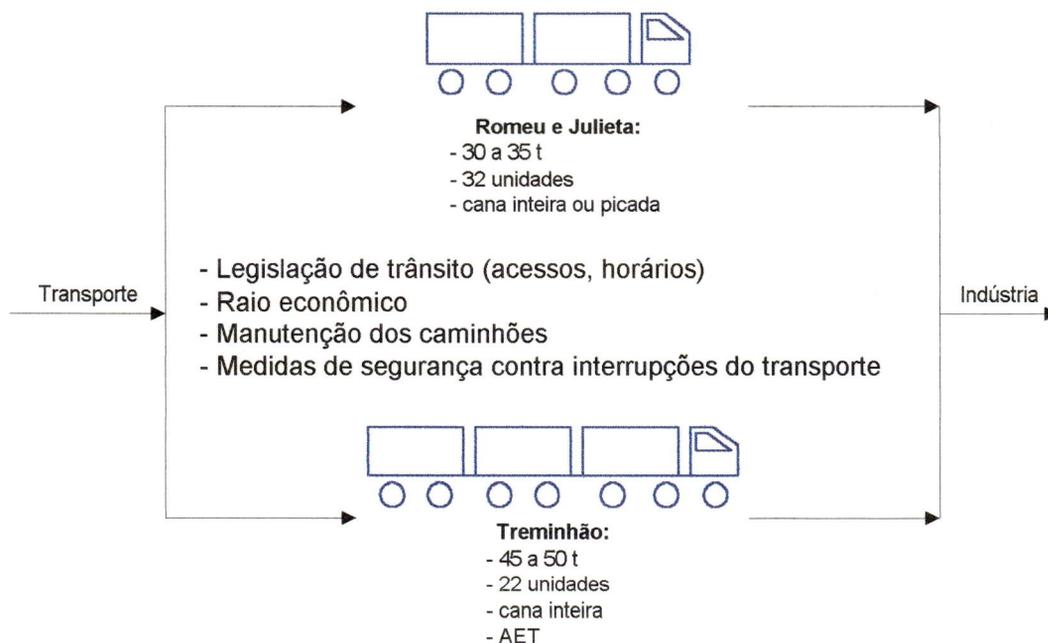


FIGURA 46 - Diagrama do sistema de transporte

- troca de turno em trânsito: motoristas e operadores de máquinas são encaminhados diretamente ao local de trabalho, evitando a perda de tempo em retornar o veículo ou equipamento à indústria somente para troca do motorista ou operador.

Chegando à usina, o caminhão é pesado. Após a 1ª pesagem (carregado) o caminhão segue uma das alternativas: vai para o Laboratório de PCTS ou segue diretamente para o pátio de cana para ser descarregado (figura 47).

Além do controle do peso das cargas dos caminhões, o setor de pesagem é responsável pelo controle e reprogramação das viagens.

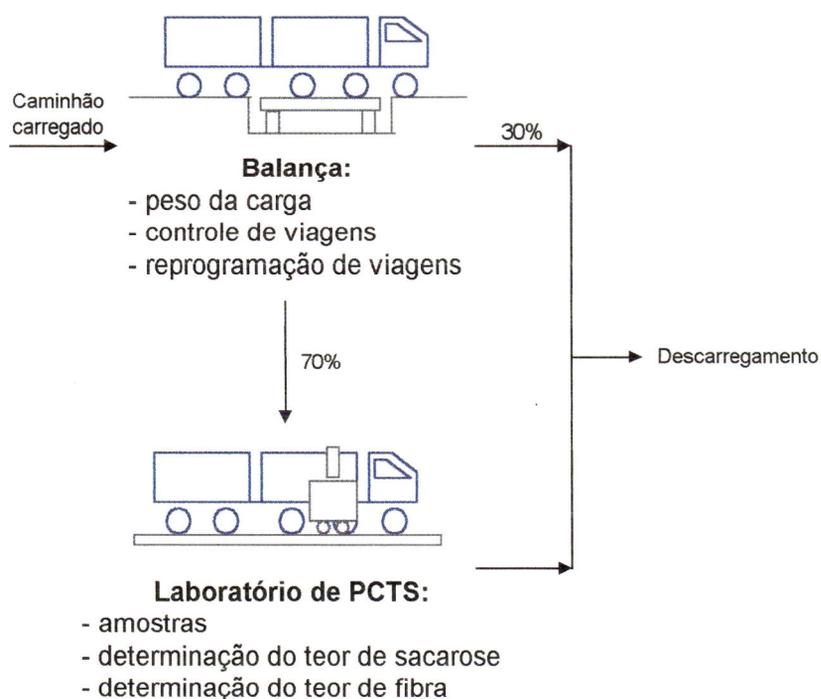


FIGURA 47 - Diagrama do sistema de pesagem e amostragem

Utiliza-se mais de 50 variedades de cana, com os seguintes resultados globais (tabela 04):

Tabela 04 : Características das variedades de cana utilizadas (Fonte: Usina Santa Adélia)

Característica	PCC (%)	Fibra (%)	Pureza (%)	Produtividade (tch)
Média	15,41	12,86	86,94	265,26

As principais características analisadas das variedades de cana são:

- PCC: relação entre a massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada (pol) e a massa total da cana.
- Fibra: relação entre a massa de matéria seca e insolúvel em água contida na cana e a massa total da cana.
- Pureza: relação entre a massa de sacarose e a de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada.

- Produtividade: relação entre a massa de cana, em toneladas, e a área de cana colhida, em hectares.

Cerca de 70% dos caminhões passam pelo Laboratório de PCTS. A usina não efetua a análise em todos os caminhões pelo fato de que a maior parte da cana é cultivada pela própria usina, seja em áreas próprias ou arrendadas. A cana dos fornecedores é totalmente analisada.

O funcionamento básico do sistema de transporte está modelado na figura 48, onde a entrada principal é o lugar “Caminhão carregado na lavoura” e a saída é o lugar “Caminhão vazio na lavoura”.

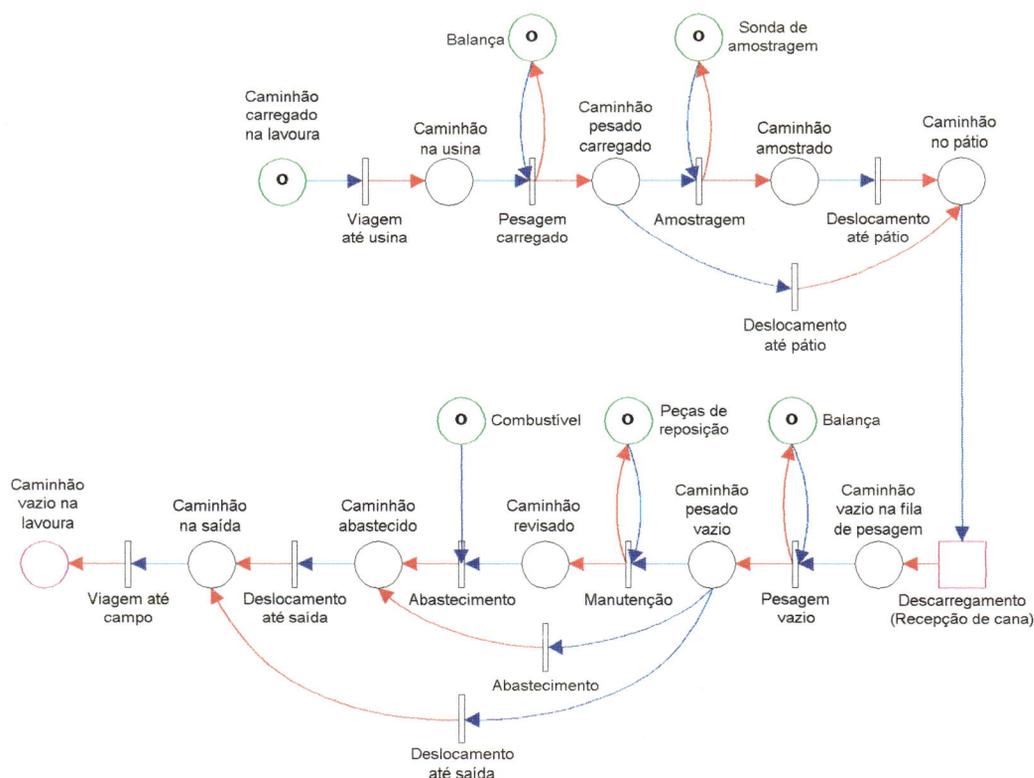


FIGURA 48 - Modelagem do sistema de transporte, pesagem e amostragem

Quando carregado, o caminhão tem a opção de ser amostrado ou não. Quando vazio, o caminhão tem as opções de retornar diretamente para a lavoura para um novo carregamento, abastecer antes de retornar ou fazer uma manutenção e abastecer antes de retornar.

A simulação do modelo apresenta 6 caminhos possíveis (anexo C), que são as combinações das opções discutidas. Não existem atividades paralelas.

O descarregamento foi modelado como um bloco, que resume o modelo da Recepção de cana, onde a entrada é o lugar "Caminhão no pátio" e a saída é o lugar "Caminhão vazio na fila de pesagem".

No modelo analisado, o principal elemento a ser caracterizado é o caminhão, que tem como atributos principais: quantidade; carga transportada por viagem, que depende do tipo de caminhão e dos períodos de restrição, para o caso de treminhões; tempo de carregamento total do caminhão, que depende do tipo de caminhão e do sistema de carregamento; tempo de deslocamento carregado até a usina; o tempo de deslocamento vazio até a frente de corte; a frequência e o tempo de manutenção e/ou abastecimento; o custo de manutenção. Todos, exceto o primeiro, têm caráter estocástico, em função da dependência de fatores operacionais que variam ao longo do tempo.

Além do caminhão, outros elementos importantes são a balança, com atributos estocásticos como o tempo de pesagem do caminhão carregado e vazio e a frequência e o tempo de manutenção; e a sonda de amostragem, cujos atributos principais são o intervalo de amostragem e a frequência de caminhões amostrados, de natureza estocástica também.

4.4. RECEPÇÃO DE CANA

O sistema analisado utiliza o armazenamento de cana em pátio, conforme apresentado na figura 49.

O pátio possui capacidade nominal de armazenamento de 3000 t de cana.

Os caminhões com cana inteira podem ser descarregados de 2 formas:

- pelo hilo hidráulico 2 na mesa alimentadora conjugada, que vai alimentar a esteira de cana 1;
- pelo hilo hidráulico 2 no pátio, para ser alimentada pelos tratores-empilhadeiras na mesa alimentadora de 45°, que por sua vez, alimenta a esteira de cana 2.

A cana picada é descarregada na esteira de cana picada através de um tombador hidráulico. Caso haja necessidade, existe a possibilidade de se alimentar a esteira de cana picada com cana inteira. Para isso, o caminhão deve possuir basculamento lateral.

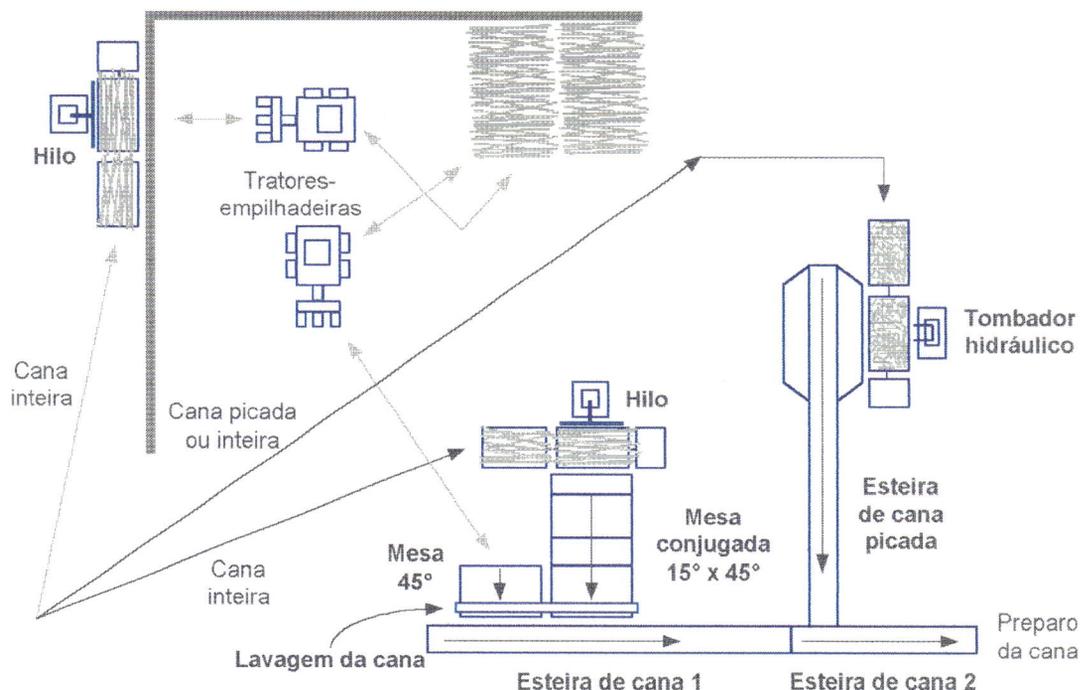


FIGURA 49 - Diagrama do sistema de recepção de cana

A usina trabalha com uma sobra de cana no pátio, que é uma quantidade que fica armazenada para ser moída no dia seguinte. Isso ocorre devido ao fato de não haver corte de cana aos domingos. Sendo assim, é necessário planejar uma sobra suficiente para ser moída nos domingos. Essa sobra é dividida ao longo da semana e, gradativamente, vai havendo uma sobra maior a cada dia até atingir-se um valor conveniente para a usina funcionar normalmente aos domingos.

No sistema em análise, o modelo desenvolvido em rede de Petri mostra que o descarregamento e a movimentação dos caminhões no pátio são definidos pelos seguintes aspectos (figura 50):

- Tipo de cana: caminhões carregados com cana picada são descarregados na esteira de cana picada; já os caminhões com cana inteira podem ser descarregados no pátio, na mesa alimentadora ou na esteira de cana picada. Neste último caso, ocorre o compartilhamento dos recursos “Tombador hidráulico” e “Esteira de cana picada”.
- Alimentação: normalmente os caminhões de cana inteira são descarregados na mesa alimentadora conjugada, alimentando diretamente o processo industrial. O descarregamento no pátio é

utilizado em 3 casos: para diminuir a fila de caminhões carregados que estão aguardando o descarregamento; para formar estoque para o período em que não há corte de cana (aos domingos); ou para liberar caminhões quando há interrupção do processo industrial.

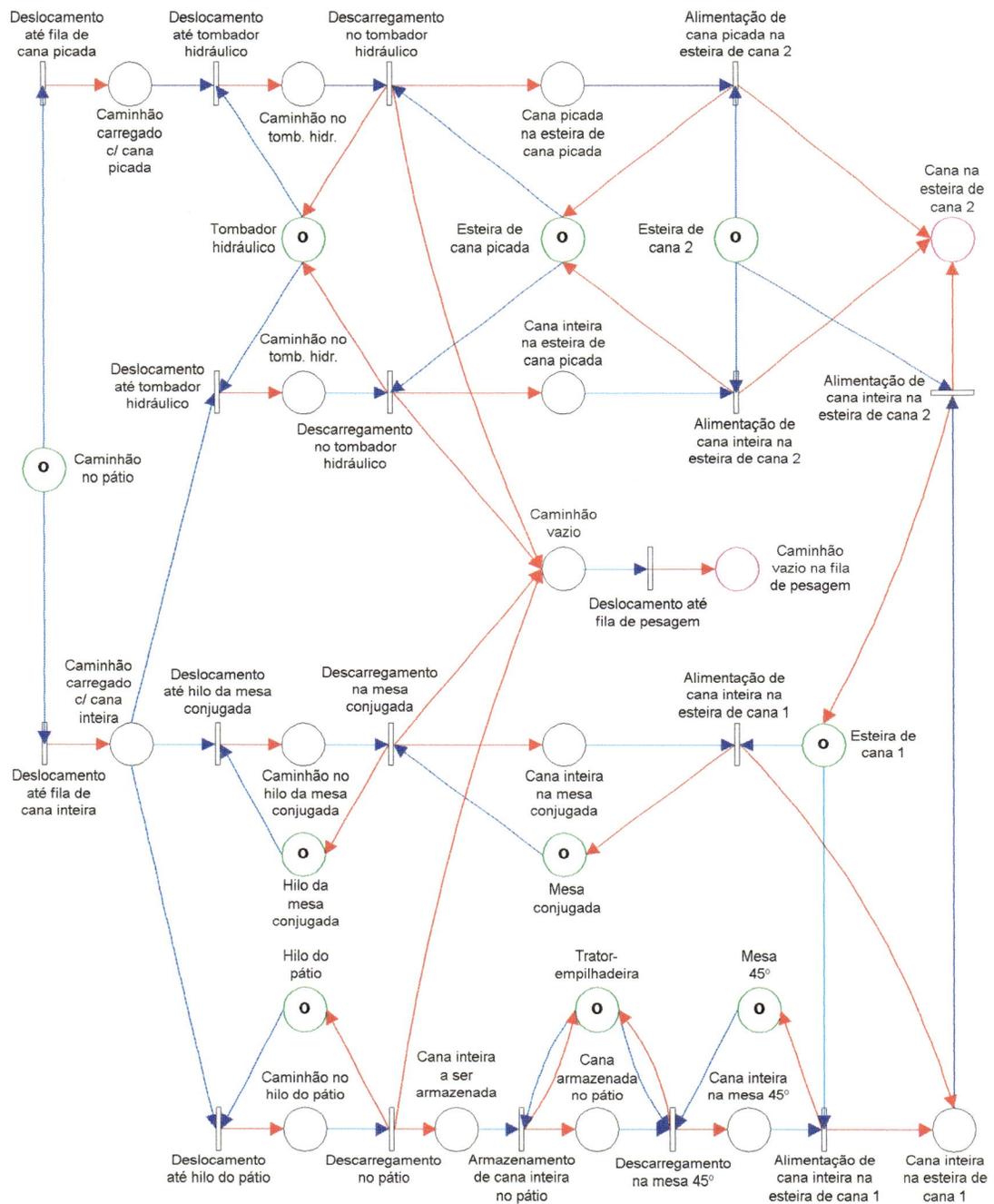


FIGURA 50 - Modelagem do sistema de recepção de cana

Desta forma, tem-se 4 caminhos principais para a recepção de cana. A entrada principal é o lugar “Caminhão no pátio”. O caminho percorrido até o lugar “Caminhão vazio na fila de pesagem” complementa o modelo do sistema de transporte apresentado no item anterior. A colocação de uma marca no lugar “Cana na esteira de cana 2” é outra saída principal, representando o início do processo industrial da cana.

O modelo foi simulado e foram encontrados 12 caminhos possíveis (anexo D), o que é esperado, pois, após o disparo das transições que representam cada um dos 4 tipos de descarregamento, ficam habilitadas a transição “Deslocamento até fila de pesagem” e as demais seqüências de transições posteriores ao descarregamento, gerando paralelismo de atividades. Com isso, para o descarregamento de cana picada tem-se 2 caminhos; para o descarregamento de cana inteira no tombador hidráulico, 2; para o descarregamento na mesa conjugada, 3, e para o descarregamento no pátio, 5.

Neste modelo ocorre compartilhamento dos recursos: tombador hidráulico, esteira de cana picada, esteira de cana 1 e esteira de cana 2. A utilização eficiente destes recursos traduz-se numa alimentação uniforme e constante de cana, o que é fundamental para o bom rendimento do processo industrial.

Para caracterização das principais variáveis, o modelo pode ser dividido em 3 atividades: descarregamento, movimentação e alimentação.

Para o descarregamento as variáveis mais importantes são: tombador hidráulico, hilo da mesa conjugada e o hilo do pátio, sendo seus atributos principais a quantidade, o tempo de descarregamento, a freqüência e o tempo de manutenção, sendo todos estocásticos, exceto o primeiro.

Na movimentação as variáveis principais são:

- caminhão, com os atributos tempo de deslocamento até o local de descarregamento, que depende do tipo de cana a ser descarregada; freqüência de chegada na área de recepção, que depende do sistema de logística de transporte; e velocidade de deslocamento. Todos os atributos são de caráter estocástico.
- trator-empilhadeira, cujos atributos importantes são: quantidade, tempos de deslocamento nas operações de armazenagem de cana no pátio e de alimentação de cana na mesa de 45°, freqüência e tempo de manutenção e/ou abastecimento, custo de manutenção e

abastecimento, velocidade de deslocamento nas diversas operações. Todos os atributos, exceto o primeiro, são estocásticos.

Para a alimentação, os elementos principais são:

- mesa alimentadora de 45° e mesa alimentadora conjugada, sendo os atributos principais a velocidade de alimentação de cana para a esteira, a frequência e o tempo de manutenção e o custo de manutenção.
- esteira de cana picada, esteira de cana 1 e esteira de cana 2, com os atributos: velocidade de transporte de cana, capacidade de carga, frequência e tempo de manutenção e custo de manutenção.

Todos os atributos descritos são estocásticos.

4.5. PREPARO DA CANA

Para o preparo da cana são utilizados os seguintes equipamentos: nivelador SD3, picador COP8 e desfibrador COP5. O processo está representado na figura 51.

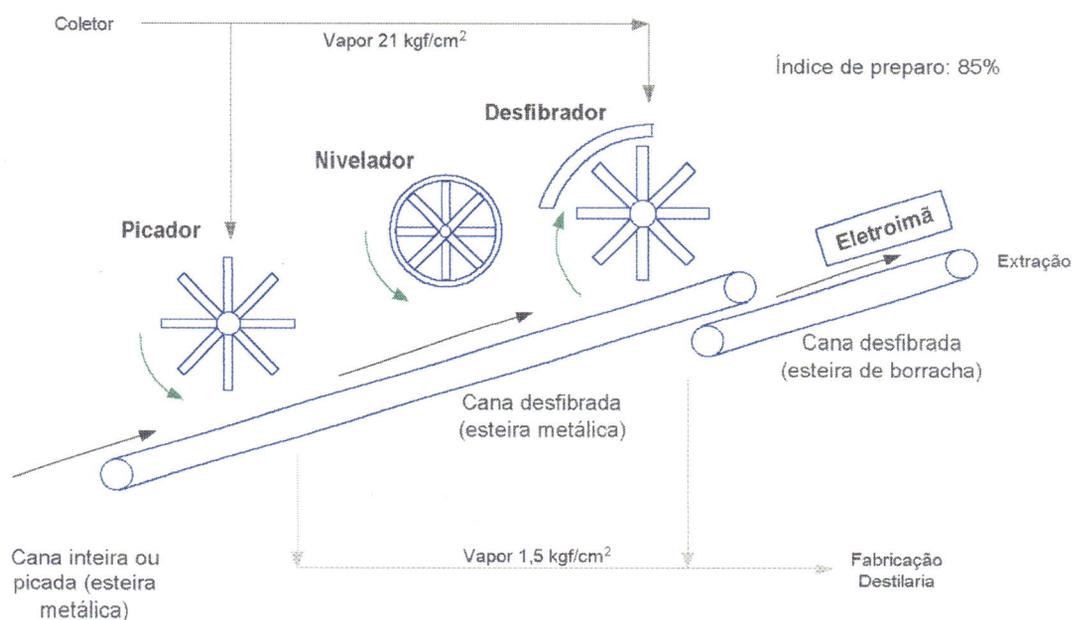


FIGURA 51 - Diagrama do sistema de preparo da cana

Este sistema de preparo proporciona um índice de preparo médio de 85%.

O modelo representativo do sistema de preparo da cana é apresentado na figura 52. A entrada principal é o lugar “Cana na esteira de cana 2” e a saída principal é a colocação de uma marca no lugar “Cana desfibrada”. Outra saída principal é a colocação de uma marca no lugar “Esteira de cana 2”, que representa a liberação deste recurso para uma nova carga de cana, demonstrando o estreito relacionamento deste modelo com o da recepção de cana.

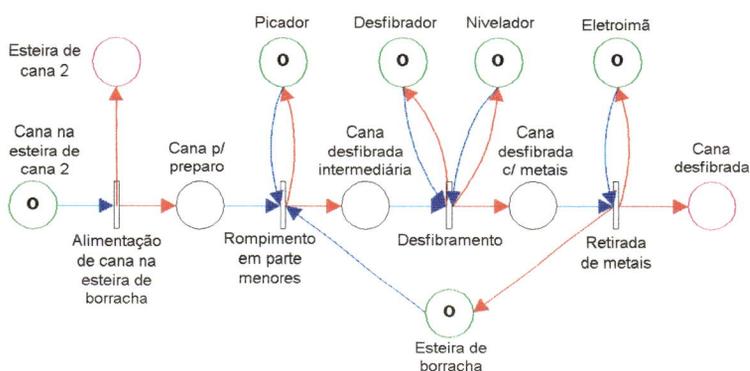


FIGURA 52 - Modelagem do sistema de preparo da cana

Sua simulação apresentou um único caminho (anexo E), que representa o fluxo de cana sendo preparado, até atingir o estado de cana desfibrada. Este resultado é esperado, pois não existem atividades paralelas neste sistema.

Este modelo marca o início da representação da porção de característica contínua do sistema produtivo sucroalcooleiro, onde cada marca pode ser entendida como uma porção infinitesimal do fluxo envolvido em cada sistema.

As principais variáveis deste modelo são:

- esteira de borracha, com os atributos velocidade de alimentação de cana, frequência e intervalo de manutenção, custo de manutenção;
- picador e desfibrador, sendo os atributos principais a frequência e tempo de manutenção e o custo de manutenção.

Todos os atributos descritos são de natureza estocástica.

4.6. EXTRAÇÃO

A extração do caldo é realizada por um conjunto de moenda do tipo Dedini 30" de largura por 78" de comprimento, com 6 ternos. A cada terno é extraída uma parte do caldo, sendo que cerca de 70% é extraído no 1º terno. O diagrama do sistema de extração está representado na figura 53.

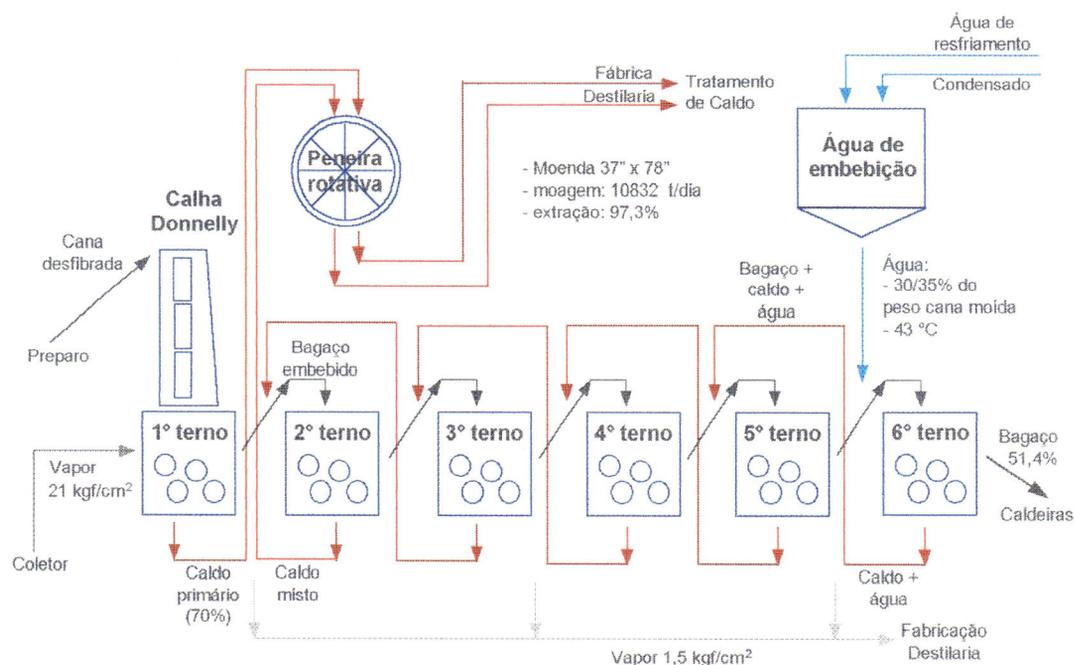


FIGURA 53 - Diagrama do sistema de extração

A moenda está regulada para uma moagem de 440 toneladas de cana por hora (tch), com fibra de 12,5% e velocidade de 7 rpm nos 1º e 2º ternos, e 6 rpm nos 3º, 4º, 5º e 6º ternos.

Utiliza-se o processo de embebição composta, sendo a água adicionada na base da esteira intermediária de bagaço do 6º terno. A quantidade de água adicionada no 6º terno é de 30 a 35% do peso da cana moída. A definição desse margem foi obtida experimentalmente. Abaixo de 30% notou-se um grande comprometimento no índice de extração da moenda, enquanto que para valores acima de 35% não houve ganho perceptível na extração, além do aumento do volume de água a ser eliminada nos processos posteriores, aumentando desnecessariamente o gasto de energia.

A usina não utiliza a separação dos caldos primário e misto, embora tenha a instalação preparada para isso. Os dois tipos de caldo são misturados, peneirados na peneira rotativa e seguem para o processo de clarificação.

Um bom funcionamento desse modelo de moenda (30" x 78") fornece uma extração média de 95%, com umidade do bagaço final em torno de 50%. Os índices da usina estão em: 97,3% para a extração e 51,4% para a umidade do bagaço final.

A usina conta com um sistema automatizado de controle das operações de alimentação, preparo e moagem da cana. Os principais pontos controlados são:

- Velocidade de alimentação das esteiras de cana 1 e 2.
- Alimentação de cana nos ternos, com sensores estão posicionados nas calhas Donnelly das esteiras intermediárias.
- Embebição no 6º terno, que atualmente não está funcionando, pois a usina tem gargalos em outros setores que limitam seu uso. Um exemplo é o que ocorre quando o setor de fabricação de açúcar não consegue gerar o volume necessário de condensado, forçando a diminuição da vazão de embebição.
- Velocidade das turbinas de acionamento dos ternos
- Intertravamento, em caso de falhas graves, para evitar uma progressão de falhas em cadeia.

O controle no setor de moagem tem um papel importante no desempenho da usina, pois as falhas que acarretam paradas da moenda ou diminuição da sua velocidade de moagem geram uma diminuição direta na produção.

O sistema de extração envolve a interação entre 2 fluxos de material em sentidos contrários:

- bagaço, originado dos esmagamentos sucessivos da cana ao longo do processo de extração;
- caldo misto, originado da recirculação do caldo extraído no 6º terno para os ternos anteriores, adicionado à água de embebição.

O modelo em rede de Petri representativo desse sistema é apresentado na figura 54. As entradas principais são os lugares "Cana desfibrada" e "Condensado contaminado da evaporação", e as saídas principais são as colocações de marca nos lugares "Caldo misto" para o sistema de clarificação, e "Bagaço final" para o sistema de geração de vapor.

A simulação do modelo mostra a evolução dos 2 fluxos ao longo do sistema, apresentando 6 caminhos possíveis (anexo F). Isso se deve à possibilidade da

transição “Homogeneização” poder ser disparada em paralelo a qualquer transição anterior à transição “Alimentação do 6º terno”.

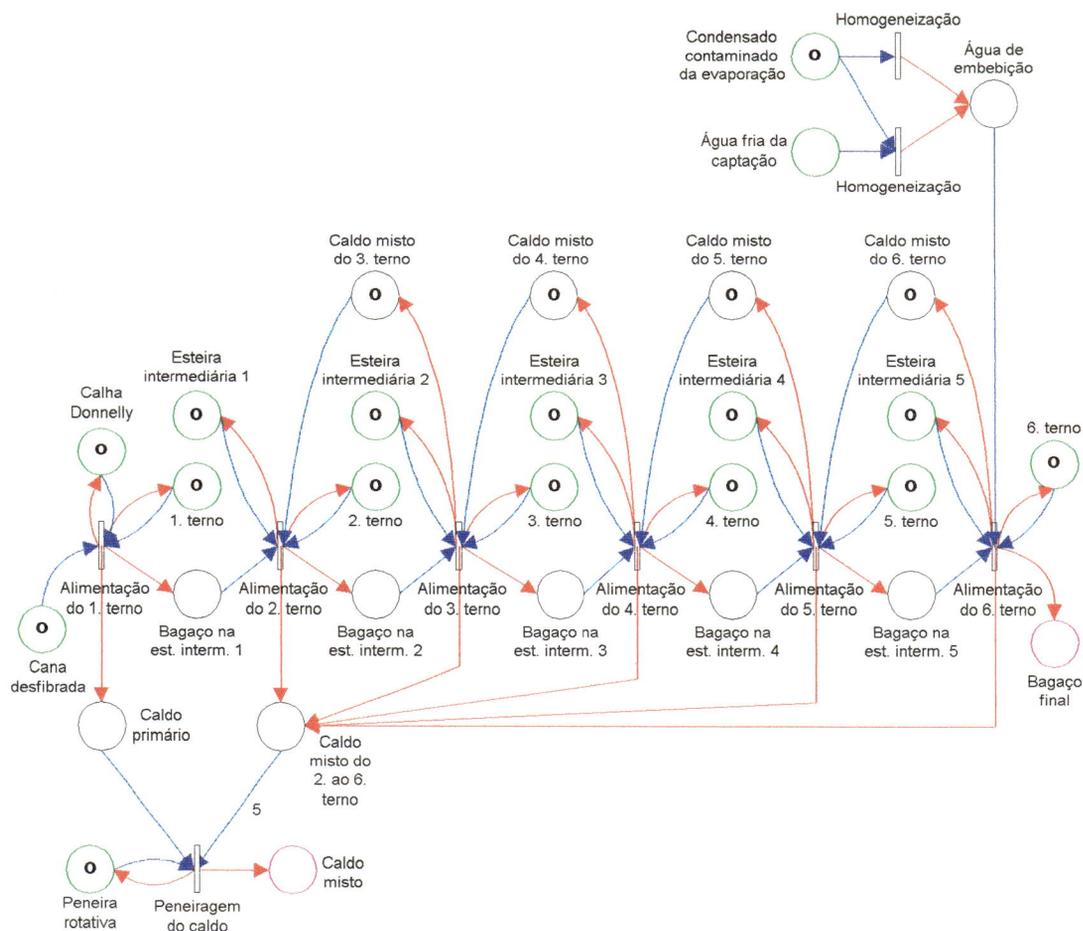


FIGURA 54 - Modelagem do sistema de extração

Nota-se no modelo que, apesar de não serem propriamente entradas, os lugares “Caldo misto do 3º terno”, “Caldo misto do 4º terno”, “Caldo misto do 5º terno” e “Caldo misto do 6º terno” devem conter marcas, pois são estados necessários para que as transições “Alimentação do 2º terno”, “Alimentação do 3º terno”, “Alimentação do 4º terno” e “Alimentação do 5º terno” sejam disparadas, porém são gerados anteriormente à passagem da cana desfibrada em questão.

O modelo apresenta a opção de se complementar a água de embebição com água fria da captação, porém é uma opção utilizada somente quando há insuficiência de condensado contaminado.

A principal variável do modelo da extração é a moenda, sendo seus atributos principais: velocidade de alimentação de cana, velocidade de alimentação entre os ternos, frequência e tempo de manutenção, custo de manutenção, vazão de água de embebição, vazão de caldo de embebição nos ternos, todos de natureza estocástica. A indicação de vazões como atributos importantes neste modelo mostra o caráter contínuo que caracteriza esta porção do sistema produtivo sucroalcooleiro, e que predomina por quase todo o processo industrial.

4.7. CLARIFICAÇÃO

O setor de clarificação trabalha com apenas um tipo de caldo, chamado genericamente de caldo misto, conforme pode ser observado na figura 55.

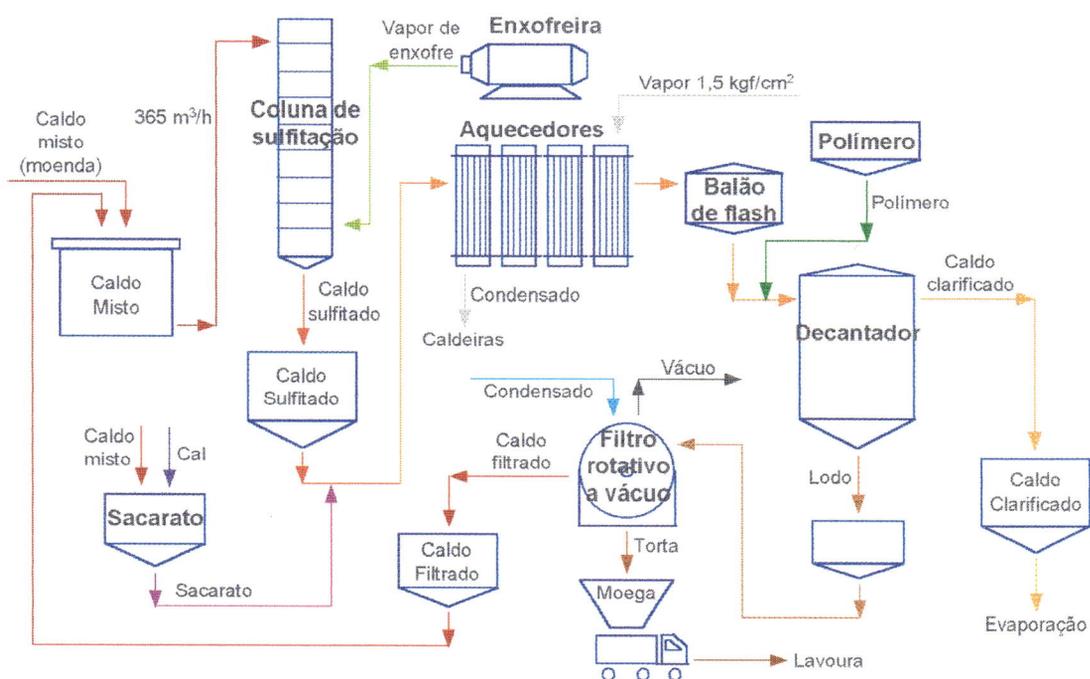


FIGURA 55 - Diagrama do sistema de clarificação

A sulfitação ocorre a uma temperatura entre 55 e 60°C, antes da adição de cal. Para o aquecimento do caldo existem dois conjuntos de aquecedores, um para cada tipo de caldo (açúcar e álcool). Cada conjunto possui um aquecedor de 280 m² de superfície de aquecimento e três de 310 m².

A adição de cal ao caldo é feita na forma de sacarato, através da mistura com xarope.

A decantação ocorre em três decantadores, sendo um de 800 m³ de capacidade, um de 600 m³ e outro de 450 m³. Podem processar tanto caldo para fabricação de açúcar quanto para fabricação de álcool. O tempo médio de retenção é de 3 h para o caldo para fabricação de açúcar e 3,5 h para o caldo para fabricação de álcool.

Atualmente são produzidos, em média, 300 m³/h de caldo clarificado para fabricação de açúcar e 200 m³/h para fabricação de álcool. A determinação das quantidades destinadas para a produção de açúcar e para a produção de álcool dependem da necessidade de produção, que varia ao longo da safra.

A separação da torta do lodo resultante da decantação é realizada por três filtros rotativos: um de 10'x 20' e dois de 13'x 26', num total de 278 m² de superfície de filtragem. A torta é aproveitada como fertilizante para a lavoura.

O modelo gerado apresenta as opções para obtenção de caldo clarificado para fabricação de açúcar e em caldo clarificado para fabricação de álcool (figura 56). Para ambas as opções, a simulação do modelo apresentou um único caminho (anexo G), o que é esperado, pois não existem atividades paralelas em nenhuma das opções no sistema real.

O compartilhamento dos recursos "Cal", "Aquecedor", "Balão de flash" e "Decantador" não é crítico, pois a usina possui equipamentos suficientes para manter 2 linhas de tratamento de caldo, uma para cada opção, funcionando paralelamente.

Uma importante saída secundária deste modelo é a colocação de uma marca no lugar "Torta", que representa a geração de torta, utilizada na adubação da lavoura.

O setor de clarificação do caldo tem aspectos contínuos e discretos. Os processos de sulfitação, calagem, aquecimento e desaeração são contínuos, onde a principal variável é a vazão do caldo em cada um dos processos, sendo, portanto, de caráter estocástico. O conjunto de aquecedores é a variável mais importante em relação à frequência e ao período de manutenção, que influem diretamente na redução da velocidade e/ou interrupção do processo de clarificação.

A decantação tem caráter discreto, sendo seus atributos principais: tempo de enchimento do decantador, tempo de decantação e tempo de esvaziamento,

todos de natureza estocástica, pois dependem da eficiência dos processos anteriores.

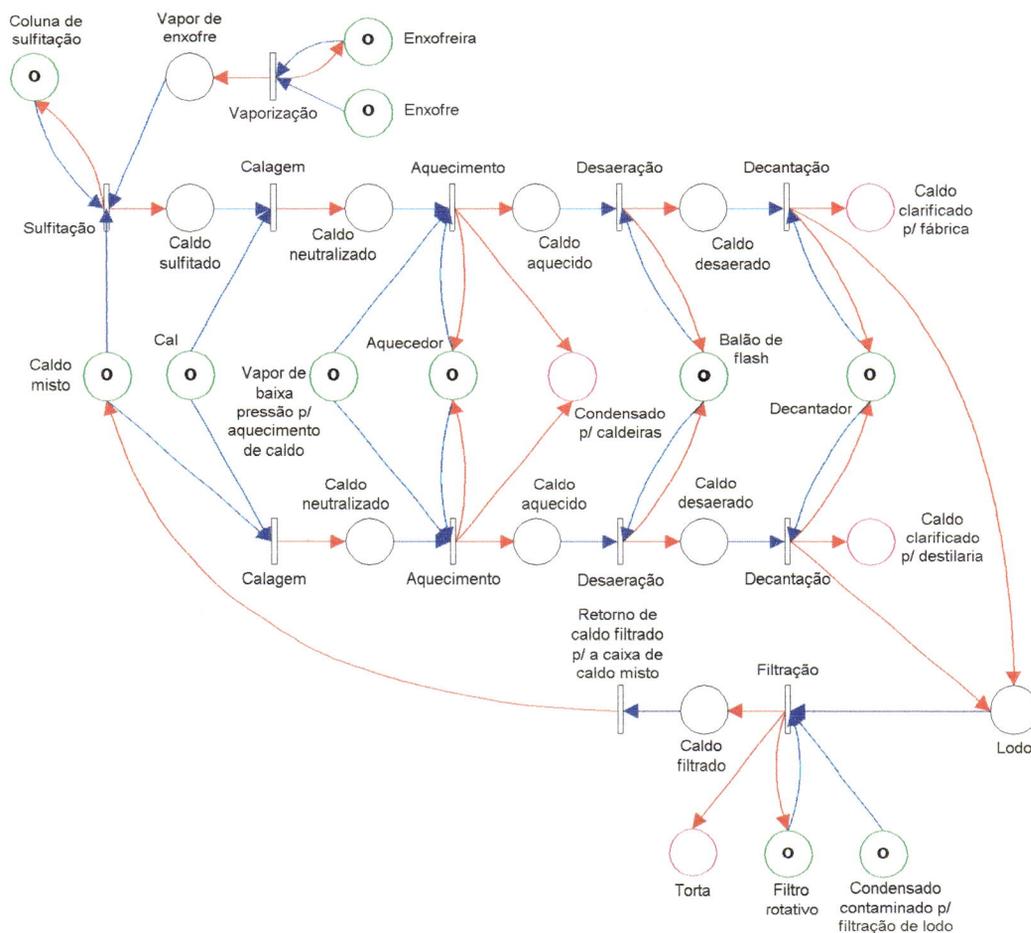


FIGURA 56 - Modelagem do sistema de clarificação

4.8. EVAPORAÇÃO

O processo de evaporação está ilustrado na figura 57.

Existem 2 conjuntos de evaporação. Atualmente um conjunto trabalha durante uma semana, enquanto o outro fica como reserva. O conjunto de evaporação que está parado sofre limpeza química dos tubos, que é necessária para um bom rendimento dos evaporadores. Para o 1º efeito, tem-se 3 evaporadores, sendo que quaisquer combinações 2 a 2 podem trabalhar em paralelo. São utilizados sempre 2 desses evaporadores para o 1º efeito. Esses

evaporadores tem 2200 m² de superfície de evaporação. Para o 2º, o 3º e o 4º efeitos utiliza-se evaporadores em série com, respectivamente, 2000, 1000 e 1450 m² de superfície de evaporação, para os dois conjuntos.

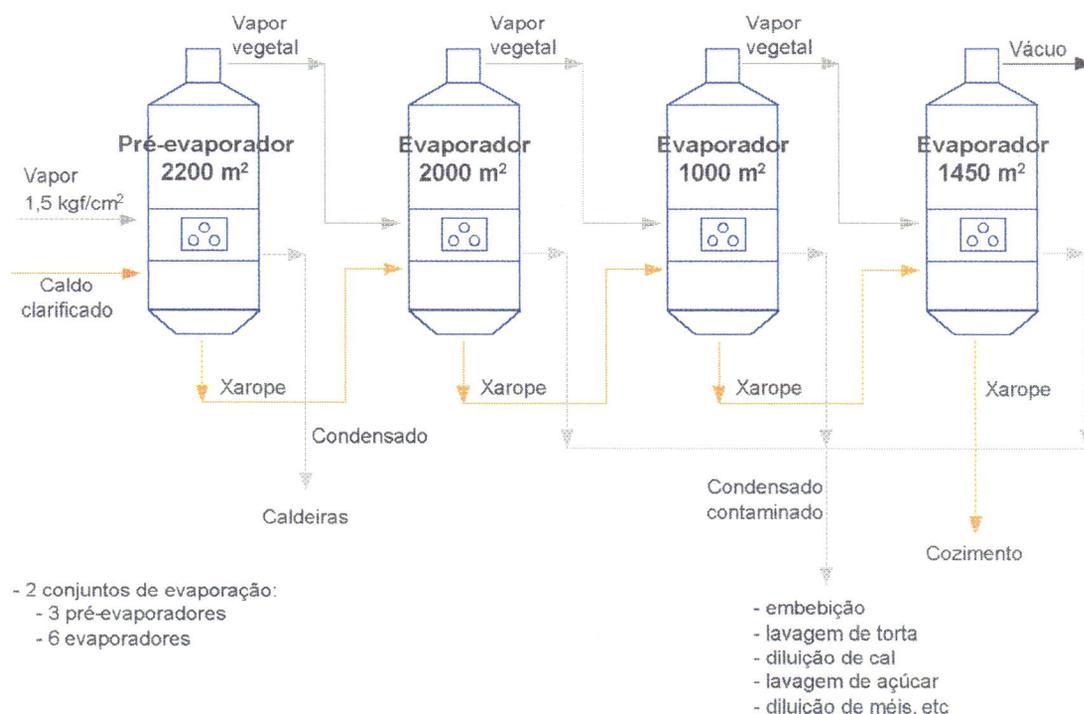


FIGURA 57 - Diagrama do sistema de evaporação

Na evaporação ocorrem 3 fluxos, sendo 2 concordantes e 1 em sentido contrário. O 1º é o do caldo transformando-se em xarope. O 2º é o do vapor de escape para os efeitos seguintes, tendo como saída a formação de condensado a cada efeito, que serve de entrada para diversos processos industriais. O fluxo em sentido contrário aos 2 primeiros é o do vácuo originado no 4º efeito, que se estende aos efeitos anteriores.

O modelo gerado para este sistema (figura 58) apresenta os fluxos descritos. Sua simulação apresentou 1 único caminho possível para se alcançar as saídas desejadas (anexo H), o que mostra a inexistência de atividades paralelas, como é esperado.

As marcas nos lugares “Vácuo do 2º efeito”, “Vácuo do 3º efeito” e “Vácuo do 4º efeito” não são propriamente entradas do modelo, mas estados intermediários necessários para o disparo das transições “Evaporação do pré-evaporador”,

“Evaporação do 2º efeito” e “Evaporação do 3º efeito”. Porém são geradas anteriormente à passagem do caldo clarificado em questão.

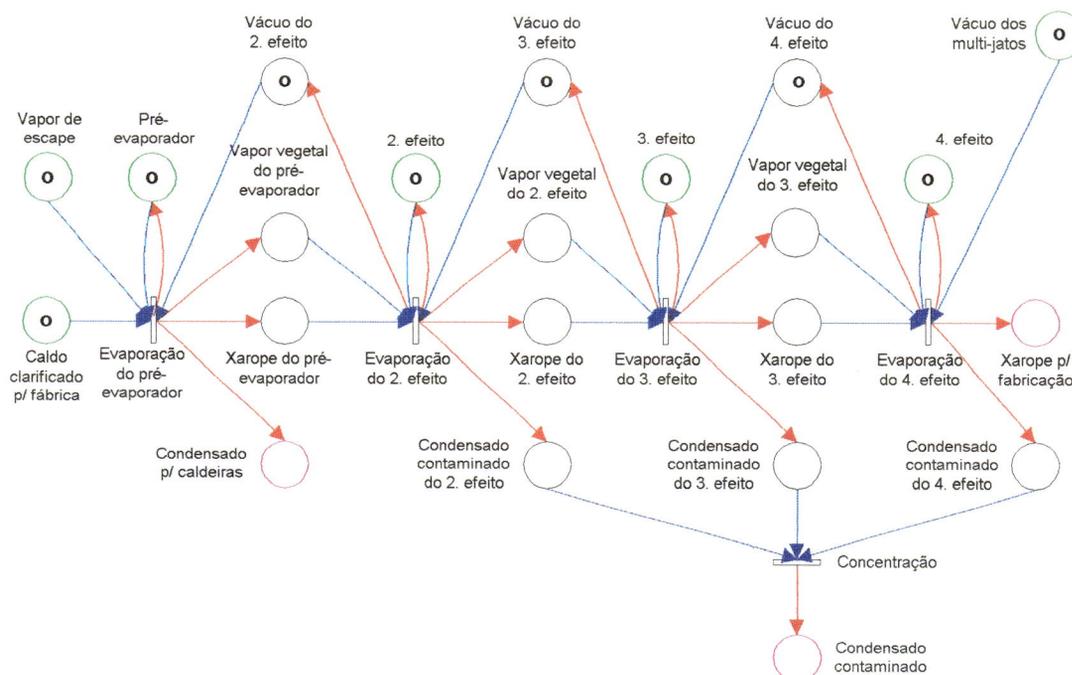


FIGURA 58 - Modelagem do sistema de evaporação

A evaporação é um processo essencialmente contínuo de transmissão de calor com mudança de fase. Logo, as variáveis principais em cada um dos evaporadores são os parâmetros relacionados ao fenômeno de transmissão de calor entre o caldo e o vapor: temperatura de entrada do caldo/vapor no evaporador, vazão do caldo/vapor no evaporador.

4.9. FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Para a produção de açúcar dos tipos 1 a 4 trabalha-se com o esquema de 3 massas, de acordo com a figura 59.

O primeiro cozimento, quando só existe xarope, é feito nos cozedores A, resultando açúcar de 1ª, que é o açúcar final, e mel A. O mel A inicialmente é utilizado para o cozimento nos cozedores de pé, que trabalham intermitentemente. Existem cinco cozedores para massa A, com capacidade de 500 HI cada. Os cozedores de pé são dois, com capacidade unitária de 250 HI.

chamada de massa A, é descarregada em turbinas descontínuas, onde é centrifugada, resultando no açúcar de 1ª e no mel A. O açúcar de 1ª é enviado para a secagem e posterior embalagem.

No caso da produção de açúcar refinado (cor 45), o açúcar de 1ª é enviado para a refinaria. O mel A vai alimentar o cozedor B.

Na refinaria o açúcar passa por um processo de diluição e filtração, gerando a calda, que é a matéria-prima para a obtenção do açúcar refinado, sendo enviada, juntamente com uma porção de semente, para um cozedor R, equipado com um agitador mecânico, que aumenta seu rendimento. Sua capacidade é de 500 HI.

Após o cozimento, a massa resultante é enviada para turbinas descontínuas, onde é centrifugada, resultando no açúcar refinado e no mel R. O açúcar refinado é enviado para a secagem e posterior embalagem. O mel R pode ser misturado novamente no tanque de calda ou enviado para um tanque de diluição para ser adicionado ao xarope que vai alimentar os cozedores A.

O sistema de fabricação de açúcar está modelado na figura 60, que apresenta como entrada principal o lugar "Xarope diluído" e tem como saídas principais as colocações de marcas nos lugares "Açúcar tipo 1", "Açúcar tipo 2 / 3", "Açúcar tipo 4" e "Açúcar refinado".

Foram feitas 4 simulações, 1 para cada tipo de açúcar (anexo I). Em cada simulação foram encontrados 5 caminhos possíveis, devido ao fato que, após o disparo da transição "Geração de pé de cozimento", a transição "Cozimento / turbinagem de massa C" fica habilitada para poder disparar em paralelo a quaisquer outras transições da seqüência iniciada pela transição "Cozimento / turbinagem de massa B".

Uma saída secundária importante deste modelo é o lugar "Melaço", representando o resíduo da fabricação de açúcar que serve como matéria-prima para a fabricação de álcool.

As marcas nos lugares "Mel A" e "Mel B" não são entradas do modelo, mas um estados intermediários necessários para o disparo das transições "Cozimento / turbinagem de massa B" e "Cozimento / turbinagem de massa C", respectivamente. Porém, são geradas anteriormente à passagem pelo sistema do xarope diluído em questão.

Apesar da complexidade, este setor possui etapas que podem ser caracterizadas como discretas e contínuas. As atividades discretas são:

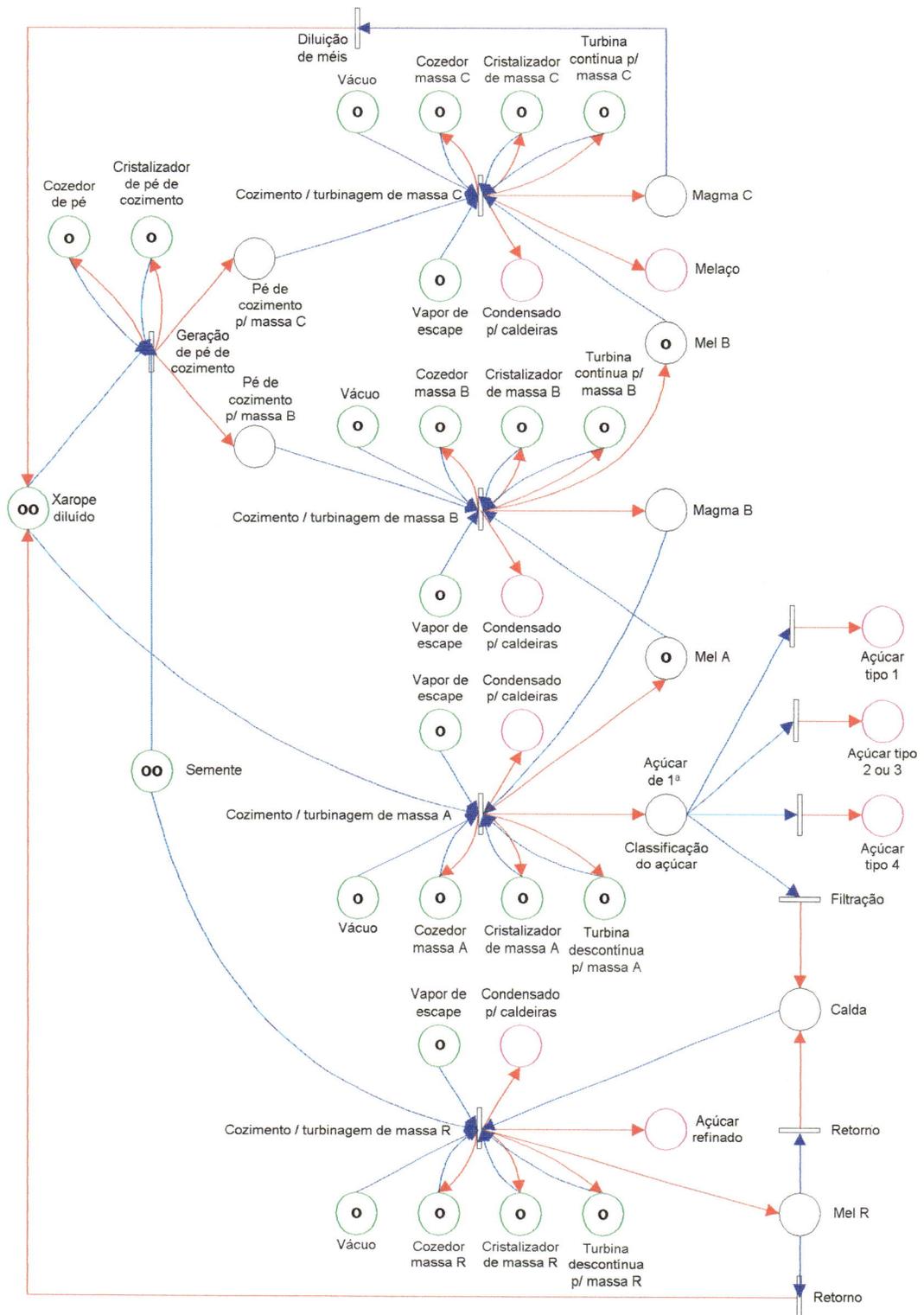


FIGURA 60 - Modelagem do sistema de fabricação de açúcar

- cozimento nos cozedores verticais, em que o tempo de cozimento e a carga por cozimento são seus principais atributos, ambos de caráter estocástico;
- turbinagem nas turbinas descontínuas, cujos atributos principais são o tempo de ciclo, que pode ser considerado determinístico por ser programável; e a quantidade de açúcar produzido por ciclo de turbinagem, com caráter estocástico, por depender do rendimento do ciclo.

As atividades com característica contínua são:

- cozimento nos cozedores horizontais, onde os atributos principais são as vazões de entrada e de saída de xarope dos cozedores.
- turbinagem nas turbinas contínuas, sendo a vazão de entrada e de saída de massa cozida nas turbinas os atributos principais.

4.10. FERMENTAÇÃO

O sistema de fermentação utilizada é o contínuo (figura 61), com 4 dornas em série, sendo que a 4ª funciona somente como uma doma volante auxiliar. A fermentação propriamente dita ocorre nas 3 primeiras dornas. São utilizados 9 resfriadores nas 1ª e 2ª dornas, sendo que a temperatura média de fermentação é de 34°.

O modelo representativo do sistema de fermentação é apresentado na figura 62. As entradas principais são os lugares “Caldo clarificado p/ destilaria” e “Melaço”, representando as matérias-primas utilizadas neste processo. A saída principal é a colocação de uma marca no lugar “Vinho de levedurado armazenado”.

O modelo mostra a opção de se efetuar a fermentação somente com melaço, utilizada quando necessita-se de uma alta produção de açúcar, sendo todo o caldo clarificado enviado para o processo de fabricação de açúcar. A simulação foi executada para as 2 opções (anexo J), sendo encontrado um único caminho para cada, em função da inexistência de atividades paralelas.

Uma saída e uma entrada secundária importantes são o lugar “Leite de levedura” e o lugar “Leite de levedura da centrifugação”. Estes 2 lugares são, respectivamente, entrada principal e saída principal do modelo do tratamento de levedura apresentado a seguir.

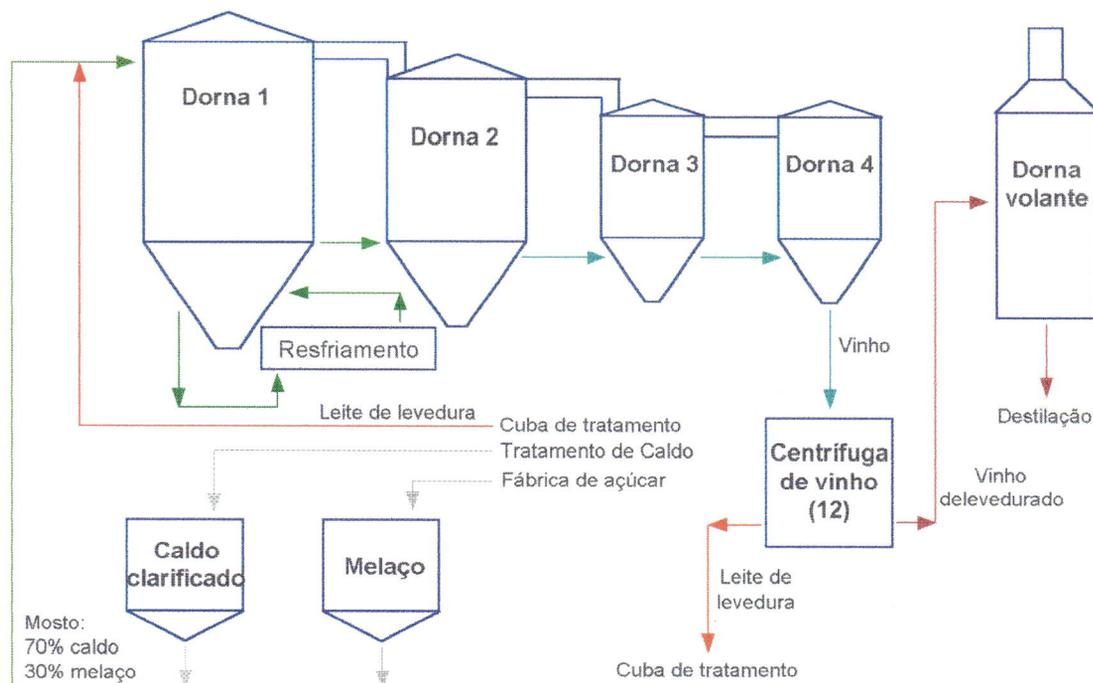


FIGURA 61 - Diagrama do sistema de fermentação contínua

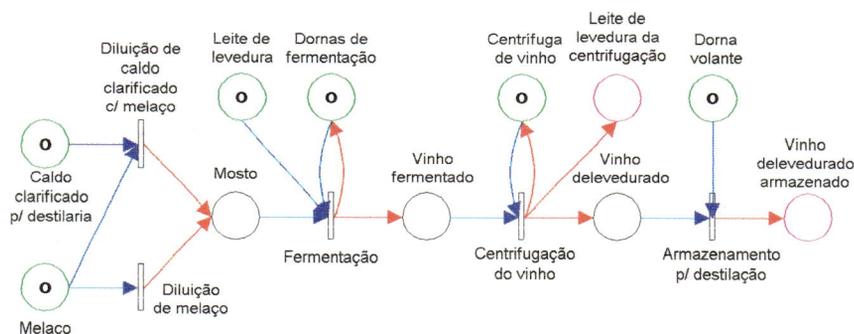


FIGURA 62 - Modelagem do sistema de fermentação

A fermentação é um processo com característica tipicamente contínua, onde as principais variáveis são:

- dornas de fermentação, cujos atributos principais são a vazão de entrada de mosto e o tempo de permanência do mosto em cada dorna.
- dorna volante, onde o principal atributo é a capacidade de armazenagem de vinho.

própria renovação, melhorando o rendimento da fermentação. Uma multiplicação excessiva, no entanto, cria uma superpopulação, o que aumenta a competição entre as células, podendo comprometer o desempenho do processo. Nesse ponto, é necessário retirar quantidades de levedura do processo, para manter o equilíbrio da população. Isso é feito através da secagem de levedura.

O processo de secagem de levedura inicia-se na derivação da tubulação que leva o leite de fermento turbinado até a 1ª cuba de tratamento, desviando parte da levedura para a secagem. Esse leite desviado é enviado até um revitalizador, que é um tanque onde o leite é recolhido com cerca de 80% de levedura e a 34°C aproximadamente. É diluído a uma concentração próxima de 40% de levedura e resfriado a cerca de 33°C. Do revitalizador o leite passa por um trocador de calor, onde é aquecido a 44°C aproximadamente, e segue para uma cuba de tratamento térmico. Dessa cuba é enviado para uma coluna de destilação simples, onde parte do álcool contido no leite é vaporizado, condensado e enviado para a dorna volante. O creme resultante, com 40% de levedura, é enviado para uma centrifugação, na qual água e álcool são separados da levedura. A água e o álcool são enviados para a dorna volante, e a levedura segue para os secadores de levedura, com uma concentração de 80%. O secador tem como função diminuir a umidade da levedura, através do seu aquecimento a cerca de 200°C. O secador funciona analogamente ao filtro rotativo a vácuo, porém a secagem ocorre em função da alta temperatura do equipamento.

O sistema de tratamento de levedura é modelado na figura 64. A entrada principal é o lugar "Leite de levedura da centrifugação", e as saídas principais são os lugares "Leite de levedura tratado" e "Levedura seca".

O modelo gerado apresenta as 2 opções: tratamento sem secagem de levedura e tratamento com secagem de levedura.

A simulação para tratamento sem secagem apresentou um único caminho (anexo K), mostrando que para esta opção não há ocorrência de atividades paralelas.

Para a opção de tratamento com secagem, a simulação apresentou 9 caminhos possíveis. Isso se deve ao fato de que o disparo da transição "Tratamento de levedura com secagem" habilita 2 transições, "Desfloculação" e "Tratamento para secagem", que iniciam 2 seqüências paralelas de atividades, num total de 9 combinações possíveis.

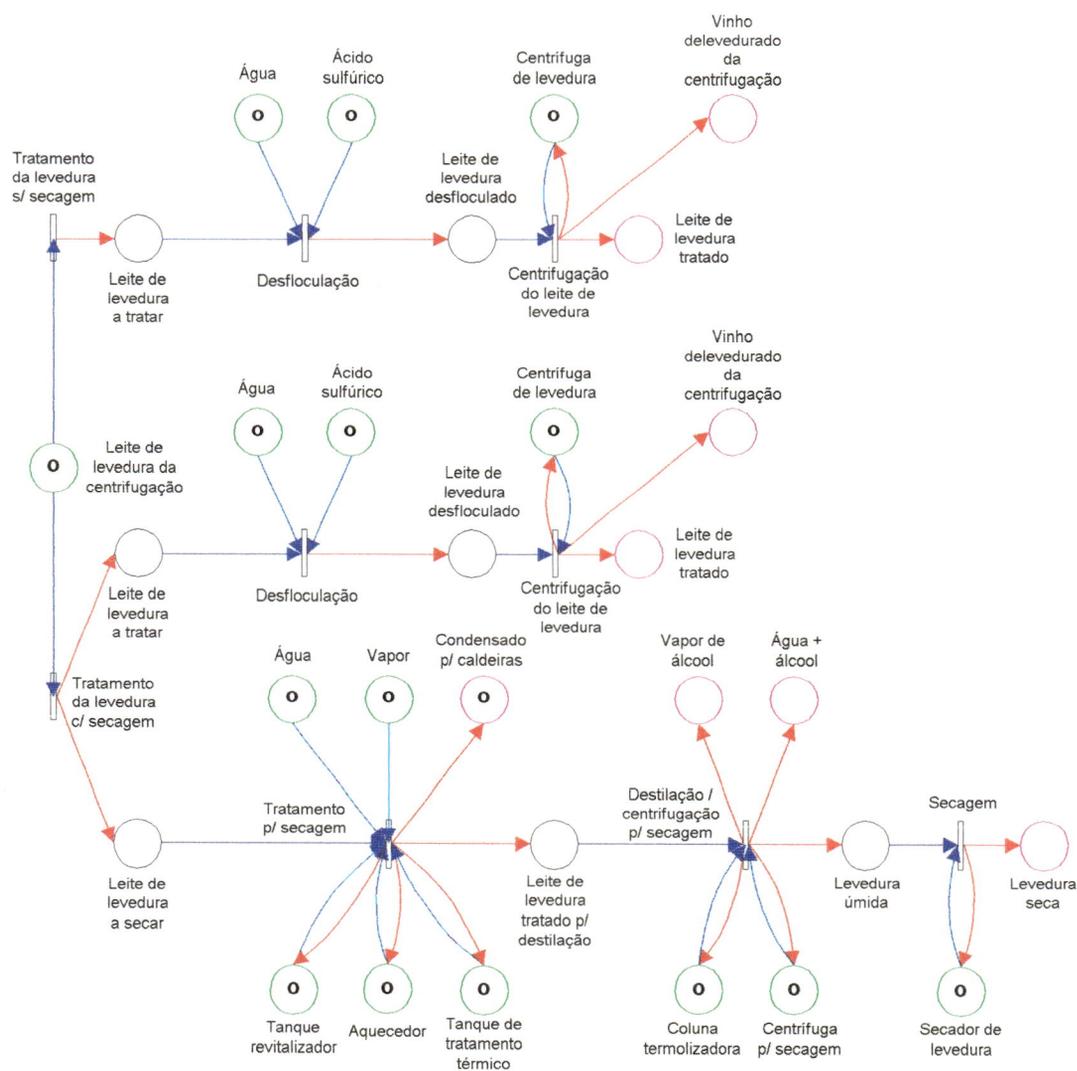


FIGURA 64 - Modelagem do sistema de tratamento de levedura

As demais saídas são secundárias: “Vinho de levedurado da centrifugação”, que retorna vinho para o estoque anterior à destilação; “Vapor de álcool” e “Água + álcool”, que retomam água e álcool para as colunas de destilação.

As atividades do tratamento de levedura são contínuas. As principais variáveis a serem caracterizadas são as vazões do leite de levedura nas diversas etapas do setor.

4.12. DESTILAÇÃO

O processo de destilação do vinho é apresentado na figura 65.

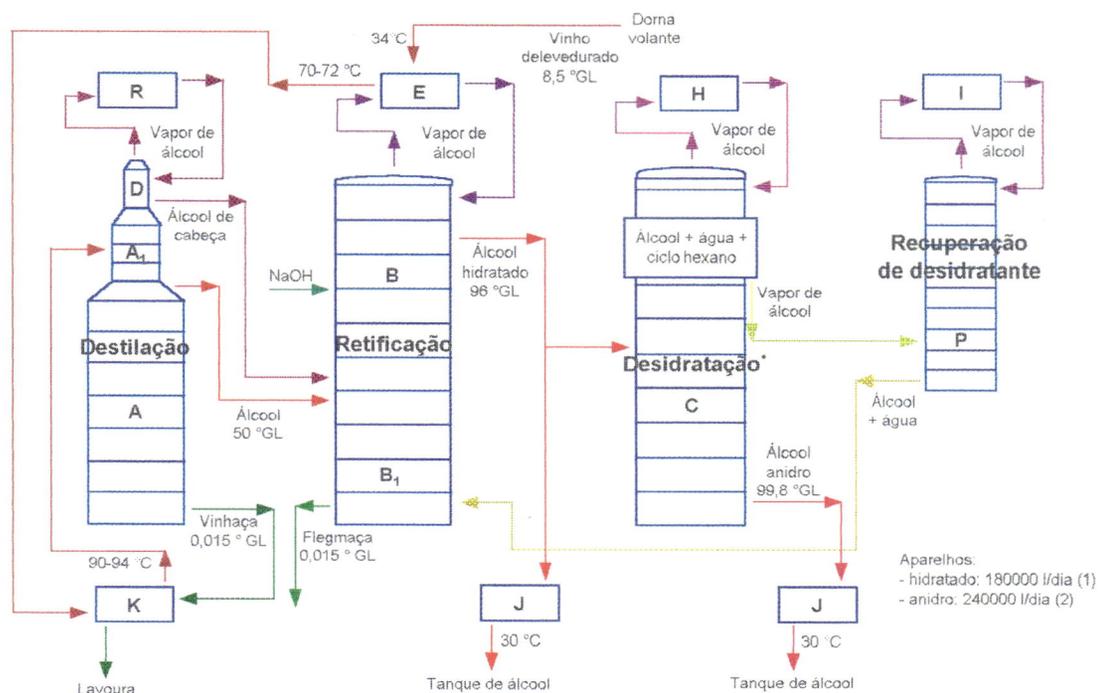


FIGURA 65 - Diagrama do sistema de destilação

O vinho inicialmente passa no condensador E, onde é aquecido através da troca de calor com o vapor de álcool da coluna B, atingindo temperaturas entre 70 e 72°C. Após o condensador E, o vinho passa pelos trocadores de calor K, onde troca calor com a vinhaça e aumenta sua temperatura para 90 a 94°C. A vinhaça é retirada pela base da coluna com aproximadamente 110°C e 0,015°GL na entrada dos trocadores K, saindo com 90°C.

A destilação do vinho inicia-se na coluna de destilação, composta pelas colunas A, A1 e D. Inicialmente, o vinho entra pela coluna A1, para o processo de epuração. Parte do vinho desce para a coluna A, onde sofre a destilação propriamente dita. A parte gasosa, composta por vapor de álcool de cabeça e impurezas, sobe para a coluna D, responsável pela concentração do álcool de cabeça. Essa concentração acontece com a condensação do vapor de álcool através da troca de calor nos condensadores R e R1, que utilizam água para o resfriamento. No condensador R1 existe uma saída de gás para a atmosfera para a degasagem da coluna de destilação.

O álcool de cabeça, juntamente com o flegma obtido na coluna A (50°GL), entram na porção central da coluna de retificação, composta pelas colunas B e B1.

Na coluna B ocorre o processo de retificação do álcool, com a adição de hidróxido de sódio, que tem a função de neutralizar o pH do meio e controlar a condutividade, obtendo-se o álcool hidratado, com 96°GL. O vapor desse álcool sobe para a ponta da coluna, onde é condensado nos condensadores E, E1 e E2, através da troca de calor com a água, e retorna para a coluna. No condensador E2 existe uma saída de gás para a atmosfera para a degasagem da coluna de retificação. A flegmaça é retirada pela base da coluna, com temperatura de 110°C e 0,015°GL, retornando para a dorna volante.

O álcool retificado ou hidratado é retirado pelo topo da coluna B e é enviado para os tanques de armazenamento, passando antes pelos resfriadores J para diminuir sua temperatura para 30°C, que é conveniente para a armazenagem.

Para a obtenção do álcool anidro, o álcool hidratado passa pela coluna C. O desidratante utilizado é o ciclo-hexano, que vem sendo adotado mais recentemente em substituição ao benzol, por apresentar baixa toxicidade em relação a este último, com a mesma eficiência de desidratação. Essa mistura permite a desidratação do álcool hidratado, pois o ciclo-hexano é muito volátil e adere à estrutura da água, separando-a do álcool.

A mistura ternária, agora rica em água e ciclo-hexano, sobe para o decantador de ciclo-hexano, na cabeça da coluna C. Parte dessa mistura em forma de vapor sobe para a ponta da coluna, onde é condensado nos condensadores H, H1 e H2, através da troca de calor com a água, e retorna para a coluna C.

A maior parte do ciclo-hexano é decantada na parte superior do decantador, retornando ao processo. Os vapores acumulados na parte inferior do decantador são enviados para a coluna P para a separação e recuperação do ciclo-hexano que, sendo mais volátil, sobe para a cabeça da coluna e é condensado nos condensadores I e I1, através da troca de calor com a água, e retorna para a cabeça da coluna C. A água e o álcool separados, com temperatura de 100°C, são retirados pela base da coluna e enviados para a coluna B1.

O álcool anidro é retirado na base da coluna C, com aproximadamente 99,8°GL e 87°C, e passa pelos resfriadores J para diminuir a temperatura para 30°C e poder ser armazenado em condições convenientes.

No condensador I1 existe uma saída de gás para a atmosfera para a degasagem das colunas C e P.

Toda a água utilizada nos regeneradores e no resfriamento das dornas é resfriada nas torres de resfriamento, estruturas retangulares adaptadas com uma

hélice central, que funciona como um ventilador, resfriando a água que entra lateralmente pela caixa. A vinhaça também passa por torres de resfriamento antes de ser enviada para a lavoura.

O conjunto de processos do sistema de destilação é modelado na figura 66. A entrada principal é o lugar "Vinho de levedurado". As saídas principais são as colocações de marca nos lugares "Álcool hidratado", representando a produção de álcool hidratado, e "Álcool anidro", representando a produção de álcool anidro.

O modelo foi simulado para as 2 opções (anexo L). Na opção de fabricação de álcool hidratado foi encontrado somente 1 caminho, significando que não há atividades paralelas nesta opção. Para a opção de fabricação de álcool anidro encontrou-se 3 caminhos possíveis. Isso se deve ao fato de que, após o disparo da transição "Decantação", ficam habilitadas as transições "Recuperação de ciclo-hexano" e "Condensação nos condensadores H", gerando 2 seqüências paralelas de atividades. Os caminhos encontrados denotam todas as possibilidades deste paralelismo.

As saídas secundárias importantes do modelo são:

- "Vinhaça, representando a produção de vinhaça utilizada na fertirrigação.
- "Impurezas", representando a produção de resíduos tais como o óleo fúsel.

Neste modelo utilizou-se lugares auxiliares para o controle de algumas seqüências de disparo. São eles:

- "Controle de seqüência na coluna de destilação": assegura que a transição "Retificação" dispare após o disparo da transição "Condensação nos condensadores R" que finaliza o processo na coluna de destilação;
- "Controle de seqüência na coluna de retificação": assegura que as transições "Armazenagem" ou "Desidratação" disparem após o disparo da transição "Condensação nos condensadores E1 / E2" que finaliza o processo na coluna de retificação;
- "Controle de seqüência na coluna de desidratação": assegura que a transição "Armazenagem" dispare após o disparo das transições "Condensação nos condensadores H" e "Condensação nos condensadores I" que finalizam o processo na coluna de destilação e na coluna de recuperação de ciclo-hexano, respectivamente.

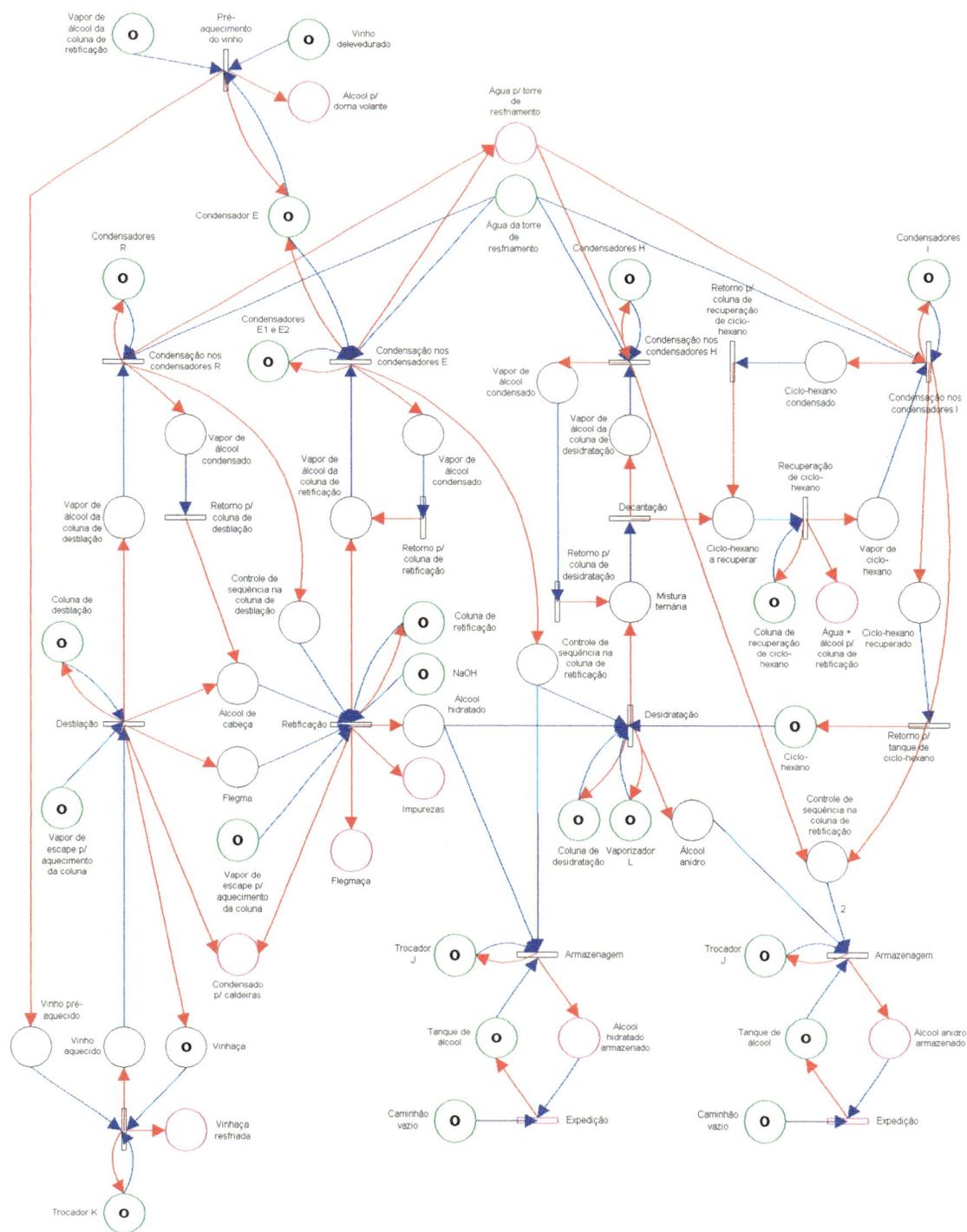


FIGURA 66 - Modelagem do sistema de destilação

Este setor é altamente complexo, como pode ser observado pela modelagem apresentada, onde diversas variáveis devem ser caracterizadas para a

compreensão do processo de destilação, bem como as equações que as relacionam.

4.13. ARMAZENAGEM E EXPEDIÇÃO

O armazenamento de açúcar utiliza dois secadores, com capacidades nominais diárias de 15000 e 5000 sacos de 50 kg. Cada secador inicia uma linha independente de ensaque. O secador maior, de 15000 sacos diários, faz a secagem de açúcar dos tipos 2, 3 e 4. Esses tipos de açúcar são ensacados em "big-bag", ou podem ser estocados no silo ou em um dos 4 armazéns reservado para açúcar a granel (tipo 4) (figura 67).

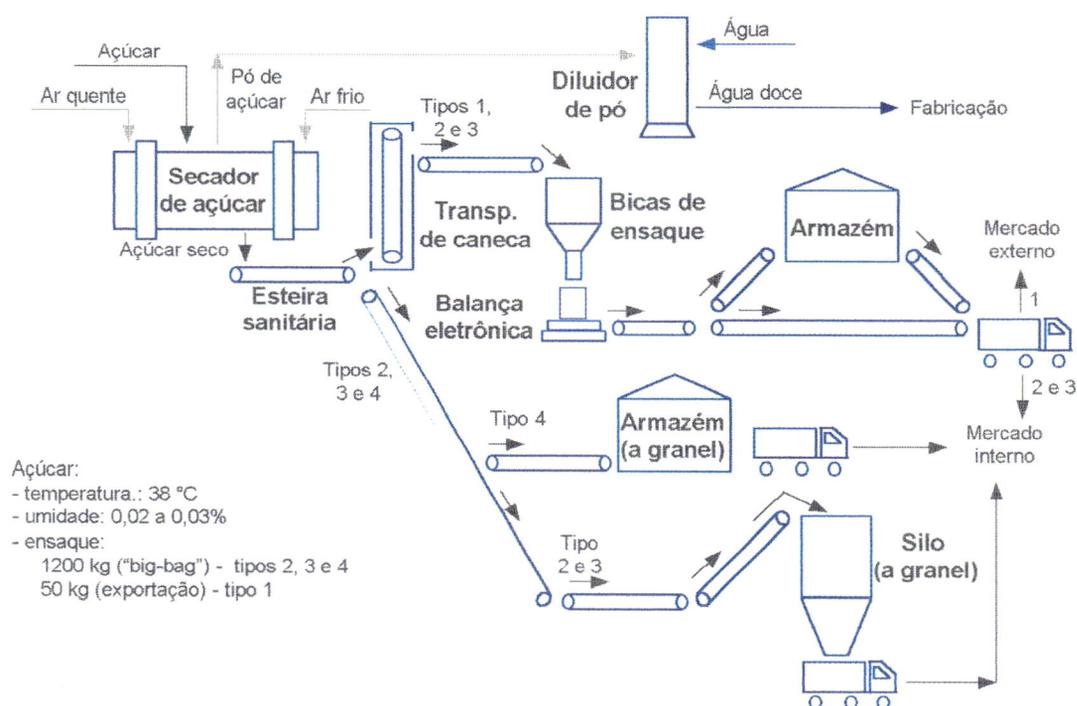


FIGURA 67 - Diagrama do sistema de armazenagem dos açúcares tipos 2, 3 e 4

O açúcar tipo 1 para exportação é ensacado em sacos de 50 kg (figura 68).

A produção diária é de 5000 sacos de açúcar tipo 1 e 12000 sacos de açúcar dos tipos 2, 3 e 4. A capacidade total de armazenamento é de 416000 sacos de 50 kg.

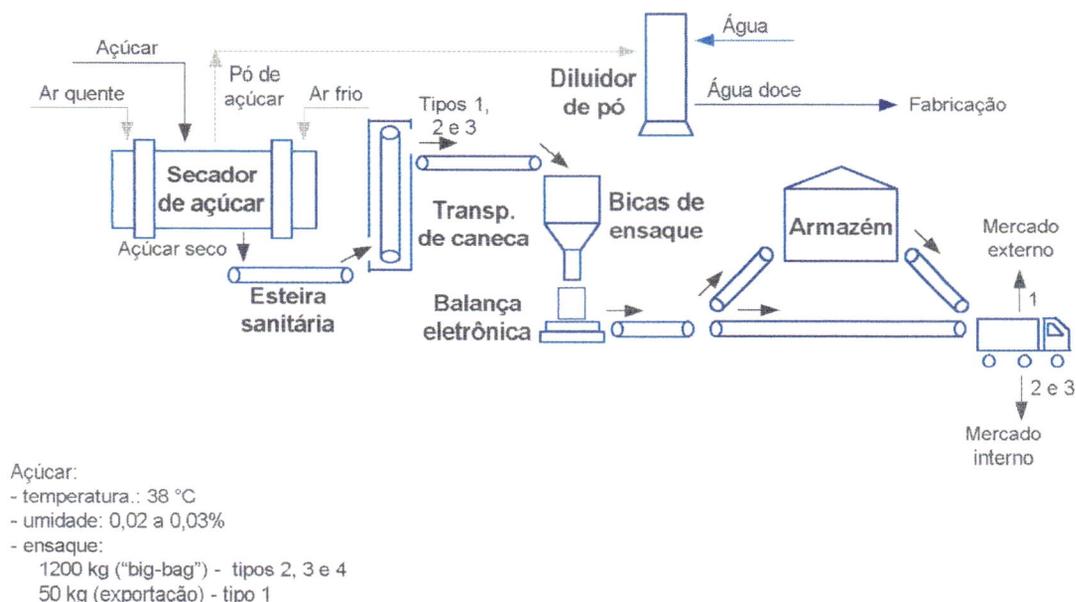


FIGURA 68 - Diagrama do sistema de armazenamento do açúcar tipo 1

Existe um controle estatístico do processo de ensaque, onde o peso dos sacos de 50 kg é controlado numa faixa de 50,200 a 50,260 kg (incluindo a sacaria), definida pela COPERSUCAR. Esse controle fornece uma garantia de 99,7% de que os sacos estão dentro da faixa permitida, além de poder rastrear as origens e causas de algum lote que não esteja enquadrado dentro da especificação. Tal controle existe principalmente em função das exigências para exportação.

Para o armazenamento de álcool, a usina possui 12 tanques, sendo 8 com capacidade para 5 milhões de litros, e 4 para 10 milhões, num total de 80 milhões de litros.

O armazenamento do álcool é feito em tanques cilíndricos, através de bombeamento contínuo. Um registrador magnético mede a quantidade armazenada.

O álcool é um combustível extremamente volátil, e ocorrem perdas consideráveis, por evaporação nos tanques. Essa perda é medida, e está em torno de 110 l/dia.

Todo o álcool produzido (hidratado e anidro) é voltado para o mercado interno.

O sistema de armazenamento e expedição finaliza o sistema de fabricação de açúcar, transformando o açúcar úmido em açúcar ensacado ou armazenado e

daí para a expedição para o respectivo mercado. Os tipos de açúcar, em relação ao armazenamento e expedição, podem ser reunidos em 3 grupos:

- açúcar tipo 1 e refinado: para este tipos de açúcar, o ensaque é realizado em sacos de 50 kg, podendo ser armazenados em armazém ou carregados diretamente nos caminhões para a expedição;
- açúcar tipo 2 e 3: neste caso, o ensaque é realizado em sacos de 1200 kg (big-bag), com a possibilidade de serem armazenados em armazém ou carregados diretamente nos caminhões para a expedição; existe também a opção do armazenamento a granel em silo;
- açúcar tipo 4: armazenado a granel em armazém.

O modelo representativo deste sistema apresenta como entradas principais os 3 grupos de tipos de açúcar (figura 69). A saída é o disparo da transição “Expedição”, que representa a expedição do açúcar.

A simulação do modelo apresentou os 6 caminhos possíveis discutidos acima (anexo M), não ocorrendo paralelismo de atividades.

O compartilhamento dos recursos “Secador de açúcar”, “Transportador de açúcar”, “Balança eletrônica”, “Esteira de açúcar”, “Armazém” e “Caminhão vazio” não é crítico, pois a usina possui equipamentos em número suficiente para manter em funcionamento 2 linhas de secagem e ensaque.

A armazenagem e expedição possui características híbridas. A porção contínua do modelo é representada pelo açúcar a granel, sendo seu atributo principal a velocidade de transporte nas diversas esteiras de armazenagem, até a armazenagem ou o ensaque.

O enfoque discreto pode ser utilizado na caracterização do açúcar ensacado. Seus principais atributos são o peso por saco e a velocidade de deslocamento nas esteiras de armazenagem.

Uma caracterização também importante é o arranjo físico das esteiras de armazenagem, que podem suprir os armazéns ou abastecer os caminhões, ou as 2 alternativas ao mesmo tempo.

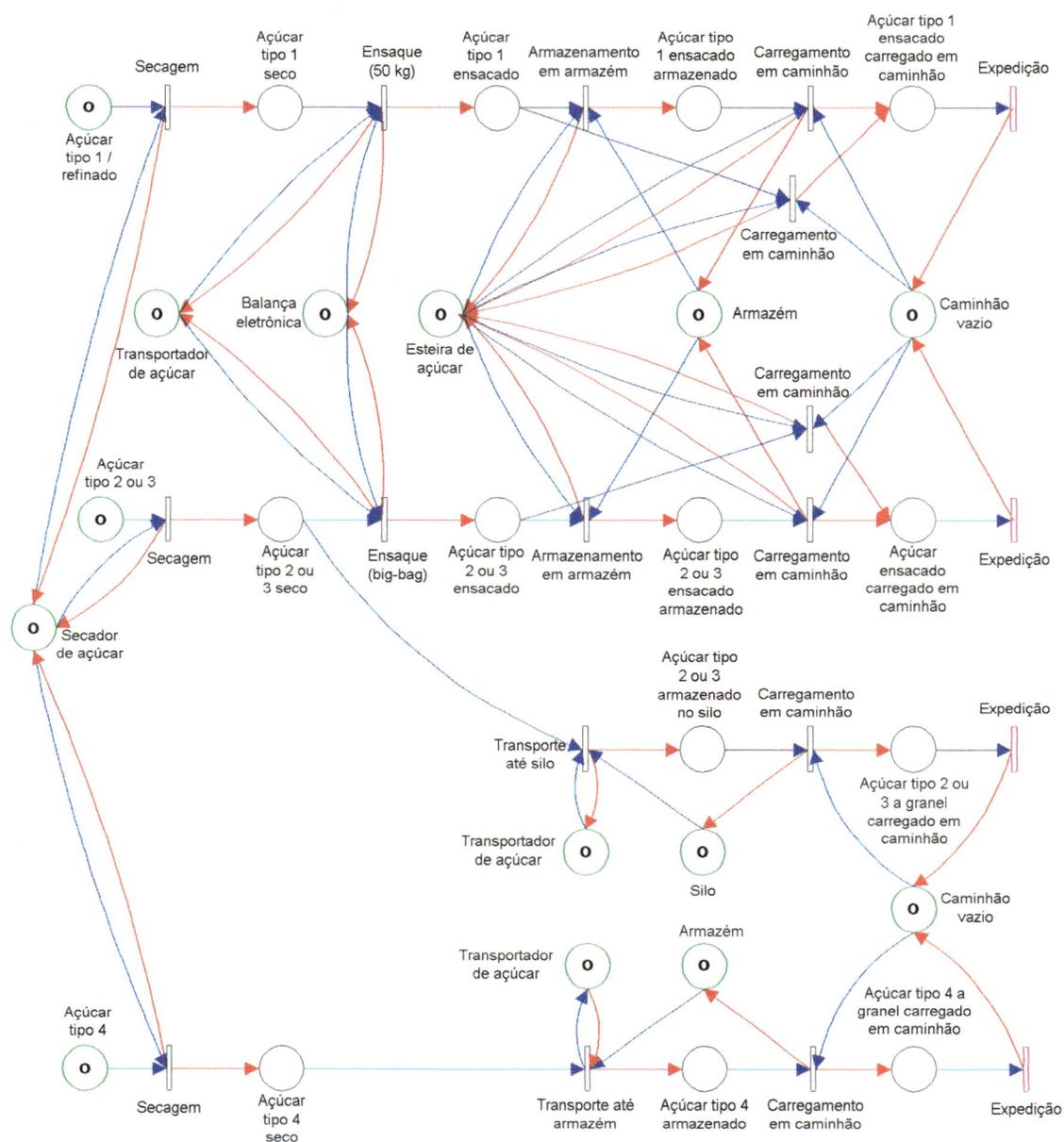


FIGURA 69 - Modelagem do sistema de armazenamento e expedição

4.14. GERAÇÃO DE VAPOR

A geração de vapor do sistema analisado é realizada por 4 caldeiras, com as seguintes características:

- caldeira 1: capacidade de produção 80 toneladas por hora (t/h) a 320°C e 21 kgf/cm², com 80% de eficiência no aproveitamento da energia potencial do bagaço, com consumo de 2,1 toneladas de vapor por tonelada de bagaço.
- caldeiras 3 e 4: capacidade de 50 t/h a 285°C e 21 kgf/cm², com 80% de eficiência e consumo de 2,1.
- caldeira 5: capacidade de 80 t/h a 300°C e 21 kgf/cm², com 80% de eficiência e consumo de 2,1. É a única caldeira que possui economizador.

A geração de vapor pode ser representada pela figura 70.

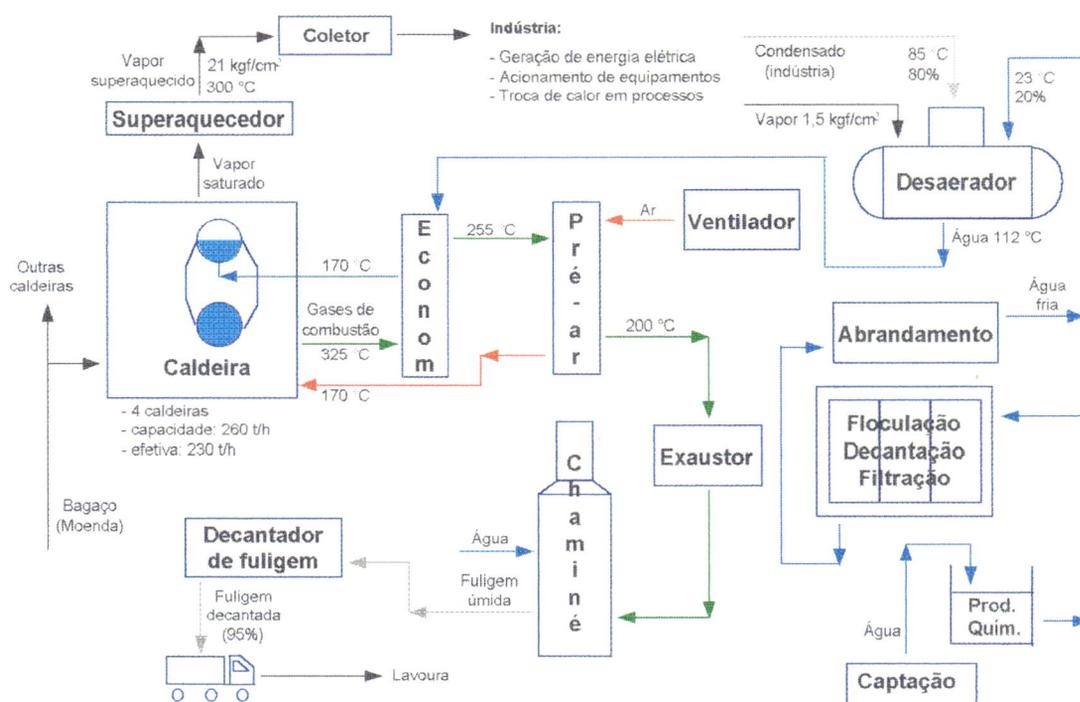


FIGURA 70 - Diagrama do sistema de geração de vapor

Portanto, a usina possui uma capacidade total de geração de vapor de 260 t/h. Atualmente utiliza 230 t/h. A linha de vapor possui duas reduções de pressão: 21 para 15 kgf/cm² e 21 para 1,5 kgf/cm².

Para a alimentação das caldeiras, a relação é de 80% de condensado e 20% de água fria. O consumo de água nas caldeiras é de cerca de 234 t/h, sendo 230 utilizados na produção de vapor e 4 nas descargas contínuas e de fundo, utilizados para a limpeza periódica das caldeiras.

A água fria a ser adicionada ao condensado para realimentação das caldeiras passa por um tratamento para separação de matéria orgânica. Esse

tratamento é feito através de: floculação, que é a formação de “flocos” contendo matéria orgânica através de tratamento químico; decantação desses flocos; e filtração com pedregulho, areia e carvão. Em alguns casos onde a água é muito mineralizada ela deve passar por um processo de abrandamento, que separa mais matéria orgânica, além de diminuir a dureza. Normalmente são utilizados filtros a carvão e abrandadores a resina.

O bagaço deve ser distribuído de uma maneira uniforme entre os alimentadores de bagaço em cada caldeira. Para isso, conta-se com um conjunto de esteiras que fazem a circulação do mesmo entre as caldeiras, além de enviar o excedente para o armazém de bagaço ou mesmo para recircular entre as caldeiras.

O sistema de lavagem de gases da combustão consiste na injeção de água na base do chaminé, a fim de se reter a fuligem da combustão. Essa mistura de água e fuligem é direcionada para um decantador de fuligem, que é um tanque onde parte da água é recuperada e a fuligem úmida decantada é carregada, por caminhões, até a lavoura.

Produz-se, em média, 70 toneladas de fuligem, com umidade entre 50 e 60%. O sistema de lavagem de gases tem eficiência de 95% na retenção de fuligem.

O sistema de geração de vapor tem como entradas principais são os lugares “Bagaço”, “Condensado”, “Água fria tratada” e “Ar ambiente”. A saída principal é a colocação de uma marca nos lugares “Vapor de alta pressão p/ geração elétrica”, “Vapor de alta pressão p/ turbinas a vapor”, “Vapor de alta pressão p/ redução de pressão” e “Vapor de alta pressão p/ desaeração”. O modelo do sistema é apresentado na figura 71.

A simulação apresentou 6 caminhos possíveis (anexo N). Isso ocorre em função da existência de algumas 2 seqüências paralelas de atividades geradas pelo disparo da transição “Pré-aquecimento do ar p/ combustão”, que habilita as transições “Geração de vapor” e “Exaustão dos gases de combustão”, dando origem a 2 seqüências de atividades paralelas. Os 6 caminhos possíveis representam todas as combinações possíveis de seqüência de disparo em função deste paralelismo.

O lugar “Vapor de alta pressão p/ desaeração” é, ao mesmo tempo, uma das saídas principais do modelo e uma das entradas para o disparo da transição “Desaeração”, realimentando o processo.

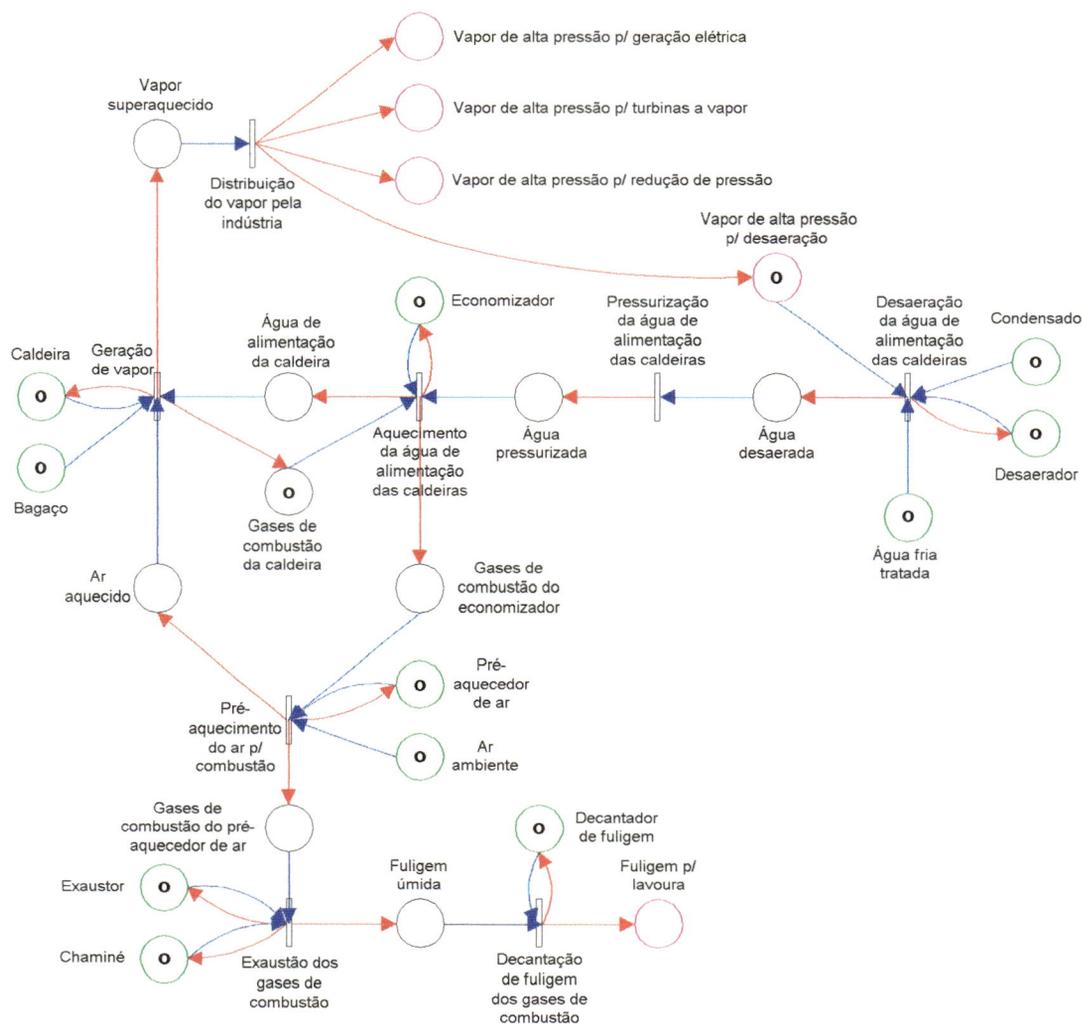


FIGURA 71 - Modelagem do sistema de geração de vapor

A marca no lugar “Gases de combustão da caldeira” não é uma entrada do modelo, mas um estado intermediário necessário para o disparo da transição “Aquecimento da água de alimentação das caldeiras”, respectivamente. Porém, elas são geradas anteriormente à passagem pelo sistema do bagaço em questão.

Todas as variáveis principais deste modelo (caldeira, exaustor, pré-aquecedor de ar, economizador, desaerador) possuem atributos de característica contínua, representados pelas vazões dos diversos elementos que participam de seus processos. Logo, o modelo apresentado é limitado em relação à plena caracterização do sistema real.

5. CONCLUSÕES

A evolução do mercado e o avanço tecnológico desenham um panorama de negócios extremamente competitivo, onde a busca de incrementos na qualidade e produtividade afirma-se cada vez mais como uma tendência entre as empresas. Neste contexto, a aplicação de ferramentas modernas como complemento ao planejamento determinístico apresenta-se como uma promissora alternativa para o setor sucroalcooleiro acompanhar tais tendências, na busca da manutenção e da expansão de seus mercados.

O objetivo central do estudo foi caracterizar, de forma realista, as cadeias de atividades produtivas do sistema sucroalcooleiro, através da utilização dos conceitos e de uma ferramenta baseada nas redes de Petri, procurando, desta forma, disponibilizar ao planejador subsídios para a análise das opções mais adequadas de planejamento.

Durante a realização do trabalho, contamos com a valiosa colaboração da Usina Santa Adélia S. A., localizada no município de Jaboticabal, SP, que gentilmente forneceu os dados necessários para a descrição e modelagem das cadeias de atividades apresentadas nos capítulos 3 e 4, e, ao fim do estudo, podemos afirmar que os objetivos foram alcançados, com todas as etapas do trabalho sendo plenamente cumpridas.

A modelagem e análise dos modelos em rede de Petri não se prendeu em aspectos contínuos ou discretos, não sendo utilizado o recurso de temporização das transições. O enfoque principal foi a busca da representação realista dos relacionamentos entre as atividades.

A complexidade alcançada em alguns modelos reflete a complexidade do sistema produtivo sucroalcooleiro, sugerindo que para análises mais detalhadas dos modelos em rede de Petri sejam utilizados outros métodos além do método da árvore de alcançabilidade.

Complementando, alguns comentários podem ser apresentados, quais seguem:

- Para a indústria sucroalcooleira a rede de Petri salienta bem a descrição da seqüência de atividades, a identificação de compartilhamento de recursos e o paralelismo de atividades.
- Como ferramenta de modelagem de eventos discretos, a rede de Petri representou satisfatoriamente as áreas de corte, carregamento e transporte, predominantemente discretas.
- Para as áreas com características contínuas e híbridas, como: extração, preparo, clarificação, cozimento, cristalização e centrifugação, fermentação, tratamento de levedura e destilação, a ferramenta tem efeito limitado, com certa dificuldade de aplicação, o que era esperado, pois é de obscura compreensão a relação entre a passagem de marcas entre lugares e a vazão dos fluidos envolvidos nos sistemas citados.
- A utilização isolada da ferramenta de rede de Petri não conduz diretamente à formulação de modelos para simulação em softwares comerciais, necessitando-se de uma análise adicional das variáveis envolvidas e seus atributos. Os modelos em rede de Petri validam o levantamento das cadeias de atividades produtivas.

Finalmente, podemos apresentar algumas propostas para futuros trabalhos de ampliação e complementação do presente trabalho:

- a) Desenvolvimento de modelos padrões simplificados dos diversos cenários de uma usina sucroalcooleira para rápidas análises e estudos comparativos utilizando simulação.
- b) Estudos estatísticos sobre os dados de produção para auxílio ao processo de planejamento.
- c) Utilização de redes de Petri com mais recursos (temporizadas, de alto nível, etc.) para a elaboração de modelos mais completos, especialmente os de características contínuas ou híbridas.
- d) Especificação de procedimentos, modelos padrões e interfaces para o uso da simulação como ferramenta básica de apoio ao planejamento da produção em usinas sucroalcooleiras.

ANEXO A: Simulação das seqüências de disparo - Plantio

Para crescimento com reforma

Sequence Transition

Sequence 1

0

Limpeza c/ retirada de soqueira

Tratamento

Pousio

Plantio de leguminosa

Colheita de leguminosa

Plantio de cana

Crescimento

Multiplicação em laboratório

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1)

t(3) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1)

t(4) M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1)

t(5) M(0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1)

t(6) M(0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,0,1,1,0,0,1,1,1)

t(7) M(0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1)

t(8) M(0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,1)

t(9) M(0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1)

t(11) M(0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1)

} End of Path

Para crescimento sem reforma

Sequence 1

0

Limpeza

Tratamento

Crescimento

Multiplicação em laboratório

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1)

t(10) M(0,1,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,1,1)

t(1) M(0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,1)

t(2) M(0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1)

t(11) M(0,0,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,0,2,1,1)

} End of Path

ANEXO B: Simulação das seqüências de disparo - Corte e carregamento

Sequence Transition

Sequence 1

0
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-transb.
Descarregamento no caminhão

Sequence 2

0
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Desengate entre caminhão e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 3

0
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Desengate entre caminhão e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 4

0
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre caminhão e reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 5

0
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre caminhão e reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 6

0
Desengate entre caminhão e reboque
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 7

0
Desengate entre caminhão e reboque
Corte mecanizado de cana crua c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 8

0
Queima do talhão
Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-transb.
Descarregamento no caminhão

Sequence 9

0
Desengate entre caminhão e reboque
Queima do talhão
Corte manual de cana queimada

Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 10

0
Desengate entre caminhão e reboque
Queima do talhão
Corte manual de cana queimada
Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 11

0
Desengate entre caminhão e reboque
Queima do talhão
Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 12

0
Desengate entre caminhão e reboque
Queima do talhão
Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 13

0
Queima do talhão
Desengate entre caminhão e reboque
Corte manual de cana queimada
Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 14

0
Queima do talhão
Desengate entre caminhão e reboque
Corte manual de cana queimada
Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 15

0
Queima do talhão
Corte manual de cana queimada
Desengate entre caminhão e reboque
Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e trator
Engate entre reboque e caminhão

Sequence 16

0
Queima do talhão
Corte manual de cana queimada
Desengate entre caminhão e reboque
Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
Desengate entre trator e reboque
Engate entre reboque e caminhão
Engate entre reboque e trator

Sequence 17

0
 Queima do talhão
 Corte manual de cana queimada
 Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e caminhão
 Engate entre reboque e trator

Sequence 18

0
 Queima do talhão
 Corte manual de cana queimada
 Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e trator
 Engate entre reboque e caminhão

Sequence 19

0
 Queima do talhão
 Corte manual de cana queimada
 Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Engate entre reboque e trator
 Engate entre reboque e caminhão

Sequence 20

0
 Queima do talhão
 Corte manual de cana queimada
 Carregamento de cana queimada c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Engate entre reboque e caminhão
 Engate entre reboque e trator

Sequence 21

0
 Queima do talhão
 Corte manual de cana queimada
 Carregamento de cana queimada c/ trator-transb.
 Descarregamento no caminhão

Sequence 22

0
 Queima do talhão
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Engate entre reboque e caminhão
 Engate entre reboque e trator

Sequence 23

0
 Queima do talhão
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Engate entre reboque e trator
 Engate entre reboque e caminhão

Sequence 24

0
 Queima do talhão
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e trator
 Engate entre reboque e caminhão

Sequence 25

0
 Queima do talhão
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre caminhão e reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e caminhão
 Engate entre reboque e trator

Sequence 26

0
 Queima do talhão
 Desengate entre caminhão e reboque
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e trator
 Engate entre reboque e caminhão

Sequence 27

0
 Queima do talhão
 Desengate entre caminhão e reboque
 Corte mecanizado de cana queim. c/ trator-reboque
 Desengate entre trator e reboque
 Engate entre reboque e caminhão
 Engate entre reboque e trator

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(13) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1)
 t(9) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1)
 } End of Path

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(12) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(4) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(7) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(5) M(0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1)
 t(6) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1)
 } End of Path

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(12) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(4) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(7) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(6) M(0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1)
 t(5) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1)
 } End of Path

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(12) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(7) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(4) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(6) M(0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1)
 t(5) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1)
 } End of Path

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(12) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1)
 t(7) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(4) M(0,0,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,1,1)
 t(5) M(0,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,1)
 t(6) M(0,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1)
 } End of Path

Init of Path {

M(1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1)

ANEXO C: Simulação das seqüências de disparo - Transporte / pesagem e amostragem

Sequence Transition

Sequence 1

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Deslocamento até pátio
Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Manutenção
Abastecimento
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Sequence 2

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Deslocamento até pátio
Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Abastecimento
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Sequence 3

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Deslocamento até pátio
Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Sequence 4

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Amostragem
Deslocamento até pátio
Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Manutenção
Abastecimento
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Sequence 5

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Amostragem
Deslocamento até pátio
Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Abastecimento
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Sequence 6

0
Viagem até usina
Pesagem do caminhão carregado
Amostragem
Deslocamento até pátio

Descarregamento (Recepção de cana)
Pesagem vazio
Deslocamento até saída da usina
Viagem até campo

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(8) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(10) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0)
t(6) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0)
t(9) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(8) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(12) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0)
t(9) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(8) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(13) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(3) M(0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(7) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(10) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0)
t(6) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0)
t(9) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(3) M(0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(7) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(12) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0)
t(9) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(1) M(0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(2) M(0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(3) M(0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0)

t(7) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0)
t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(5) M(0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0)
t(13) M(0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0)
t(11) M(0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1)
} End of Path

ANEXO D: Simulação das seqüências de disparo - Recepção de cana

Sequence Transition

Sequence 1

0
Deslocamento até fila de cana picada
Deslocamento até tombador hidráulico
Descarregamento c/ tombador hidráulico
Alimentação de cana picada na esteira de cana 2
Deslocamento até fila de pesagem

Sequence 2

0
Deslocamento até fila de cana picada
Deslocamento até tombador hidráulico
Descarregamento c/ tombador hidráulico
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana picada na esteira de cana 2

Sequence 3

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até tombador hidráulico
Descarregamento c/ tombador hidráulico
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2
Deslocamento até fila de pesagem

Sequence 4

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até tombador hidráulico
Descarregamento c/ tombador hidráulico
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 5

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo da mesa conjugada
Descarregamento c/ hilo da mesa conjugada
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2
Deslocamento até fila de pesagem

Sequence 6

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo da mesa conjugada
Descarregamento c/ hilo da mesa conjugada
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 7

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo da mesa conjugada
Descarregamento c/ hilo da mesa conjugada
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 8

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo do pátio
Descarregamento c/ hilo do pátio

Armazenamento no pátio

Alimentação de cana inteira na mesa 45
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2
Deslocamento até fila de pesagem

Sequence 9

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo do pátio
Descarregamento c/ hilo do pátio
Armazenamento no pátio
Alimentação de cana inteira na mesa 45
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 10

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo do pátio
Descarregamento c/ hilo do pátio
Armazenamento no pátio
Alimentação de cana inteira na mesa 45
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 11

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo do pátio
Descarregamento c/ hilo do pátio
Armazenamento no pátio
Deslocamento até fila de pesagem
Alimentação de cana inteira na mesa 45
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Sequence 12

0
Deslocamento até fila de cana inteira
Deslocamento até hilo do pátio
Descarregamento c/ hilo do pátio
Deslocamento até fila de pesagem
Armazenamento no pátio
Alimentação de cana inteira na mesa 45
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 1
Alimentação de cana inteira na esteira de cana 2

Init of Path {

M(1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(2)
M(0,1,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(3)
M(0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(4)
M(0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(5)
M(0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,1)
t(6)
M(0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,1)
} End of Path

Init of Path {

M(1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(2)
M(0,1,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(3)
M(0,0,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)


```

t(13)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0)
t(14)
M(0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,1)
} End of Path

```

```

Init of Path {

```

```

M(1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(1)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(11)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0)
t(12)
M(0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(9)
M(0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(6)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(10)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(13)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0)
t(14)
M(0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,1)
} End of Path

```

```

Init of Path {

```

```

M(1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(1)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(11)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0)
t(12)
M(0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(6)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(9)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(10)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
t(13)
M(0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,0,1,1,0,0,0)
t(14)
M(0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,1)
} End of Path

```

ANEXO E: Simulação das seqüências de disparo - Preparo da cana

Sequence Transition

Sequence 1

0

Alimentação de cana na esteira de borracha

Rompimento de células

Desfibramento

Retirada de metais

Init of Path {

M(0,1,1,1,1,1,0,0,0,1)

t(4) M(1,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0)

t(1) M(0,1,1,1,1,0,0,1,0,1,0)

t(2) M(0,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0)

t(3) M(0,1,1,1,1,1,0,0,1,0)

} End of Path

ANEXO F: Simulação das seqüências de disparo - Extração

Sequence Transition

Sequence 1

0

Homogeneização

Alimentação do 1. terno

Alimentação do 2. terno

Alimentação do 3. terno

Alimentação do 4. terno

Alimentação do 5. terno

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Sequence 2

0

Alimentação do 1. terno

Homogeneização

Alimentação do 2. terno

Alimentação do 3. terno

Alimentação do 4. terno

Alimentação do 5. terno

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Sequence 3

0

Alimentação do 1. terno

Alimentação do 2. terno

Homogeneização

Alimentação do 3. terno

Alimentação do 4. terno

Alimentação do 5. terno

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Sequence 4

0

Alimentação do 1. terno

Alimentação do 2. terno

Alimentação do 3. terno

Homogeneização

Alimentação do 4. terno

Alimentação do 5. terno

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Sequence 5

0

Alimentação do 1. terno

Alimentação do 2. terno

Alimentação do 3. terno

Alimentação do 4. terno

Homogeneização

Alimentação do 5. terno

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Sequence 6

0

Alimentação do 1. terno

Alimentação do 2. terno

Alimentação do 3. terno

Alimentação do 4. terno

Alimentação do 5. terno

Homogeneização

Alimentação do 6. terno

Peneiragem do caldo

Init of Path {

M(1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0)

t(8)

M(1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,1,0,0,0)

t(1)

M(0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0)

t(2)

M(0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0)

t(3)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,2,1,0,1,0,0,0)

t(4)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,3,1,0,1,0,0,0)

t(5)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,4,1,0,1,0,0,0)

t(6)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,5,1,0,0,0,0)

t(7)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0,0)

} End of Path

Init of Path {

M(1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0)

t(1)

M(0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0)

t(8)

M(0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0)

t(2)

M(0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0)

t(3)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,2,1,0,1,0,0,0)

t(4)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,3,1,0,1,0,0,0)

t(5)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,4,1,0,1,0,0,0,0)

t(6)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,5,1,0,0,0,0)

t(7)

M(0,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,1,0,0,0,0)

} End of Path

Init of Path {

M(1,1,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,0,1,0,0,1,0)

t(1)

M(0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0)

t(2)

M(0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0)

t(8)

M(0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,0,0)

ANEXO G: Simulação das seqüências de disparo - Clarificação

Para caldo clarificado para fabricação de açúcar

Sequence Transition

Sequence 1

0

Vaporização de enxofre

Sulfitação

Calagem

Aquecimento

Desaeração

Decantação

Filtração

Init of Path {

M(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1)

t(12)

M(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,0)

t(1)

M(0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,0)

t(2)

M(0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,1,1,0,0)

t(3)

M(0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0)

t(4)

M(0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0)

t(5)

M(0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0)

t(10)

M(0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0)

} End of Path

Para caldo clarificado para fabricação de álcool

Sequence Transition

Sequence 1

0

Calagem

Aquecimento

Desaeração

Decantação

Filtração

Init of Path {

M(1,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1)

t(6)

M(0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1)

t(7)

M(0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1)

t(8)

M(0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1)

t(9)

M(0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1)

t(10)

M(0,0,0,0,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1)

} End of Path

ANEXO H: Simulação das seqüências de disparo - Evaporação

Sequence Transition

Sequence 1

0

Evaporação do pré-evaporador

Evaporação do 2. efeito

Evaporação do 3. efeito

Evaporação do 4. efeito

Concentração

Init of Path {

M(1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0,0)

t(1) M(0,1,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0,0)

t(2) M(0,0,1,0,0,0,0,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0,0)

t(3) M(0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0)

t(4) M(0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0)

t(5) M(0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1)

} End of Path

ANEXO I: Simulação das seqüências de disparo - Fabricação de açúcar

Para açúcar refinado

Sequence Transition

Sequence 1

0

Geração de pé de cozimento

Cozimento / turbinagem de massa C

Cozimento / turbinagem de massa B

Cozimento / turbinagem de massa A

Filtração

Cozimento / turbinagem de massa R

Sequence 2

0

Geração de pé de cozimento

Cozimento / turbinagem de massa B

Cozimento / turbinagem de massa A

Filtração

Cozimento / turbinagem de massa R

Cozimento / turbinagem de massa C

Sequence 3

0

Geração de pé de cozimento

Cozimento / turbinagem de massa B

Cozimento / turbinagem de massa A

Filtração

Cozimento / turbinagem de massa C

Cozimento / turbinagem de massa R

Sequence 4

0

Geração de pé de cozimento

Cozimento / turbinagem de massa B

Cozimento / turbinagem de massa A

Cozimento / turbinagem de massa C

Filtração

Cozimento / turbinagem de massa R

Sequence 5

0

Geração de pé de cozimento

Cozimento / turbinagem de massa B

Cozimento / turbinagem de massa C

Cozimento / turbinagem de massa A

Filtração

Cozimento / turbinagem de massa R

Init of Path {

M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,2)

t(1)

M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(3)

M(1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(2)

M(1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(4)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(5)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(10)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,0)

} End of Path

Init of Path {

M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,2)

t(1)

M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(2)

M(1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(4)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(5)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1)

t(10)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0)

t(3)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0)

} End of Path

Init of Path {

M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,2)

t(1)

M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(2)

M(1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(4)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(5)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1)

t(3)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,0,1)

t(10)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,0)

} End of Path

Init of Path {

M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,2)

t(1)

M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)

t(2)

M(1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,1,0,1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,0,1)

t(4)

M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,0,0,1)

t(3)

M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,0,0,1)

```

Sequence 2
0
Geração de pé de cozimento
Cozimento / turbinagem de massa B
Cozimento / turbinagem de massa A
Classificação em açúcar tipo 4
Cozimento / turbinagem de massa C

Sequence 3
0
Geração de pé de cozimento
Cozimento / turbinagem de massa B
Cozimento / turbinagem de massa A
Cozimento / turbinagem de massa C
Classificação em açúcar tipo 4

Sequence 4
0
Geração de pé de cozimento
Cozimento / turbinagem de massa B
Cozimento / turbinagem de massa C
Cozimento / turbinagem de massa A
Classificação em açúcar tipo 4

Init of Path {
M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,2)
t(1)
M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(3)
M(1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(2)
M(1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(4)
M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,
,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(6)
M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,
,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
} End of Path

Init of Path {
M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,2)
t(1)
M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(2)
M(1,1,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,1,0,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(4)
M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,
,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(6)
M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,
,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(3)
M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,
,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
} End of Path

Init of Path {
M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,2)
t(1)
M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(2)
M(1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,1,0,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(4)
M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,
,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(6)
M(0,1,1,1,0,1,1,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,2,0,0,0,1,0,1,1,1,0,
,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
t(3)
M(0,1,1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,0,
,1,0,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
} End of Path

Init of Path {
M(2,1,1,0,0,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,2)
t(1)
M(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,
,0,0,1,0,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,0,1)
} End of Path

```

ANEXO J: Simulação das seqüências de disparo - Fermentação

Fermentação com caldo clarificado e melaço

Sequence Transition

Sequence 1

0

Diluição de caldo clarificado c/ melaço

Fermentação

Centrifugação de vinho

Armazenamento de vinho

Init of Path {

M(1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1)

t(1) M(0,0,1,0,0,1,1,1,0,0,1)

t(3) M(0,0,0,1,0,1,1,0,0,0,1)

t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1)

t(5) M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0)

} End of Path

Fermentação com melaço

Sequence Transition

Sequence 1

0

Diluição de melaço

Fermentação

Centrifugação de vinho

Armazenamento de vinho

Init of Path {

M(0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1)

t(2) M(0,0,1,0,0,1,1,1,0,0,1)

t(3) M(0,0,0,1,0,1,1,0,0,0,1)

t(4) M(0,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1)

t(5) M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0)

} End of Path

ANEXO K: Simulação das seqüências de disparo - Tratamento de levedura

Tratamento de levedura sem secagem

Sequence Transition

Sequence 1

0
Tratamento de levedura s/ secagem
Desfloculação
Centrifugação do leite de levedura

Init of Path {

M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
t(7)
M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,1,0,0,1,1,1,0,0,0,0)
t(8)
M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,0)
t(9)
M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0)
} End of Path

Tratamento de levedura com secagem

Sequence Transition

Sequence 1

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Secagem
Desfloculação
Centrifugação do leite de levedura

Sequence 2

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Desfloculação
Secagem
Centrifugação do leite de levedura

Sequence 3

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Desfloculação
Centrifugação do leite de levedura
Secagem

Sequence 4

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Tratamento p/ secagem
Desfloculação
Destilação / centrifugação p/ secagem
Secagem
Centrifugação do leite de levedura

Sequence 5

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Tratamento p/ secagem
Desfloculação
Destilação / centrifugação p/ secagem
Centrifugação do leite de levedura
Secagem

Sequence 6

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Desfloculação
Centrifugação do leite de levedura
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Secagem

Sequence 7

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Desfloculação
Tratamento p/ secagem
Centrifugação do leite de levedura
Destilação / centrifugação p/ secagem
Secagem

Sequence 8

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Desfloculação
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Centrifugação do leite de levedura
Secagem

Sequence 9

0
Tratamento de levedura c/ secagem
Desfloculação
Tratamento p/ secagem
Destilação / centrifugação p/ secagem
Secagem
Centrifugação do leite de levedura

Init of Path {

M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
t(6)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0)
t(2)
M(1,0,1,0,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1)
t(3)
M(1,0,0,1,0,1,1,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1)
t(4)
M(1,0,0,0,1,1,1,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
t(1)
M(0,1,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
t(5)
M(0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
} End of Path

Init of Path {

M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,1,0)
t(1,0)


```

t(6)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,1,0,0)
t(1)
M(0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,1,0,0)
t(2)
M(0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(3)
M(0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(5)
M(0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(4)
M(0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
} End of Path

Init of Path {

M(0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,1,0)
t(6)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,1,0,0)
t(1)
M(0,1,0,0,0,0,0,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,1,0,0)
t(2)
M(0,1,1,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(3)
M(0,1,0,1,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(4)
M(0,1,0,0,1,0,0,0,1,0,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
t(5)
M(0,0,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,0
,0,0,1)
} End of Path

```



```

t(4)
M(0,0,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,3,1,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(6)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,3,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(7)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0)
t(10)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1
,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(12)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,0,1,0,1,0,1,0,1,1,0
,1,1,0,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(13)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,0
,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(11)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0
,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(14)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,1,3,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0
,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,0,1)
t(11)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,4,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,2)
t(19)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,4,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,1,0,1,1,0,0)
t(20)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,0,4,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,1,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,1,0,0,0,0)
} End of Path

```

Sequence 3

0

Pré-aquecimento de vinho

Aquecimento de vinho / resfriamento de vinhaça

Destilação

Condensação nos condensadores R

Retificação

Condensação nos condensadores E

Desidratação

Decantação

Recuperação de ciclo-hexano

Condensação nos condensadores I

Condensação nos condensadores H

Armazenagem

Expedição

Init of Path {

```

M(1,0,1,0,1,0,0,0,0,0,1,1,0,4,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(1)
M(0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,4,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(2)
M(0,0,1,1,0,0,1,1,0,0,1,1,0,4,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(3)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,4,0,0,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(4)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,3,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,1,1,0,1,1,0,1,0,0)
t(6)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,3,1,1,0,1,1,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0)
t(7)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,1,1,1,0,1,0,1,1,0
,0,0,0,1,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,1,0)
t(10)
M(0,0,1,1,1,1,1,0,0,0,1,0,0,2,2,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,1,1
,0,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,1,0,1,1,0,1,0,0)

```


ANEXO N: Simulação das seqüências de disparo - Geração de vapor

Sequence Transition

Sequence 1

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras
Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Exaustão dos gases de combustão
Decantação de fuligem dos gases de combustão
Geração de vapor
Distribuição do vapor pela indústria

Sequence 2

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras
Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Exaustão dos gases de combustão
Geração de vapor
Distribuição do vapor pela indústria
Decantação de fuligem dos gases de combustão

Sequence 3

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras
Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Exaustão dos gases de combustão
Geração de vapor
Decantação de fuligem dos gases de combustão
Distribuição do vapor pela indústria

Sequence 4

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras
Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Geração de vapor
Distribuição do vapor pela indústria
Exaustão dos gases de combustão
Decantação de fuligem dos gases de combustão

Sequence 5

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras
Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Geração de vapor
Exaustão dos gases de combustão
Decantação de fuligem dos gases de combustão
Distribuição do vapor pela indústria

Sequence 6

0
Desaeração da água de alimentação das caldeiras

Pressurização da água de alimentação das caldeiras
Aquecimento da água de alimentação das caldeiras
Pré-aquecimento do ar p/ combustão
Geração de vapor
Exaustão dos gases de combustão
Distribuição do vapor pela indústria
Decantação de fuligem dos gases de combustão

Init of Path {

M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(3)
M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(8)
M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
t(2)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(4)
M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(5)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0)
t(7)
M(1,1,1,0,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(1)
M(1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(6)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
} End of Path

Init of Path {

M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(3)
M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(8)
M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
t(2)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(4)
M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(5)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0)
t(1)
M(1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,0)
t(6)
M(1,0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0)
t(7)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
} End of Path

Init of Path {

M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(3)
M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(8)
M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
t(2)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(4)
M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(5)
M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0)
t(1)
M(1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,0)
t(7)
M(1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(6)
M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
} End of Path

Init of Path {

M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
t(3)
M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)

t(8)
 M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
 t(2)
 M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(4)
 M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(1)
 M(1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(6)
 M(1,0,0,0,1,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
 t(5)
 M(1,0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0)
 t(7)
 M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
 } End of Path

Init of Path {
 M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(3)
 M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(8)
 M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
 t(2)
 M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(4)
 M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(1)
 M(1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(5)
 M(1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,0)
 t(7)
 M(1,0,0,0,0,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(6)
 M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
 } End of Path

Init of Path {
 M(1,1,0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(3)
 M(1,1,0,1,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(8)
 M(1,1,0,0,0,0,0,0,1,1,1,1,0,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1)
 t(2)
 M(1,1,1,0,0,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(4)
 M(1,1,1,0,1,0,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(1)
 M(1,0,0,0,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,0,0)
 t(5)
 M(1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,1,1,0,0,0,1,1,1,0)
 t(6)
 M(1,0,0,0,0,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,1,0,0)
 t(7)
 M(1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,1,1,1,1,1,0,0)
 } End of Path

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALSADI, O. V.; FARIA, C. A. C. DE; NOVAES FILHO, R. *Considerações sobre a dinâmica recente do complexo sucroalcooleiro no estado de São Paulo*. Informações Econômicas, SP, v. 26, n. 4, p. 21-28, abr. 1996.
- BANKS, J.; CARSON, J. S. *Discret-event system simulation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984. ✓
- CABRAL, P. *Energia, dependência externa e auto-suficiência*. <http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto7.html>. (20 mar.) 1998.
- CAMARGO, C. A. et al. *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: manual de recomendações*. IPT, São Paulo, publicação 1817, 1990.
- CARNEVALLI, W. T. *Processo de destilação*. Piracicaba, Conger S. A. /Apostila/ 1981.
- COOPERATIVA DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA. *Agrícola Informa nº 17*. Centro de Tecnologia COPERSUCAR. Piracicaba. /Boletim técnico/ fev. 1995.
- COOPERATIVA DOS PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA. *Manual de controle químico da fabricação de açúcar*. Piracicaba. Cap. 1, p. 1-5, 1996.
- DELGADO, A. A. et al. *Tecnologia dos produtos agropecuários - tecnologia do açúcar e das fermentações industriais*. ESALQ - USP, publicação n. 2828, 1975.
- DESROCHERS, A. A.; AL-JAAR, R. Y. *Applications of Petri nets in manufacturing systems: modelling, control, and performance analysis*. IEEE Press, Piscataway, NJ, 1994.



- EID, F. *Progresso técnico na agroindústria sucroalcooleira*. Informações Econômicas, SP, v. 26, n. 5, p. 29-36, maio 1996.
- EID, F.; CHAN, K.; PINTO, S. DA S. *Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira paulista: uma análise da experiência e dificuldades de difusão*. Informações Econômicas, SP, v. 28, n. 5, p. 7-12, maio 1998.
- FANNI, A.; GIUA, A. Discrete event representation of qualitative models using Petri nets. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS. *Proceedings*, v. 28, n. 6, p. 770-780, Dec. 1998.
- FERREIRA, A. T. *O papel do setor sucroalcooleiro na economia brasileira*. <http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto8.html>. (20 mar.) 1998.
- FURLANI NETO, V. L. *Colhedora de cana-de-açúcar (Saccharun spp): avaliação em canaviais com e sem queima prévia*. Piracicaba. 111 p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1995.
- GORDON, G. *System Simulation*, 2nd ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, p. 423, 1978.
- HAHN, M. H.; BRAUNBECK, O. A.; RIBEIRO, R. V. *Um novo software para o planejamento de transporte de cana*. Revista Álcool & Açúcar, n. 79, v. 15, p. 36-40, abr./maio 1995.
- HUGOT, E.; *Manual da engenharia açucareira*. 1^a ed. em português, v. I e II. Mestre Jou, 1977.
- KATO, E. R. R.; ATOLINI, L. F. R. *Instrumentação e supervisão no setor sucroalcooleiro*. Revista Álcool & Açúcar, n. 79, v. 15, p. 22-24, abr./maio 1995.
- LAW, A. M. *Introduction to simulation: a powerful tool for analysing complex manufacturing systems*. Industrial Engineering, p. 46-63, May 1986.

- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation modeling and analysis*. 2nd ed. McGraw-Hill, Cap. 1, p. 1-132, 1991.
- LAW, A. M.; McCOMAS, M. G. *Secrets of successful simulation studies*, Ind. Eng., 22:47-48, 51-53, 72, May 1990.
- LOBÃO, E. DE C.; PORTO, A. J. V. Evolução das técnicas de simulação em acordo com a tecnologia. (CD ROM) In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 16., Piracicaba, SP. *Anais*. Out. 1996.
- LOBÃO, E. DE C.; PORTO, A. J. V. Proposta para sistematização de estudos de simulação. (CD ROM) In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 17., Gramado, RS. *Anais*. Out. 1997.
- LOPES, M. B.; *Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar*. Piracicaba. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1995.
- MACEDO, I. DE C.; *Legislação ambiental e inovações tecnológicas na agroindústria canavieira*. <http://franco.eco.unicamp.br:80/workshop/texto5.html>. (20 mar.) 1998.
- MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. *Scheduling of maintenance activities in a sugar industry using simulation*. Computers in Industry, n. 21, p. 331-334, 1993.
- MILAN, M. *Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brazil*. Silsoe. 226 p. Tese (Ph. D.) - Cranfield Institute of Technology.
- MURATA, T. *Petri nets: properties, analysis and applications*. Proceedings of the IEEE, v. 77, n. 4, p. 541-580, Apr. 1989.
- NUNES, M. H. Moagem da cana. In: *CURSO de controle de operação de moendas*. /s. i./Apostila/ p. 66-85.

- NUNES, M. H. Sistema de embebição. In: *CURSO de controle de operação de moendas. Is. i./Apostila/* p. 106-117.
- OLIVETTI, M. P. DE A.; COELHO, P. J.; NEGRI NETO, A.; CASER, D. V.; DONADELLI, A. *O valor da produção das atividades agropecuárias nas regiões do estado de São Paulo*. Informações Econômicas, SP, v. 26, n. 6, p. 39-68, jun. 1996.
- PORTUGAL, A. D. A importância estratégica da prospecção tecnológica para o SNPA. In: CASTRO, A. M. G. de et al. *Cadeias produtivas e sistemas naturais - prospecção tecnológica*. Brasília, EMBRAPA-SPI / EMBRAPA-DSP. Cap. 1, p. 09-20, 1998.
- PRITSKER, A. A. B. *Introduction to simulation and SLAM II*, 4th ed. John Wiley & Sons, New York, Cap. 1, p. 1-15, 1994.
- ROCHA, J. V.; *Uma nova tecnologia para gerenciamento agrícola das usinas e destilarias*. Revista Álcool & Açúcar, n. 79, v. 15, p. 30-35, abr./maio 1995.
- SATO, M. S. Alimentação do 1º. terno. In: *CURSO de controle de operação de moendas. Is. i./Apostila/* p. 60-65.
- SATO, M. S. Preparo de cana. In: *CURSO de controle de operação de moendas. Is. i./Apostila/* p. 42-59.
- SATO, M. S. Recepção e manuseio de cana. In: *CURSO de controle de operação de moendas. Is. i./Apostila/* p. 8-19.
- SCHMIDT, J. W.; TAYLOR, R. E. *Simulation and analysis of industrial systems*. Richard D. Irwin, Homewood, Ill, 1970. ✓
- SHANNON, R. E. *Systems simulation*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1975. ✓
- TILLMANN, C. A. DE C. *Avaliação dos desempenhos operacional e econômico de sistema de colheita semi-mecanizada em cana-de-açúcar, com e sem queima*

prévia. Piracicaba. 111 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1994.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz". Publicação interna n. 56932. *Curso de modelagem e simulação de processos na produção de açúcar, álcool e derivados*. Piracicaba, set. 1992.

VIAN, C. E. DE F.; EID, F.; SCOPINHO, R. A.; SILVA, P. R. C. DA. *Estratégias de crescimento em destilarias de álcool e usinas açucareiras: estudos de caso em nove empresas paulistas*. *Informações Econômicas*, SP, v. 27, n. 9, p. 07-25, set. 1997.

WIDMER, J. L. Operação de veículos combinados longos (VCL's) no Brasil - implicações sobre a infra-estrutura. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA, VI, São Paulo, SP, *Anais*, nov. 1991.

WIETING, R. Hybrid high-level nets. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Piscataway, NJ. *Proceedings*, p. 848-855, 1996.