

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

Este exemplar corresponde à redação final  
da tese defendida por Luiz Augusto Horta  
Nogueira e aprovada pela comissão julgadora  
em 16/06/87

Isaías de Carvalho Macedo

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA  
NA PRODUÇÃO DE ALCÓOL  
DE CANA DE AÇÚCAR

Tese de Doutorado apresentada à  
Comissão de Pós-Graduação da Facul-  
dade de Engenharia de Campinas, co-  
mo parte dos requisitos para a ob-  
tenção do título de Doutor em Enge-  
nharia Mecânica.

CAMPINAS, 1987

Existem homens e mulheres essenciais à fabricação do álcool, iniciando com o corte da cana todas as etapas industriais. Este trabalho é dedicado a eles, na esperança que possam vir a participar da energia e doçura que ajudam a produzir.

*"Luz do Sol  
que a folha traz e traduz  
em verde novo  
em vida, em força, em graça, em luz"*

C.Veloso

O autor agradece o interesse e de  
dicação de seu orientador, Prof. Isaías  
de Carvalho Macedo, a cuidadosa prepara  
ção dos originais por Claudete Coli Jun  
queira e Messias Tadeu Salgado e o estímu  
lo e apoio indispensáveis dos amigos da  
Escola Federal de Engenharia de Itajubá,  
da Faculdade de Engenharia de Campinas e  
do Centro de Tecnologia Copersucar.

LUIZ AUGUSTO HORTA NOGUEIRA

ENG<sup>o</sup> MECÂNICO, FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ-UNESP-1978  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS-UNICAMP-1981

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA  
NA PRODUÇÃO DE ALCÓOL  
DE CANA DE AÇÚCAR

ORIENTADOR: PROF. DR. ISAÍAS DE CARVALHO MACEDO

Tese de Doutorado apresentada à  
Comissão de Pós-Graduação da Facul-  
dade de Engenharia de Campinas, co-  
mo parte dos requisitos para a ob-  
tenção do título de Doutor em Enge-  
nharia Mecânica.

## ÍNDICE GERAL

Resumo.....	ix
Abstract.....	x
Introdução.....	xi

### PARTE I - O SISTEMA ATUAL: ANÁLISE DOS INSUMOS E PRODUTOS ENERGÉTICOS NOS SETORES AGRÍCOLA E INDUSTRIAL

1. ANÁLISE ENERGÉTICA.....	2
1.1. Conceituação.....	2
1.2. Terminologia e Convenções.....	3
1.3. Métodos usados em Análise Energética.....	7
2. BALANÇO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CANA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	10
2.1. Definição de Cenários Atuais.....	10
2.2. Setor Agrícola - Produção de Cana.....	11
2.3. Setor Industrial - Produção de Álcool.....	12
2.4. Análise de Conjunto e Conclusões.....	13

### PARTE II - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SETOR INDUSTRIAL

3. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA NAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO.....	18
3.1. Análise do Fluxo de Açúcares.....	18
3.2. Análise do Fluxo de Energia.....	23
3.2.A - Bloco 1 - Geração de vapor.....	25
3.2.B - Bloco 2 - Consumo de vapor vivo.....	27
3.2.C - Bloco 3 - Consumo de vapor vegetal.....	32
3.2.D - Bloco 4 - Consumo de vapor de escape.....	38
3.2.E - Bloco 5 - Balanço de vapor.....	40
3.2.F - Bloco 6 - Índices auxiliares.....	40
3.3. Arquivo de Dados e Saídas de Resultados.....	41

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM O MODELO COMPUTACIONAL EM DISTINTAS CONFIGURAÇÕES DE DADOS.....	43
4.1. Condições de Equilíbrio nas Demandas de Vapor Vivo e Vapor de Escape.....	43
4.2. Variação da Disponibilidade de Bagaço.....	44
4.3. Alterações no Processo com Efeito no Balanço de Vapor	48
4.4. Variação da Relação de Produção: Açúcar/Álcool.....	51
4.5. Produção de Bagaço Excedente durante a Safra.....	52
PARTE III - POSSIBILIDADES DE INCREMENTO DA ENERGIA PRODUZIDA EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	
5. A CO-GERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL.....	55
5.1. Introdução.....	55
5.2. Conceitos em Co-geração.....	56
5.3. Situação de Operação.....	61
5.4. Análise de Algumas Situações de Transição no Aumento da Pressão.....	64
6. A PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO PLANEJAMENTO DA SAFRA EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL.....	68
6.1. O Método de Programação Dinâmica.....	68
6.2. Aplicação ao Planejamento da Safra.....	68
7. EFEITOS DA INTRODUÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS.....	74
7.1. A Inovação Tecnológica na Produção de Álcool.....	74
7.2. Efeito de Tecnologias Específicas.....	76
7.3. Perspectivas para o Setor Energético nas Usinas de Açúcar e Álcool.....	80
7.4. O Potencial da Secagem do Bagaço.....	81
8. CONCLUSÕES.....	86

APÊNDICE 1 - ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE <u>ÁLCOOL</u> : <u>DETA</u> <u>LHAMENTO DO SETOR AGRÍCOLA</u> .....	91
1.1. Produtividade Agrícola e Eficiência Industrial.....	91
1.2. Operações Agrícolas e Colheita.....	92
1.3. Transporte.....	95
1.4. Fertilizantes.....	97
1.5. Calcário, Herbicida e Inseticidas.....	98
1.6. Mudanças.....	100
1.7. Máquinas e Equipamentos Agrícolas.....	100
1.8. Mão-de-obra.....	102
APÊNDICE 2 - ANÁLISE ENERGÉTICA DE <u>ÁLCOOL</u> : <u>DETALHAMENTO</u> <u>DO</u> <u>SETOR INDUSTRIAL</u> .....	103
2.1. Geração de Vapor.....	103
2.2. Conversão Termomecânica: Turbinas das Moendas.....	103
2.3. Conversão Termoelétrica: Turbogeneradores.....	104
2.4. Utilização de Energia Elétrica.....	104
2.5. Energia Utilizada no Preparo e Moagem da Cana.....	104
2.6. Consumo de Energia nos Processos: Açúcar e <u>Álcool</u> .....	105
2.7. Insumos do Setor Industrial.....	106
2.8. Edificações, Equipamentos e Instalações do Setor <u>Indus</u> <u>trial</u> .....	106
APÊNDICE 3 - <u>BALANÇO ENERGÉTICO DO CICLO DE NUTRIENTES</u> <u>PARA</u> <u>A CANA DE AÇÚCAR</u> .....	110
APÊNDICE 4 - <u>DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS DO MODELO DE SIMU</u> <u>LAÇÃO DO SETOR INDUSTRIAL, APLICADO A 2 USINAS</u> ..	114
APÊNDICE 5 - <u>RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DAS ALTER</u> <u>NATIVAS DE ELEVAÇÃO DA PRESSÃO EM SISTEMAS</u> <u>DE</u> <u>CO-GERAÇÃO</u> .....	140

APÊNDICE 6 - ELEMENTOS BÁSICOS DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA.....	145
6.1. O Princípio de Bellman.....	145
6.2. A Formulação do Problema.....	146
6.3. Derivação da Equação Recursiva.....	147
APÊNDICE 7 - ENERGIA MÍNIMA PARA A FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL.....	149
7.1. Introdução.....	149
7.2. Análise.....	150
7.2.A - Fermentação.....	150
7.2.B - Destilação.....	153
7.3. Comentários.....	155
APÊNDICE 8 - ANÁLISE TÉRMICA DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA....	157
8.1. Calor Teórico para a Secagem do Bagaço.....	157
8.2. Calor Real para Secagem do Bagaço.....	157
8.3. Gases de Combustão do Bagaço.....	157
8.3.A - Composição do Bagaço Seco.....	157
8.3.B - Composição dos Gases de Combustão.....	158
8.4. Calor Cedido pelos Gases de Combustão do Bagaço.....	158
8.5. Redução de Peso na Secagem.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	160

#### ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de Energia na Produção de Cana.....	12
Tabela 2 - Consumo de Energia na Produção de Álcool.....	13
Tabela 3 - Uso e Geração de Energia (Agrícola e Industrial).	13
Tabela 4 - Uso de Energia Fóssil e Geração de Energia.....	14

Tabela 5 - Energia Gerada/Energia Utilizada, Vários Estudos.	15
Tabela 6 - Avaliação da subrotina STRATE.....	31
Tabela 7 - Efeito do teor de fibra na cana e das condições de vapor vivo sobre o excedente do bagaço.....	45
Tabela 8 - Efeito do sistema de aquecimento de caldo sobre o consumo de vapor de escape.....	49
Tabela 9 - Efeito do número de efeitos na evaporação e da existência de tanques de reevaporação sobre o consumo de vapor de escape total.....	50
Tabela 10 - Efeito do nível de pressão de escape e estado do isolamento sobre o excedente de bagaço e o consumo de vapor de escape.....	50
Tabela 11 - Produção de bagaços e índices mensais durante a safra 85/86 na usina caso 2.....	53
Tabela 12 - Parâmetros sobre co-geração para alguns setores industriais.....	59
Tabela 13 - Valores de produtividade de vapor.....	64
Tabela 14 - Evaporação total necessária para os casos A e B..	66
Tabela 15 - Dados mensais de moagem de cana para usina do exemplo de aplicação da Programação Dinâmica.....	70
Tabela 16 - Dados mensais do plano de safra considerando que da no bagaço excedente ao longo da safra (refere-se ao gráfico anterior).....	73
Tabela A-1 - Produtividade da Cana-de-Açúcar.....	91
Tabela A-2 - Operações Agrícolas: Equipamentos.....	92
Tabela A-3 - Consumo nas Operações Agrícolas.....	93
Tabela A-4 - Características do SSD-2.....	94
Tabela A-5 - Equipamentos para a Colheita.....	95
Tabela A-6 - Aplicação de Adubo.....	97
Tabela A-7 - Taxas de Aplicação de Fertilizantes.....	98
Tabela A-8 - Energia nos Fertilizantes.....	98
Tabela A-9 - Energia nos Herbicidas.....	99
Tabela A-10 - Utilização de Equipamentos Agrícolas.....	100

Tabela A-11 - Energia na Produção e Manutenção dos Equipamentos	101
Tabela A-12 - Custo Energético dos Equipamentos.....	101
Tabela A-13 - Energia nos Insumos do Setor Industrial.....	106
Tabela A-14 - Energia nas Edificações e Áreas de Serviço.....	107
Tabela A-15 - Energia na Fabricação dos Equipamentos.....	107
Tabela A-16 - Consumo de Energia em Alguns Produtos.....	108
Tabela A-17 - Custo Energético da Destilaria.....	109
Tabela A-18 - Nutrientes em (Kg/100 ton).....	110
Tabela A-19 - Nutrientes retirados, em (kg/ha.ano).....	111
Tabela A-20 - Taxa média anual de aplicação de nutrientes (adubos comprados) em (Kg/ha.ano).....	111
Tabela A-21 - Composição da torta de filtro úmida.....	111
Tabela A-22 - Composição do vinhoto de caldo misto (kg/m <sup>3</sup> )....	112
Tabela A-23 - Situações avaliadas para os casos A e B.....	140
Tabela A-24 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 1.....	141
Tabela A-25 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 2.....	142
Tabela A-26 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 3.....	143
Tabela A-27 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 4.....	144
Tabela A-28 - Propriedades termodinâmicas para determinação da energia mínima de fabricação de álcool.....	149
Tabela A-29 - Composição do bagaço.....	158
Tabela A-30 - Calores específicos médios dos gases de combustão do bagaço.....	158

#### ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do fluxo de açúcares em uma usina de açúcar com destilaria anexa.....	19
--	----

Figura 2	- Variação de $K_m$ (fração de açúcar desviado da fabricação como mel) em função da produção específica de mel e concentração de açúcares totais (% ART)..	21
Figura 3	- Relação entre $K_f$ (fração de caldo destinado à fabricação de açúcar) e $V/Q$ , onde $V$ =volume de álcool produzido, em $[m^3]$ em $[l]$ e $Q$ peso de açúcar cristal produzido, em $[ton]$ ou $[kg]$ .....	22
Figura 4	- Etapas de consumo de vapor em uma usina.....	24
Figura 5	- Condições de equilíbrio nas demandas de vapor vivo (AP) e vapor de escape (BP).....	44
Figura 6	- Variação de índices de excesso de bagaço, consumo de potência e vapor de processo com o teor de fibra de cana.....	45
Figura 7	- Variação da disponibilidade de bagaço em função da fração comercializada de energia elétrica, para a usina do caso 1, com 15 MW de potência instalada, 18500 TCD e 12,29 kWh/TC de consumo.....	48
Figura 8	- Variação do excesso de bagaço em função da fração de caldo desviado para a fabricação de açúcar, para a usina do caso 1.....	51
Figura 9	- Variação do excesso de bagaço em função da relação de produção $l$ álcool/kg açúcar para a usina do caso 21.....	52
Figura 10	- Sistemas adotados para co-geração.....	55
Figura 11	- Ciclos empregados em co-geração.....	56
Figura 12	- Variação de $\beta$ com as condições de operação, para turbina a vapor contra pressão.....	60
Figura 13	- Curva de carga térmica para um processo arbitrário	61
Figura 14	- Sistema de co-geração desequilibrada, com $E > E'$ ....	63
Figura 15	- Situações de transição no aumento de pressão.....	65
Figura 16	- Percursos ótimos no planejamento da safra, para a usina caso 1, com excedentes de bagaço conforme figura 8.....	71
Figura 17	- Percorso ótimo para o planejamento da safra em situação análoga à figura anterior, considerando uma	

redução de 10% na geração de excedente de bagaço ao longo da safra.....	72
Figura 18 - Sacarose no bagaço e extração para uma moenda que incorporou gradativamente tecnologias recentes....	75
Figura 19 - Calor requerido na secagem do bagaço, $Q_s$ , e calor cedido no secador, $Q_c$ .....	82
Figura 20 - Condições de equilíbrio para secagem de bagaço em ciclo fechado.....	83
Figura 21 - Temperatura adiabática de chama na combustão de ba gaço.....	84
Figura A.1 - Fluxo de Macronutrientes.....	113
Figura A.2 - Fluxo energético associado aos fertilizantes.....	113
Figura A.3 - Princípio de Bellman.....	145
Figura A.4 - Etapas fundamentais da fermentação da sacarose....	150

## RESUMO

Este trabalho analisa aspectos energéticos do emprego da cana de açúcar como fonte de energia. Apresenta-se o balanço global de insumos e produtos energéticos na produção de álcool, considerando a energia direta e indireta, associada aos insumos materiais e equipamentos. Em dois cenários tecnológicos para o Estado de São Paulo, obteve-se índices produção/consumo de 6,4 a 9,5 para a energia total e de 8,8 a 12,3 para a energia de origem fóssil. O setor industrial é analisado em detalhes, empregando um modelo computacional de simulação, em que cada etapa de fabricação foi traduzida por equações, com parâmetros e variáveis correspondentes às condições de operação e características dos equipamentos. Foi verificada a coerência de resultados da simulação com casos reais, possibilitando seu emprego em estudos de racionalização energética em usinas, especialmente associados à geração de excedentes de energia elétrica e bagaço. Inclui-se uma abordagem de questões ligadas à co-geração, definindo-se situações de operação e potenciais de oferta energética. Com o objetivo de maximizar a produção de excedentes energéticos ao longo da safra, propõe-se um método baseado na Programação Dinâmica. São avaliadas as tendências de evolução do perfil energético a partir da introdução de novas tecnologias.

## ABSTRACT

An energy balance for the production of alcohol from sugar cane is presented; energy output/input ratios were found to be 6,4 and 9,5 for total energy (for "average" and "best efficiency" sugar mills, in the State of São Paulo, respectively) or 8,8 and 12,3 for fossil fuel-based energy, in the same conditions. A simulation model for the industrial sector was developed, allowing for the detailed energy analysis for different operational conditions. The model was tested against the actual performance of some sugar and alcohol factories, showing good potential for the prediction of bagasse surplus and electric energy production, as well as for energy optimization studies. A method based on dynamic programming is proposed to maximize the energy surplus for the whole production season. The introduction of some new technologies in alcohol production are analysed in connection with the modifications in the energy consumption and production levels and the thermal/mechanical energy balance.

## INTRODUÇÃO

O programa nacional do álcool teve um período de crescimento acelerado, chegando em alguns anos a constituir-se no maior programa em energia alternativa no mundo. A rapidez do crescimento impossibilitou a otimização do sistema produtivo no sentido de tratar a cana de açúcar como um vetor da energia solar, voltado à produção de energia em formas mais diretamente utilizáveis (álcool, bagaço, energia elétrica) de modo mais eficiente. Esta otimização começa a ser analisada hoje, com o reconhecimento do grande potencial existente de co-geração com um combustível barato, da possibilidade de uso externo do bagaço excedente e da própria necessidade de reduzir o consumo de energia intrínseco aos processos de produção do álcool a partir da cana.

Neste trabalho buscou-se analisar a situação atual do setor e suas perspectivas, sob o ponto de vista de aumento da eficiência energética. Um grande esforço foi desenvolvido no sentido de estabelecer uma base de dados significativa em volume e confiável.

A base de dados selecionada para este trabalho, as usinas e destilarias associadas à Copersucar, constitui uma amostra bastante representativa do setor agroindustrial canavieiro em São Paulo, que por sua vez responde por quase metade da produção nacional do álcool. A possibilidade de empregar dados reais de instalações em produção foi essencial para o trabalho.

Inicialmente buscou-se determinar a efetiva relação produção/consumo na obtenção de energia da cana de açúcar. Isto implica em estabelecer uma metodologia coerente, capaz de contabilizar os fluxos e custos energéticos em diversos níveis de regressão. Em segundo lugar foi estudado e modelado o processo industrial, avaliando as relações entre os insumos materiais e energéticos, dentro de condições estabelecidas para projeto e operação dos sistemas. De posse desse ferramental analítico foi possível avaliar o efeito da alteração de parâmetros e variáveis na procura de incrementos de produtividade energética, em uma acepção abrangente, e tentar uma otimização do setor produtivo. Foi então efetuado um breve levantamento do potencial das novas tecnologias, já em implantação ou em desenvolvimento, e suas im

plicações energéticas.

O trabalho está subdividido em três partes, descritas sucintamente a seguir. Na primeira parte, "O sistema atual: análise dos insumos e produtos energéticos nos setores agrícola e industrial", apresenta-se inicialmente os fundamentos metodológicos para a análise energética global da produção de energia de cana de açúcar, conforme conceitos e níveis de desagregação e delimitação de sistemas já amplamente aceitos e empregados em estudos congêneres. A seguir é efetuada uma aplicação desta metodologia para as condições do Estado de São Paulo, conforme dois cenários tecnológicos, considerando no primeiro condições médias, e no segundo incorporando métodos e tecnologias aperfeiçoadas, já disponíveis em algumas usinas. Os resultados obtidos para ambas situações devem refletir com razoável precisão a realidade atual.

Na segunda parte, "Modelagem e Simulação do Setor Industrial", são apresentados a formulação do modelo de simulação do processo de fabricação de álcool e açúcar, com relevo para os aspectos energéticos, e alguns resultados de sua aplicação em distintas configurações de dados. Neste modelo, cada etapa foi traduzida por um conjunto de equações, com base teórica ou empírica, cujos parâmetros e variáveis referem-se às características dos equipamentos e condições de operação. Para facilitar seu uso, os dados de entrada devem ser de obtenção simples e imediata nas usinas. A sequência da simulação é iniciada com a análise do fluxo de açúcares, que posteriormente permite ponderar a análise do fluxo de energia, em que são avaliados sucessivamente a geração, o consumo nos vários níveis de pressão e o balanceamento do vapor. As aplicações efetuadas demonstram sua valia como ferramenta interpretativa do perfil energético da usina, sobretudo para avaliar o efeito de alterações nas etapas produtivas sobre as condições de equilíbrio no balanço de vapor e a geração de bagaço excedente.

A última parte, "Possibilidades de incremento da energia produzida em Usinas de Açúcar e Álcool", contém estudos aplicados em co-geração de energia eletro-mecânica e calor de processo nas usinas, desde uma visão dos conceitos básicos até a análise de situações de transição no aumento de pressão do vapor vivo, visando a autonomia em energia elétrica. A seguir é apre

sentada uma aplicação do Método de Programação Dinâmica para a distribuição das metas de produção ao longo da safra, maximizando a geração de excedentes energéticos. Esta parte finaliza abordando os efeitos da introdução de novas tecnologias, em que se destaca a secagem do bagaço.

PARTE I - O SISTEMA ATUAL: ANÁLISE DOS INSUMOS E PRODUTOS ENERGÉTICOS NOS SETORES AGRÍCOLA E INDUSTRIAL

1. ANÁLISE ENERGÉTICA

1.1. Conceituação

1.2. Terminologia e Convenções

1.3. Métodos usados em Análise Energética

2. BALANÇO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CANA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL NO ESTADO DE SÃO PAULO

2.1. Definição de Cenários Atuais

2.2. Setor Agrícola - Produção de Cana

2.3. Setor Industrial - Produção de Álcool

2.4. Análise de Conjunto e Conclusões

## 1. ANÁLISE ENERGÉTICA

### 1.1 - Conceituação

Análise Energética é o estudo sistemático dos fluxos de energia através de um sistema produtivo, que permite deduzir a quantidade de insumos energéticos requeridos à produção de algum bem, além de identificar e localizar as perdas associadas.

Não existe uma estrutura única para análise de energia. Cada situação requer um método, que objetivamente deve determinar a finalidade do estudo e as convenções adotadas. Há mesmo uma confusão quanto às convenções, daí ser preciso explicitá-las claramente.

Um aspecto essencial na análise energética é a extensão dos limites do sistema analisado. No caso da fabricação do álcool podem ser escolhidos diversos limites, como: a fase industrial (a usina apenas), a fase industrial mais agrícola (a usina e a plantação), a fase industrial e a distribuição (a usina e o transporte); enfim, uma grande variedade.

Também a consideração dos insumos energéticos deve ser objeto de cuidadosa reflexão. Assim, por exemplo, a energia solar pode ou não ser computada, e da mesma maneira, a mão de obra envolvida.

A definição feita acima para análise energética contém uma omissão deliberada: não há menção de uma finalidade. Apenas se descreve a atividade, mas não seus motivos. Isto se justifica, pois a análise em si já é útil, permitindo descrever e compreender o sistema sob discussão, com vistas, por exemplo, a reduzir o consumo de energia. Em síntese, a essência da análise energética é ser uma ferramenta descritiva, que busca mostrar os fluxos energéticos dentro de um sistema. Assim, se uma análise energética mostra que a obtenção de álcool por osmose reversa requer menos energia do que por destilação, não é axiomático que a primeira opção seja melhor; no caso, seria necessário completá-la com uma análise econômica.

As aplicações da análise energética podem ser

agrupadas em 5 áreas de interesse:

1. avaliação das consequências energéticas do emprego de novas fontes de energia e da política energética;
2. identificação de áreas onde a aplicação de técnicas de conservação de energia serão mais interessantes;
3. estimativa do efeito da elevação de preços dos combustíveis;
4. avaliação das consequências energéticas de diferentes políticas de transporte;
5. estudo do uso da energia na agricultura.

Estes usos são descritivos e não prescritivos.

## 1.2 - Terminologia e Convenções

A terminologia básica para análise adotada neste estudo é a do simpósio realizado em Guldsmedshyttan, Suécia, em 1974, patrocinado pela International Federation of Institutes of Advanced Study (IFIAS) [1].

Duas propriedades são utilizadas, basicamente. A primeira é a *entalpia*, que considera a energia intrínseca no sistema, e a segunda é a *exergia*, propriedade definida por Rant em 1956, que considera as irreversibilidades associadas aos processos. A *exergia* é um parâmetro que fornece a máxima disponibilidade de trabalho útil no insumo energético, sendo mais correto seu uso em termos termodinâmicos. Sua aplicação na análise energética é mais difícil, existindo casos práticos em que a diferença entre a entalpia e a *exergia* é pequena ou menor do que a incerteza na obtenção dos valores numéricos.

A fronteira de um sistema a ser analisado energeticamente deve ser delimitada claramente. A análise energética pode ficar restrita apenas à fase industrial da produção de álcool, cujos insumos básicos seriam a cana de açúcar, água, alguns produtos químicos e eventualmente eletricidade. Neste caso, não se considera, por exemplo, a energia embutida na cana de açúcar, consumida na fase agrícola. Para tal, ter-se-ia que alargar o sistema. Outra extensão seria no sentido de se determinar a energia aplicada na montagem e nos equipamentos, e daí verificar

a energia para a fabricação de aço, materiais de construção, etc. Em suma, a fronteira do sistema pode ser estendida indefinidamente, tanto em tempo como no espaço. Sintetizando, podem ser definidos os níveis de regressão, como a seguir:

- nível 1 - Considera-se apenas os insumos de energia direta, aplicados ao estágio final do processo. No caso da fabricação do álcool, seriam considerados apenas o vapor e a eletricidade.
- nível 2 - Em adição ao nível 1, considera-se, para o nível 1, os requisitos energéticos na obtenção de matérias-primas e dos insumos energéticos. Seria o caso de se incluir, no exemplo do álcool, a energia da fase agrícola, a energia gasta nas caldeiras, etc.
- nível 3 - Inclui-se a energia usada na produção dos equipamentos de processo, bem como os requisitos energéticos dos insumos necessários da fase 2. Assim, leva-se em conta a energia necessária para a montagem e construção da usina e a energia consumida na fabricação das caldeiras, a energia gasta com fertilizantes, etc.

Os níveis de regressão vão até o infinito. O enésimo nível inclui a energia embutida no equipamento produtivo do  $(n-2)$  ésimo nível e a energia de fabricação dos insumos materiais do  $(n-1)$  ésimo nível. Na prática, a análise energética é conduzida apenas no nível 1, embora seja importante saber se o efeito dos outros níveis é significativo, para se ficar seguro em que nível parar a regressão. Como as contribuições dos níveis mais elevados tendem a diminuir, é geralmente possível empregar métodos aproximados para a estimativa dos insumos energéticos menos diretos. Por exemplo, certamente é insignificante considerar a energia embutida em uma siderúrgica, para verificar a contribuição energética devida ao aço empregado nas montagens de uma usina de álcool.

O consumo energético calculado para dado sistema é chamado de Consumo Específico de energia (CE), sendo definido como sendo a energia embutida, própria e/ou consumida na fabricação, por unidade de produto. Existem três tipos de Consumo Energético:

A - Consumo Energético de Processo (CEP)

é a soma das energias gastas no nível 1 de regressão;

B - Consumo Energético Bruto (CEB)

é o CEP somado ao poder calorífico superior de todos os insumos que podem servir como combustíveis. É o caso da cana-de-açúcar, do óleo lubrificante, etc.

C - Consumo Energético Líquido (CEL)

é o CEP subtraído do poder calorífico superior dos bens produzidos. Caso o produto seja um combustível, o CEL reflete o uso líquido de energia no processo.

A partir destas definições, pode-se chegar a uma lei, não física, de conservação das exigências energéticas. Não física, na medida em que resulta da definição destes parâmetros. Assim, pode ser estabelecido que a soma das exigências energéticas de todos os insumos de um processo é igual à soma de todas as exigências energéticas dos produtos resultantes deste processo:

$$\sum_{i=1}^n I_i x_i = \sum_{j=1}^m O_j y_j \quad (1.1)$$

onde  $I_i$  é o insumo e  $x_i$  sua exigência energética, e  $O_j$  o produto e  $y_j$  sua correspondente exigência energética.

Quando  $j=1$ , na expressão (1.1), a EE (Exigência Energética) da unidade produzida é simplesmente a soma das EE's dos insumos dividida pela unidade produzida. Porém, quando  $j>1$ , a situação se torna mais complicada. Como alocar as exigências energéticas a diversos produtos? Este processo de "distribuir" as exigências energéticas é chamado de *partição*. Não existe uma maneira sempre correta de efetuar a partição. O método a ser adotado é função de cada processo em particular. Em geral, existem quatro convenções adotadas:

1. atribuir toda a exigência energética ao produto de interesse, e dar aos outros produtos uma exigência nula de energia;
2. distribuir as exigências energéticas em função do valor monetário de cada bem produzido;

3. ponderar os requisitos energéticos dos produtos conforme alguma propriedade física, por exemplo volume, massa, poder calórico, etc.
4. Para os diversos produtos não principais, é sempre possível alocar uma exigência energética substituta, isto é, a exigência energética do mesmo produto não principal, caso fosse produzido por algum método alternativo. Para os demais produtos, os principais, se aplicaria um dos métodos anteriores.

A melhor convenção a ser adotada na partição é a que implica em maior semelhança com a realidade. Em outras palavras, se o sistema é modificado por alguma alteração técnica ou física, o valor da exigência energética deve mudar na direção correta, e em um valor correto. Se a convenção apropriada é usada, então deve ser impossível idealizar uma mudança no processo produtivo que afete inadequadamente a exigência energética.

Alguns comentários podem ser feitos na aplicação desta conceituação à indústria canavieira. Nesta situação tem-se diversos produtos ( $j > 1$ ), por exemplo: açúcar e álcool, que são os produtos principais normalmente, e diversos produtos químicos, bagaço,  $\text{CO}_2$  das dornas de fermentação, restilo, eventualmente e energia elétrica, etc. O problema de alocar a exigência energética bruta, EEB, a cada um destes produtos, não tem solução única e sob alguns aspectos não tem solução. Caso toda EEB seja rateada entre os dois produtos principais, a exigência energética dos demais produtos seria nula. Isto implica em não se considerar as inúmeras oportunidades de aproveitamento dos subprodutos como afetando a EE do açúcar e do álcool. Faz pouco sentido uma convenção de partição energética que exclua o efeito da secagem do bagaço, por exemplo. A aplicação da segunda convenção é relativamente fácil, pois é sempre possível associar algum valor monetário a cada produto. Surgem entretanto algumas dúvidas: os preços refletem o valor dos produtos? Em geral, nunca se conhecem totalmente os custos envolvidos, o que é, aliás, uma motivação para a análise energética. Daí surgirem diversas inconsistências neste método de partição. Caso variem os preços, seja em Cz\$ ou US\$, irão se alterar as EE's, o que não faz sentido.

Na aplicação do terceiro método de partição, é pouco razoável usar a base comparativa idêntica para produtos

com finalidade, estado físico, densidade, etc., diferentes. Não obstante, esta convenção tem menores desvantagens que as anteriores. Quanto à última convenção, embora mais sofisticada na aplicação, é a mais recomendável. Ao se atribuir uma EE substituta, consegue-se uma base comum e aceitável de comparação, não privilegiando alguma propriedade física dos subprodutos. Desta forma, por exemplo, ao bagaço se associaria a EE de obtenção da celulose (caso fosse usado para fabricação de papel) ou a EE de fabricação/preparação de algum combustível sólido vegetal, como a lenha, caso fosse empregado como tal. Ao restilo, se associaria a EE do fertilizante comparável, e assim por diante, sempre em função da utilização potencial de maior interesse, para o subproduto em questão. Quanto aos produtos principais, a convenção a adotar seria inevitavelmente a terceira, alocando a EE restante, possivelmente em função da massa ou do volume.

Ao aplicar-se o último método de partição, está se considerando, de modo subjetivo, o sistema industrial como um todo. Caso a indústria petroquímica melhore seus métodos e reduza a EE dos fertilizante, isto corresponderia a uma elevação da EE de outros produtos, o que é razoável, embora nem sempre seja de interesse. Outro aspecto deste método é a possibilidade de resultar em uma EE negativa para os produtos principais, caso os subprodutos sejam produzidos por alternativas intensivas em energia. Nesta situação, convém verificar se os produtos secundários são efetivamente secundários ou devem ser considerados como principais.

### 1.3 - Métodos Usados em Análise Energética

Visando obter valores para as EE's dos produtos, são empregados três métodos: análise de processos, análise estatística e análise por matrizes insumos-produção. Uma extensa discussão sobre estas metodologias foi desenvolvida por Boustead e Hancock [2].

*Análise de Processos* - a aplicação deste método segue, em linhas gerais, as seguintes etapas:

A - selecionar uma fronteira em torno do processo, operação, sistema, etc., a ser analisado;

- B - identificar e quantificar, em relação ao tempo ou às unidades produzidas, todos os insumos do sistema;
- C - atribuir EE's a todos os insumos;
- D - identificar e quantificar todos os produtos e subprodutos;
- E - empregando alguma convenção, fazer a partição das EE's nos produtos;
- F - aplicar os resultados da análise energética à finalidade em questão: comparar alternativas, determinar a viabilidade de uma fonte energética, calcular os efeitos de uma alteração na política de preços, etc.

Existem algumas dificuldades associadas a este método e que devem ser bem resolvidas. A primeira é a definição adequada da fronteira do sistema. Por exemplo, em que medida o melão é um produto final? Como definir com segurança o volume de melão usado na destilaria? Se o sistema analisado é uma usina de açúcar com destilaria anexa, possivelmente o melão nem seja considerado na partição energética. O segundo problema está na necessidade de se obter valores confiáveis para as EE's dos insumos. Não faz sentido estender "ad infinitum" a análise energética, e, na maioria dos casos, para insumos de menor importância, é aceitável um método aproximado. Atualmente, quando grande parte dos materiais e processos já foram objeto de alguma análise energética, o trabalho suplementar para a análise de processos reduziu-se bastante. Um terceiro obstáculo para a análise de processos é a identificação e quantificação dos insumos. Por exemplo, na fase industrial de fabricação de álcool a partir da cana de açúcar, qual a energia gasta em transporte, no interior da destilaria? É significativa a energia despendida nos laboratórios e escritórios?

Apesar dos problemas apontados, a análise de processos é o único método que impõe um conhecimento do processo tecnológico que ocorre no sistema. Como tal, deve possuir boa aderência à realidade. Neste método está implícita uma teoria de valor energético, o que deve ser ponderado. Nem todos os insumos são passíveis de uma substituição direta por parâmetros energéticos e um exemplo é a mão-de-obra, insumo que requer cuidadosa consideração. Este será o método adotado neste trabalho para a análise energética da produção de álcool.

*Análise Estatística* - este método emprega os levantamentos estatísticos para a obtenção das EE's. Desta forma, dependendo do universo considerado, pode dar desvios consideráveis. Certamente a realidade nas usinas do Nordeste é bem diversa do Sudeste, e um levantamento, em bases nacionais, do consumo de energia na indústria açucareira, seria de pouco interesse para a análise energética. Quando forem aceitáveis resultados aproximados, o método estatístico pode ser empregado, de modo simples e direto. É o caso da obtenção das EE's para alguns insumos sem grande relevância, por exemplo lubrificantes ou alguns produtos químicos, em indústria canavieira.

*Análise Insumos-Produção* - adaptado das matrizes propostas por Leontief para análise macroeconômica, este método permite, de modo elegante e matematicamente correto, determinar a quantidade de energia que "flui" nas indústrias e a contribuição relativa de cada ramo de atividade, por conseguinte cada tipo de insumo, para uma indústria considerada. A grande desvantagem deste método é a excessiva generalização, ainda que permita um nível infinito de regressão na análise energética.

Como conclusão acerca dos métodos, pode-se afirmar que os dois últimos sempre serão técnicas aproximadas e provavelmente melhor utilizadas como uma ajuda à análise de processos.

## 2. BALANÇO DE ENERGIA NA PRODUÇÃO DE CANA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL NO ESTADO DE SÃO PAULO

### 2.1 - Definição de Cenários Atuais

O objetivo deste estudo é verificar, nas condições atuais de produção no Estado de São Paulo, o consumo de energia oriunda de petróleo necessário para a produção de álcool. A avaliação é feita para todo o processo (produção de cana e produção de álcool) e envolve todas as formas de energia, não apenas a de petróleo. Os dados utilizados são de cerca de 70 Usinas da Copersucar, responsáveis por 40% da produção de álcool no Brasil. Este capítulo já foi publicado em trabalho anterior dos autores [3].

Mesmo com a restrição regional, os procedimentos, condições e valores consequentes são diferentes de unidade para unidade e, em muitos casos, os desvios em relação à média são significativos. São analisadas duas situações: uma delas (Cenário 1) é baseada nas médias de consumo de energia, insumos e investimentos, e a outra (Cenário 2) é baseada nos melhores valores praticados (valores mínimos de consumo, com o uso da melhor tecnologia existente e praticada na região). Desta forma pensamos retratar bem a situação atual; não se considera tecnologias em desenvolvimento ou desenvolvidas, mas não utilizadas em grau significativo.

Os dados são considerados em três níveis, refletindo maior ou menor detalhamento na análise energética, para facilitar a comparação com outros estudos, conforme discutido no capítulo anterior.

Nível 1 - Considera-se apenas os combustíveis consumidos ou energia elétrica adquirida (insumos energéticos diretos).

Nível 2 - Acrescenta-se a energia necessária à produção de outros insumos para a lavoura ou processo industrial (fertilizantes, calcário, mudas, ácido sulfúrico, lubrificantes etc.).

Nível 3 - Acrescenta-se a energia necessária para a produção e

manutenção de equipamentos e instalações; é quantificada a mão-de-obra.

## 2.2 - Setor Agrícola - Produção de Cana

Na produção de cana-de-açúcar, os três níveis de consumo energético considerados são:

- Nível 1 - Combustíveis nas operações agrícolas e transporte da cana;
- Nível 2 - outros insumos: fertilizantes, calcáreo, herbicidas, inseticidas, mudas;
- Nível 3 - energia para a produção e manutenção de equipamentos, mão-de-obra.

Para o Nível 1 (combustíveis), os consumos de energia associados ao combustível (diesel) podem ser computados no valor energético do diesel (PCI=9.235 kcal/l mais 2.179 kcal/l para produção, transporte e processamento, [4]): 11.414 kcal/l. Observamos, no entanto, que se o objetivo final é verificar a fração de autoconsumo de energia de mesma qualidade na produção de álcool, o diesel na forma final deve ser considerado com o valor de PCI.

O resumo dos resultados, para os três níveis e dois cenários é apresentado na Tabela 1. Não se faz distinção entre formas de energia. O detalhamento da análise energética consta do Apêndice 1 deste trabalho, onde se fornecem dados adicionais da contabilização das exigências energéticas para cada cenário. Os valores são apresentados referidos a toneladas de cana (TC).

Tabela 1 - Consumo de Energia na Produção de Cana

Nível		Consumo de Energia			
		Cenário 1		Cenário 2	
		kcal/TC	%	kcal/TC	%
1	Combustível	8.840	17	6.300	13
	Op. agrícola e colheita Transporte	13.770	26	10.980	23
	Subtotal	22.610	43	17.280	36
2	Fertilizantes	16.550	31	15.480	33
	Calcáreo	1.620	3	1.620	4
	Herbicidas	2.690	5	3.490	7
	Inseticidas	190	-	190	-
	Mudas	1.940	4	1.730	4
	Subtotal	22.990	43	22.510	48
3	Equipamentos	5.570	10	5.570	12
	Mão-de-obra	1.880	4	1.880	4
	Subtotal	7.450	14	7.450	16
	TOTAL	53.050	100	47.240	100

### 2.3 - Setor Industrial - Produção de Alcool

Na industrialização da cana-de-açúcar, para a produção de álcool, há três fatores que devem ser considerados no custo energético total:

Nível 1 - a aquisição de energia elétrica;

Nível 2 - a energia necessária para a produção dos insumos para o processo industrial é acrescentada (produtos químicos, lubrificantes);

Nível 3 - acrescenta-se a energia para a construção das edificações e equipamentos industriais e sua manutenção.

O resumo dos resultados, para os três níveis e dois cenários é apresentado na Tabela 2, sem distinção entre formas de energia.

Tabela 2 - Consumo de Energia na Produção do Alcool

Nível		Consumo de energia	
		Cenário 1	Cenário 2
		kcal/TC	kcal/TC
1	Energia elétrica	3.000	0
	Subtotal	3.000	0
2	Produtos químicos e lubrificantes	1.570	1.570
	Subtotal	1.570	1.570
3	Edificações	3.390	2.260
	Equipamentos pesados	4.120	2.750
	Equipamentos leves	4.690	3.130
	Subtotal	12.200	8.140
	TOTAL	16.770	9.710

Conforme notado no balanço energético do setor, há uma produção de excedentes de energia, como bagaço, que será considerada na análise do conjunto, correspondendo a 41.900 kcal/TC (Cenário 1) ou 78.600 kcal/TC (cenário 2). Os detalhes da análise energética realizada constam do Apêndice 2.

#### 2.4 - Análise do Conjunto de Conclusões

Associando-se as avaliações anteriores, agrícola e industrial, tem-se os seguintes resultados:

Tabela 3 - Uso e Geração de Energia (Agrícola e Industrial)

	Cenário 1		Cenário 2	
	Insumo energético kcal/TC	Produção kcal/TC	Insumo energético kcal/TC	Produção kcal/TC
Setor agrícola	53.050		47.240	
Setor industrial	16.770		9.710	
Alcool		408.400		464.300
Bagaço		41.900		78.600
TOTAL	69.820	450.000	56.950	542.900
Produção/Insumo	6,4		9,5	

A relação produção/consumo representa, de forma agregada, a energia obtida no álcool e bagaço por unidade de energia externa utilizada no processo.

É interessante considerar a participação de energia importada (óleo combustível e diesel principalmente), na obtenção do álcool; os valores apresentados na Tabela 3 estão agregados, mas é possível estimar separadamente os componentes. Essencialmente, interessa retirar do total as parcelas de hidroeletricidade, lenha, etc.

Para o setor agrícola, além do item combustível (Nível 1), desagregam-se os insumos para fertilizante, calcário e herbicidas. Uma análise aproximada pode ser feita para equipamentos (ver o setor industrial). Os resultados indicam que para todo o setor a energia de origem fóssil corresponde com cerca de 78% do consumo total, levando aos números da Tabela 4.

Tabela 4 - Uso de Energia Fóssil e Geração de Energia

	Cenário 1		Cenário 2	
	Insumo de energia fóssil kcal/TC	Produção kcal/TC	Insumo de energia fóssil kcal/TC	Produção kcal/TC
Setor agrícola	41.370		36.850	
Setor industrial	10.000		7.260	
Álcool		408.400		464.300
Bagaço		41.900		78.600
TOTAL	51.340	450.300	44.110	542.900
Produção/insumo fóssil (1)	8,8		12,3	
Álcool/insumo fóssil (2)	8,0		10,5	
Litros álcool/litros de diesel totais (3)	16,3		21,4	

- (1) Produção total (kcal no álcool e bagaço excedente) por unidade de energia fóssil (óleo combustível, diesel, carvão metalúrgico) utilizada.
- (2) Energia no álcool produzido (PC=5.594 kcal/l) por unidade de energia fóssil (óleo combustível, diesel, carvão metalúrgico) utilizada.
- (3) Álcool com PC=5.594 kcal/l; litros de "diesel óleo combustível" considerados no seu valor energético final (PC + extração, processamento e transporte).

Para o setor industrial, exclui-se o Nível 1 (energia elétrica), mantém-se 80% do total do Nível 2 como sendo

de origem fóssil (insumos químicos e lubrificante); valores de 70% do total de equipamentos foram atribuídos a óleo combustível, coque e carvão metalúrgico (indústria metalúrgica) e 75% do total de edificações foi atribuído a óleo combustível (baseado em valores desagregados da indústria de cimento [5]). Os resultados constam na Tabela 4.

O balanço de energia na produção de cana tem sido realizado por alguns pesquisadores no Brasil e exterior; é interessante notar alguns resultados. Poucos têm incluído o setor industrial e a produção de álcool. A Tabela 5 apresenta resultados; é considerada a energia total (agregada) em diversas formas.

Tabela 5 - Energia Gerada/Energia Utilizada, Vários Estudos

Referência	Energia Gerada/ Energia Utilizada	Comentários
Este Estudo	6.4 a 9.5	Agrícola e Industrial
IPT [6]	6.7	Agrícola e Industrial
Yegiantz [7]	7.7	Agrícola e Industrial
Goldemberg [8]	5.2	Agrícola
Borzani [9]	5.1	Agrícola
Castanho Filho [10]	2.7	Agrícola
No exterior:		
Taiwan [11]	2.12	Agrícola
Louisiana [12]	2.22	Agrícola

É possível identificar a origem dos valores muito baixos no caso dos EUA e Taiwan: no primeiro caso a alta taxa de adubação e mecanização, e no segundo o custo energético atribuído a fertilizantes parece extremamente elevado. O resultado apresentado pela IEA é baseado em um consumo de óleo diesel (estimado) muito acima dos valores reais medidos hoje. Nos outros casos as diferenças entre estimativas de consumo explicam as diferenças observadas.

O uso de valores medidos, e sobre uma grande parcela da produção do Estado, dá um grau de confiança muito grande aos resultados deste estudo.

Deve-se lembrar ainda que os valores apresentados são resultados de medidas sobre a situação atual (tanto a média, Cenário 1, quanto os melhores casos, Cenário 2). Nas condições atuais de São Paulo, a relação produção/consumo de energia na produção de álcool é de 6,4 a 9,5 (energia total) e de 8,8 a 12,3 (energia produzida/energia fóssil utilizada). Estes valores são muito altos quando comparados a outras culturas planejadas para fins energéticos ou mesmo à própria cultura de cana-de-açúcar em outras regiões. No entanto, o potencial existe para melhorar significativamente estes resultados com o desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias (previsíveis) nos setores agrícola e industrial.

A importância energética do reciclo de nutrientes para o solo, através do aproveitamento de subprodutos como a torta de filtro e restilo na lavoura pode ser observada no Apêndice 3, em que o balanço energético evidencia o interesse da complementaridade dos setores agrícola e industrial.

## PARTE II - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SETOR INDUSTRIAL

### 3. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA NAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

#### 3.1. Análise do Fluxo de Açúcares

#### 3.2. Análise do Fluxo de Energia

3.2.A - Bloco 1 - Geração de vapor

3.2.B - Bloco 2 - Consumo de vapor vivo

3.2.C - Bloco 3 - Consumo de vapor vegetal

3.2.D - Bloco 4 - Consumo de vapor de escape

3.2.E - Bloco 5 - Balanço de vapor

3.2.F - Bloco 6 - Índices auxiliares

#### 3.3. Arquivo de Dados e Saídas de Resultados

### 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM O MODELO COMPUTACIONAL EM DISTINTAS CONFIGURAÇÕES DE DADOS

4.1. Condições de Equilíbrio nas Demandas de Vapor Vivo e Vapor de Escape

4.2. Variação da Disponibilidade de Bagaço

4.3. Alterações no Processo com Efeito no Balanço de Vapor

4.4. Variação da Relação de Produção: Açúcar/Álcool

4.5. Produção de Bagaço Excedente Durante a Safra

### 3. ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA NAS DIVERSAS ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para analisar os fluxos energéticos no setor industrial de produção de álcool adotou-se como ferramenta a simulação computacional, onde cada etapa foi traduzida por um conjunto de equações que relacionam o seu consumo de energia térmica e mecânica a partir das variáveis operacionais e de projeto do equipamento industrial associado. O programa de simulação deve ter flexibilidade para poder considerar os diversos casos que ocorrem na realidade da indústria sucro-alcóoleira, sem contudo requerer dados de difícil obtenção ou pouco generalizáveis. Nesse sentido foi desenvolvido um programa auxiliar de propriedades termodinâmicas do vapor, nos campos saturado e superaquecido, permitindo a imediata determinação de valores de entalpia, entropia, consumo de vapor em turbinas, título na saída de turbinas, etc., sem uma tediosa consulta a tabelas e diagramas.

A construção de um modelo deste tipo é de grande valia na análise, e diversos dados requeridos já estão disponíveis, com fabricantes ou na literatura. Contudo, ainda não se dispunha de um conjunto coerente para simular adequadamente os equipamentos e processos utilizados no Brasil. Boa parte do trabalho foi dedicada a obter estes dados, discutir e avaliar o seu uso com técnicos do CTC-Copersucar, e finalmente implementar o programa.

#### 3.1 - Análise de Fluxo de Açúcares

A produção de álcool é efetuada em destilarias autônomas ou anexas a usinas de açúcar. No último caso, que constitui a situação mais comum e responsável pela maior parte do álcool produzido no Brasil, o caldo oriundo da moagem atende simultaneamente à produção de açúcar e álcool. Conforme mostra a figura a seguir, após a extração, o fluxo de caldo é dividido entre a fabricação e a destilaria. O material destinado à fabricação de açúcar também é dividido, já que o mel residual na centrifugação é enviado para a produção de álcool.

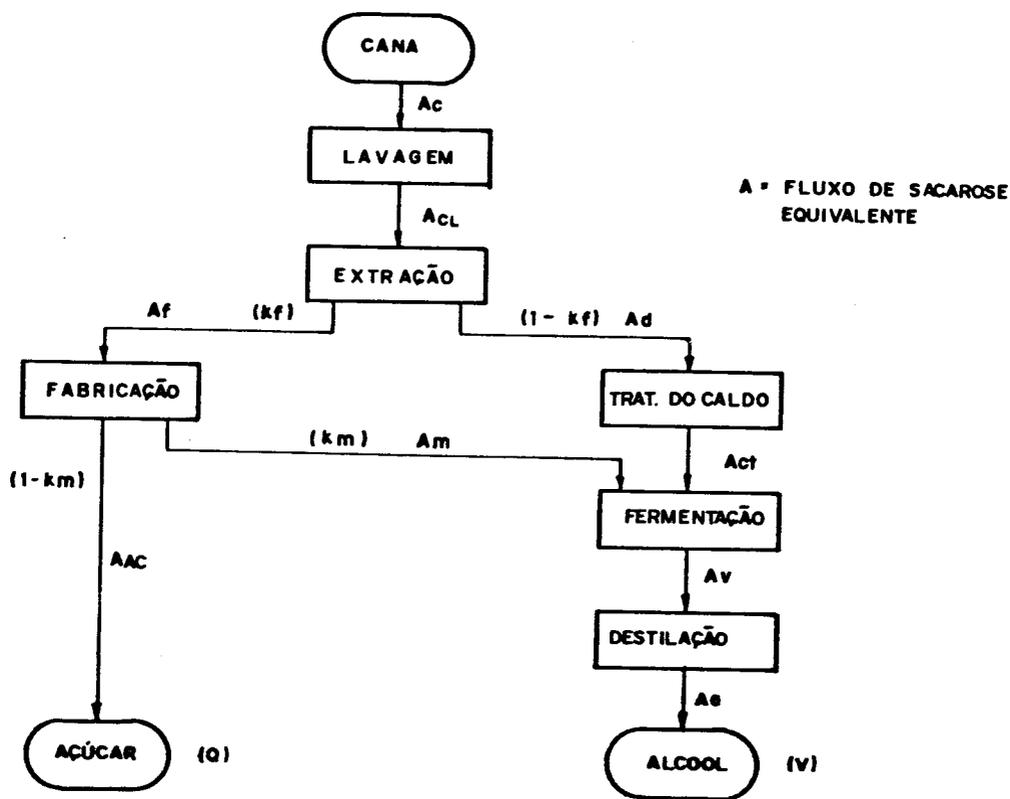


Figura 1 - Esquema do fluxo de açúcares em uma usina de açúcar com destilaria anexa (Macedo [13])

Atualmente as frações  $K_f$ , de caldo desviado para a fabricação, e  $K_m$ , de mel desviado para a destilaria, não são medidas; no entanto, seu conhecimento é indispensável para o balanço energético. Assim, devem ser feitas estimativas destas frações, mesmo aproximadas.

As estimativas para  $K_f$  e  $K_m$  constituem o primeiro bloco de cálculos no programa de simulação do setor industrial e estão baseadas em um trabalho de Macedo [13] sobre a eficiência industrial na produção de álcool e açúcar, onde podem ser obtidos detalhes do desenvolvimento analítico. Um resumo é apresentado em seguida.

Assumindo ou, quando viável, calculando as eficiências intermediárias para cada setor (em termos das perdas de sacarose equivalente) e convertendo todos os insumos e produtos em termos também de sacarose, tem-se que:

$$K_m = \frac{F_m}{F_m + 1} \quad (3.1)$$

onde:  $K_m$  - fração de açúcar desviado da fabricação como mel;

$F_m$  - produção específica de mel, em kg de açúcar total no mel por kg de açúcar produzido.

$$K_f = \frac{R_t R_{fe} R_{de}}{R_{fe} R_{de} (R_t - K_m R_f) + V/QF_2 (1 - K_m) R_f} \quad (3.2)$$

e para  $R_t = R_f$ :

$$K_f = \frac{R_{fe} R_{de}}{(1 - K_m) (R_{fe} R_{de} + V/QF_2)} \quad (3.3)$$

onde:  $K_f$  - fração de caldo enviado para a fabricação de açúcar e HTM (high test molasses);

$V$  - produção de álcool (100%) no período, em  $m^3$ ;

$Q$  - produção de açúcar (como sacarose), em ton;

$F_2$  - relação álcool/sacarose, é igual a  $0,6817m^3$  álcool/ton. sacarose;

$R_t$  - rendimento em açúcares no tratamento do caldo da destilaria e dado por:

$$R_t = \frac{A_{ct}}{A_d} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.4)$$

$R_f$  - rendimento em açúcares na fabricação de açúcar e dado por:

$$R_f = \frac{(A_{ac} + A_m)}{A_f} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.5)$$

$R_{fe}$  - rendimento em açúcares na fermentação, onde o álcool do vinho deve ser convertido em sacarose equivalente, e dado por:

$$R_{fe} = \frac{A_v}{(A_m + A_{ct})} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.6)$$

$R_{de}$  - rendimento em álcool na destilação, dado por:

$$R_d = \frac{A_a}{A_v} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.7)$$

Adotando-se valores típicos de eficiências setoriais, onde  $R_{fe}=0,90$ ;  $R_{de}=0,98$ , e empregando as expressões (3.1) e (3.3) é possível obter-se os gráficos a seguir, que fornecem os campos de variação de  $K_m$  e  $K_f$ , em função de algumas características operacionais das usinas com destilaria anexa.

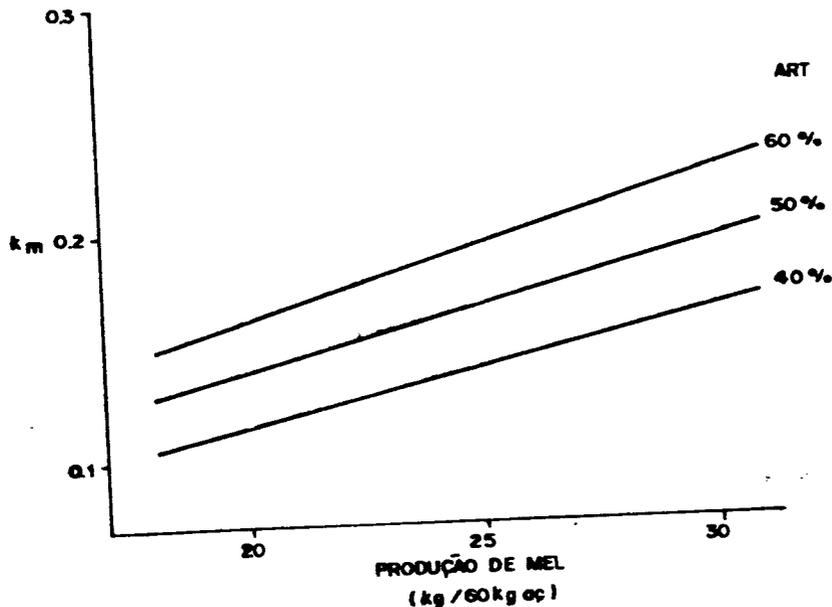


Figura 2 - Variação de  $K_m$  (fração de açúcar desviado da fabricação como mel) em função da produção específica de mel e concentração de açúcares totais (% ART)

Uma verificação da existência de erros significativos nas eficiências setoriais arbitradas para a determinação de  $K_f$  pode ser obtida comparando-se a eficiência industrial calculada pela entrada e saída de sacarose equivalente total na usina com a eficiência determinada como um produto ponderado das eficiências setoriais. Assim trata-se de comparar  $\epsilon_{i1}$  e  $\epsilon_{i2}$  da dos abaixo:

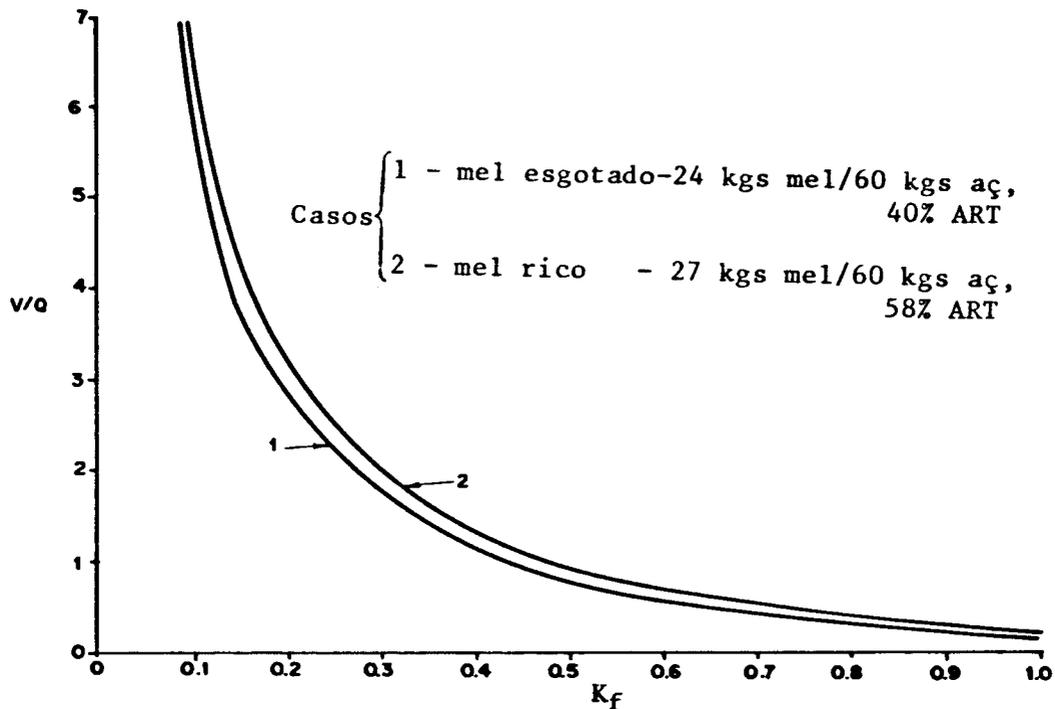


Figura 3 - Relação entre  $K_f$  (fração de caldo destinado à fabricação de açúcar) e  $V/Q$ , onde  $V$ =volume de álcool produzido, em  $[m^3]$  ou  $[l]$  e  $Q$  peso de açúcar cristal produzido, em  $[ton]$  ou  $[kg]$

$$\epsilon_{i1} = \frac{Q + 1,467V + OP}{S_c(1+i)} \quad (3.8)$$

onde:  $S_c$  - sacarose entregue na cana, em ton;

OP - sacarose equivalente a outros produtos (mel, HTM), em ton;

$i$  - fração de açúcares redutores (AR) do total de açúcares como sacarose na cana; esta relação não é medida normalmente, mas as medições efetuadas do quociente dos teores de hexoses (frutose + glicose) pelo teor de sacarose ficam ao redor de 3%, para as canas avaliadas em São Paulo.

$$\epsilon_{i2} = R_e(1-P_e) \{K_f R_f(1-K_m) + R_{fe} R_{de}(1-K_f) R_t + R_f K_f K_m\} \quad (3.9)$$

onde:  $R_e$  - rendimento em açúcares na extração, dado por:

$$R_e = \frac{(A_f + A_d)}{A_{c\ell}} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.10)$$

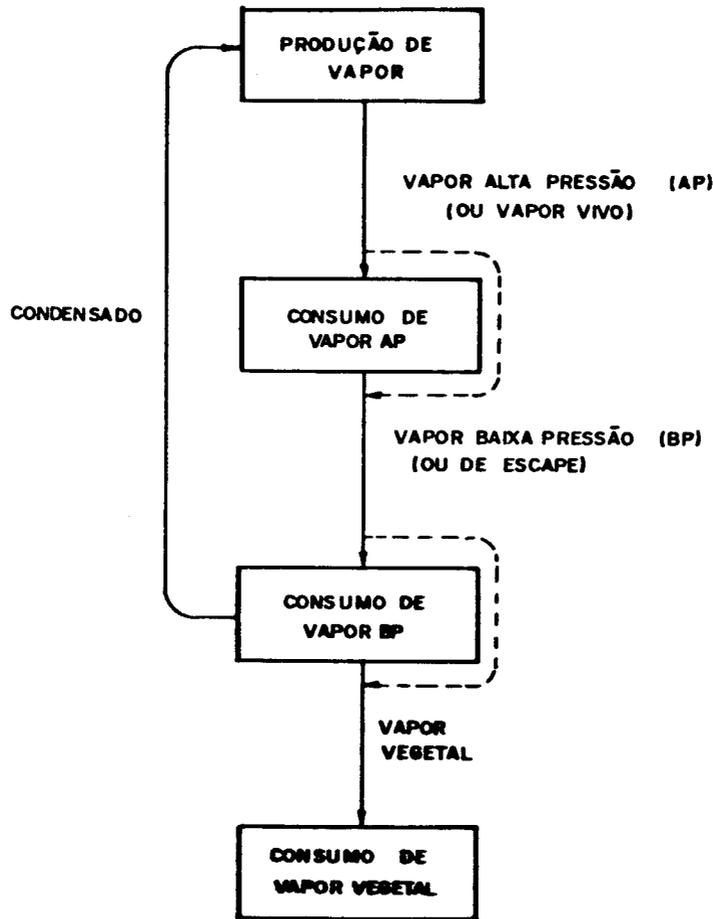
$P_\ell$  - fração de açúcares perdida na lavagem da cana, e dada por:

$$P_\ell = 1 - \frac{A_{c\ell}}{A_c} \quad (\text{vide figura 1}) \quad (3.11)$$

### 3.2 - Análise do Fluxo de Energia

Para todas as necessidades de energia do setor industrial a demanda é satisfeita com o uso de vapor, em diversos níveis de pressão, e de eletricidade. Contudo, a energia elétrica consumida tem duas origens possíveis: é comprada da concessionária ou é gerada pela própria indústria, também a partir de vapor. Portanto, em última análise, o vapor é o vetor energético básico, em usinas e destilarias. Pode-se em parte traduzir a eficiência energética de uma usina por seu excedente de bagaço, índice que depende das diversas eficiências setoriais de produção e utilização de vapor. Outro parâmetro significativo da condição energética de uma usina é seu balanço de vapor, isto é, a relação entre o consumo e a disponibilidade nos diversos níveis de pressões em que o vapor é consumido. Assim, adotou-se a análise detalhada da geração e consumo do vapor para fundamentar o estudo da utilização de energia.

Em uma usina produzindo simultaneamente açúcar e álcool, pode ser identificada uma sequência em quatro etapas para o fluxo de vapor, dada na Figura 4. Enquanto as 3 primeiras etapas estão diretamente associadas, tal como um ciclo termodinâmico fechado, onde o fluido operante, água, circula como vapor e condensado, a última etapa consome o denominado vapor vegetal. Este vapor é produzido no pré-evaporador ou no primeiro corpo de múltiplo efeito, que consome vapor de baixa pressão e efetua a primeira concentração do caldo. O vapor vegetal tem pressão infe



*Figura 4 - Etapas de consumo de vapor em uma usina*

rior ao de baixa pressão, dependendo das condições de saturação em que se realiza a evaporação inicial.

É importante esta introdução, já que esta disposição determina o esquema de cálculo dos consumos de vapor e do balanceamento. O programa de simulação, cujo equacionamento é descrito a seguir sucintamente e em sua versão mais elementar, busca quantificar inicialmente a potencialidade de geração de vapor e o consumo de vapor AP. Desenvolve-se então os cálculos associados ao consumo de vapor vegetal, que deve ser sangrado do pré-evaporador para atender às demandas no aquecimento e destilaria, mais o consumo na evaporação no múltiplo efeito. Desta forma se determina o consumo de vapor BP no pré-evaporador, que deve ser limitado também pela condição operacional, como o volume de caldo e as concentrações na entrada e saída.

A análise prossegue com a determinação do consumo de vapor BP nos demais setores, e conclui com o balanceamento geral da usina. Portanto, existem dois balanceamentos de vapor, calculados entre a disponibilidade e a oferta em um determinado nível de pressão: primeiro, entre as duas últimas etapas da figura 4, a nível de vapor vegetal e depois para as três primeiras etapas, a nível de vapor AP e BP. Na situação em que a disponibilidade é menor que o consumo total, definido pela soma do consumo nos equipamentos mais as perdas, é necessário expandir-se vapor do nível superior de pressão, conforme representado pelas linhas tracejadas na figura 4. Por outro lado, na situação em que a disponibilidade é maior que o consumo, tem-se um excedente, que geralmente vai para a atmosfera e é perdido.

No caso de vapor de alta pressão a possibilidade de excedente corresponde a um consumo de vapor real menor que a disponibilidade e portanto a um excedente de bagaço, que é o combustível empregado nas caldeiras. Caso o bagaço disponível não atenda à demanda na caldeira, é preciso compensar a falta de vapor, geralmente com a complementação via energia elétrica comprada.

Dentro do programa de simulação, a análise do fluxo de energia é desenvolvida em 5 blocos, dados a seguir:

- Geração de vapor
- Consumo de vapor vivo (alta pressão)
- Consumo de vapor vegetal
- Consumo de vapor de escape (baixa pressão)
- Balanceamento

### 3.2.A - Bloco 1 - Geração de Vapor

#### A.1 - Bagaço

- a) Produção de bagaço "in natura", por tandem  
(I), (kgb/h)

$$PBGN(I) = CDIA.FIBRA \cdot \frac{1000}{24} \left( \frac{100}{100-POL-UM-CZ} \right) \quad (3.12)$$

onde: CDIA - moagem diária do tandem, (TC/dia)  
 FIBRA - fibra média na cana moída, (-)  
 POL - teor médio em sacarose no bagaço, (%)  
 UM - teor médio de umidade no bagaço, (%)  
 CZ - teor médio de cinzas no bagaço, (%)

b) Produção total de bagaço, (kgb/h)

$$PBGT = \sum^{ntand} PBGN(I) \quad (3.13)$$

onde: ntand - número de tandens de moagem, (-)

c) Índices auxiliares

Podem ser determinados ainda outros índices, como a produção de bagaço com 50% de umidade, produção de bagaço seco (0% de umidade) e os teores médios de umidade, POL e cinzas, ponderados entre os diversos tandens.

## A.2 - Produção de Vapor

a) Características do bagaço

As características do bagaço queimado podem ser dadas conforme outras especificações, na hipótese de se queimar um bagaço anteriormente armazenado ou processado em secadores.

b) Análise das caldeiras

A análise das caldeiras é efetuada dentro da metodologia sugerida por Hugot [14]. Para cada caldeira é determinada a eficiência térmica referida ao PCI do bagaço e a taxa de produção de vapor por kg de bagaço, a partir de informações como temperatura e pressão do vapor, temperatura de saída dos gases, temperatura de entrada do ar, temperatura de entrada da água, excesso de ar na combustão e coeficientes de avaliação da operação. Estes coeficientes, ainda que subjetivos, são requeridos para a determinação da fração de não combustos, segundo a equação empírica:

$$XNQ = 0,001 (10 - AVAOPR) \quad (3.14)$$

onde: AVAOPR - nota de avaliação da operação; para operação muito folgada adotar 10, para operação sobrecarregada adotar 0, ou outro valor entre 0 e 10, em função das condições de operação.

O programa de dados que alimenta o programa de simulação apresenta os diversos casos possíveis de operação e projeto de caldeiras, auxiliando e verificando a coerência dos parâmetros. Por exemplo, no caso em que não se dispõe de medidas do excesso de ar na combustão, o programa de dados fornece as faixas de variação típicas deste parâmetro para alguns tipos de sistema de queima de bagaço: fornalha ferradura, grelha móvel e queima em suspensão.

Os resultados para cada caldeira são ponderados em função da capacidade instalada em kg de vapor por hora, fornecendo os valores médios da eficiência das caldeiras e da produtividade de vapor por kg de bagaço. Com este último parâmetro e com a produção de bagaço tem-se diretamente a produção máxima de vapor, em kg de vapor por tonelada de cana moída.

Para o poder calorífico inferior (PCI) para o bagaço adotou-se a expressão abaixo, segundo resultados do CTC - Copersucar [15];

$$\text{PCI} = 4250 - 48,5\text{UM} - 12,0\text{POL} \text{ (kcal/kg)} \quad (3.15)$$

### 3.2.B - Bloco 2 - Consumo de Vapor Vivo

#### B.1 - Preparo da Cana

##### a) Potência exigida nos picadores. (CV)

Quando o número de picadores é maior que 1, tem-se que o primeiro picador é efetivamente um nivelador, seguido de picadores de fato. A partir da potência instalada, considerando um fator de segurança de 1,5 e um teor médio de fibra na cana, é possível estimar-se as seguintes potências específicas, conforme dados médios adotados no CTC - Copersucar:

- nivelador - 10,5 CV/ton. de fibra por hora
- picador - 18,7 CV/ton. de fibra por hora

A partir da moagem e do teor de fibra da cana,

pode-se obter diretamente a potência, baseando-se nos coeficientes anteriores.

b) Potência exigida nos desfibradores, (CV)

Os desfibradores devem ser classificados em função de sua velocidade periférica, que é o fator determinante da potência a ser instalada. Adotando-se novamente um fator de segurança igual a 1,5, tem-se os seguintes valores de potência específica, também avaliados segundo aplicações reais desenvolvidas pelo CTC - Copersucar,

- desfibrador tipo tradicional (ex.: Copersucar COP-6)  
velocidade periférica - 60 m/s — 2,7 CV/TC hora
- desfibrador tipo rápido (ex.: COP-10, ou DH-1)  
velocidade periférica - 90 m/s — 4,3 CV/TC hora

Com estes coeficientes e a moagem, determina-se a potência exigida.

c) Potência total exigida no preparo, (CV)

É dada pela soma da potência requerida pelos picadores e pelos desfibradores. Ainda que os índices adotados tenham sido fornecidos pelo CTC - Copersucar, a partir de estudos próprios, estão dentro da faixa sugerida pela literatura [14].

d) Consumo de vapor no preparo, (kgv/h)

Foi desenvolvida uma subrotina, STRATE, que determina o consumo específico de vapor, em (kgv/CVh), e o título de saída do vapor, para turbinas sem extração, a partir da temperatura e da pressão do vapor na entrada, a pressão na saída, a eficiência isentrópica da turbina e a eficiência mecânica do reductor associado. A eficiência adotada para os redutores é 98% e conforme estudos do CTC. Copersucar, para turbinas a vapor de um estágio, roda Curtis, a eficiência isentrópica fica ao redor de 47%. Dependendo da adequada regulagem das moendas, possibilitando a operação com um fator de carga elevado, da ordem de 85% e na rotação nominal da turbina, a eficiência isentrópica pode chegar a 52%. Com os dados médios de operação das turbinas, e a potência exigida no preparo, é possível, através da subrotina STRATE, determinar o consumo de vapor no preparo.

## B.2 - Moagem da Cana

### a) Potência exigida nas moendas, (CV)

Após uma cuidadosa dedução, Hugot [14] chegou à expressão simplificada para a determinação da potência absorvida por terno da moenda:

$$P_{\text{moenda}} = \mu \cdot \phi_r \cdot F_H \cdot n \quad (3.16)$$

onde:  $P_{\text{moenda}}$  - potência requerida na moagem, (CV)

$\mu$  - coeficiente experimental, dado na expressão (3.17)

$\phi_r$  - diâmetro dos rolos, (m)

$F_H$  - força hidráulica total, (kgf)

$n$  - rotação, (rpm)

O valor da força hidráulica é facilmente obtido a partir do diâmetro do pistão hidráulico e da pressão regulada para o sistema oleodinâmico correspondente. Para o coeficiente  $\mu$  deve ser esperada uma variação em função da pressão na camada de bagaço, por sua vez dependente da pressão no pistão hidráulico. Analisando-se uma grande quantidade de estudos experimentais em moendas (1º terno), realizados pelo CTC - Copersucar, ajustou-se a curva a seguir:

$$\mu = 0,27635 - (3,2148 \times 10^{-4})P \quad (3.17)$$

para valores de pressão (P) dados em (kgf/cm<sup>2</sup>). O coeficiente de correlação entre os pontos experimentais e a reta é de 0,98. É interessante observar que a expressão acima, quando resolvida para valores de pressão usuais nos anos em que Hugot desenvolveu sua expressão, leva a  $\mu=0,20$ , que é exatamente a constante sugerida por este autor. O valor da expressão (3.17) aplica-se ao primeiro terno de moendas; para as demais, considera-se uma redução de 10%, analogamente a Hugot.

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

b) Consumo de vapor na moagem, (kgv/h)

É dado de forma semelhante ao caso do preparo da cana, com o auxílio da subrotina STRATE.

c) Índices auxiliares

São determinados, com finalidade comparativa, índices de consumo de potência, em (CV/TCH), para o preparo, para a moagem e para ambas operações, referidos a cada tandem e para toda a usina em questão.

### B.3 - Geração de Energia Elétrica

a) Potência exigida nos turbogeradores, (CV)

O CTC - Copersucar tem avaliado sistematicamente o consumo de energia elétrica nas usinas cooperadas, (kWh/TC) índice disponível para cada usina ou em valor médio para cada grupo de usinas, em função do porte e volume de moagem [16]. Com este índice e com a fração comprada de energia elétrica da moagem média da usina é possível obter a potência requerida. São adotados implicitamente rendimentos de 98% no redutor de velocidade e 94% no gerador elétrico.

b) Consumo de vapor nos turbogeradores, (kvg/h)

É empregada a subrotina STRATE, aplicada nas condições efetivas de operação de cada grupo turbogerador em uso. O consumo específico de vapor, em (kgv/CVh) é ponderado entre os grupos da casa de força em função de sua potência instalada. Desta forma, considera-se que todos os turbogeradores e todos os centros de carga conectam-se a um mesmo barramento. É interessante observar-se que nem sempre é esta a situação encontrada nas usinas e destilarias. Contudo, a otimização dos sistemas existentes em curso deverá levar a isto.

No caso dos turbogeradores, em que as turbinas empregadas são geralmente multi-estágio, é considerada uma eficiência isentrópica média de 68%, podendo também este parâmetro ser fornecido como um dado, variável a cada caso. Tal eficiência depende fundamentalmente do fator de carga aplicado a cada turbina, podendo atingir 72% para um fator de carga de 80%.

Como avaliação puntual da subrotina STRATE foram comparados os resultados de uma medição experimental, realizada pelo CTC - Copersucar em um grupo turbo gerador de 7,5 MVA (turbo gerador nº 5 da Usina Bonfim) e sua respectiva simulação computacional, conforme tabela a seguir:

Tabela 6 - Avaliação da subrotina STRATE

Parâmetro	Resultados Experimentais	Resultados Computacionais (STRATE)	$\Delta\%$
consumo específico (kgf/CVh)	8,6	8,73	1,5%
título na saída (%)	97	97,8	0,8%

Observa-se uma boa concordância entre os resultados experimentais e da simulação, o que depende fundamentalmente da eficiência isentrópica adotada para a turbina a vapor, que é um dado fornecido. Assim, a subrotina apenas efetua com precisão análises de expansões isentrópicas e isentálpicas no diagrama de Mollier, fornecendo um resultado do consumo de vapor tão bom quanto a confiabilidade do valor de eficiência isentrópica fornecido.

Esta subrotina, aplicada dentro das condições anteriores, fornece o consumo de vapor na turbogeração. Este índice também é determinado para a hipótese de geração total da energia elétrica consumida, isto é, quando não se considera a compra da concessionária. A partir do sobreconsumo de vapor verificado entre a geração parcial e a geração total é estimado o consumo adicional de bagaço, conforme a modelagem do item A.2: Produção de vapor.

#### B.4 - Turbobombeamento

##### a) Potência exigida nas turbobombas, (CV)

É adotado um conceito de bomba equivalente, cuja vazão é dada pela soma das vazões de todas as turbobombas em uso e cuja altura manométrica de bombeamento refere-se a média das alturas, ponderada pela potência de cada bomba. Com estes parâmetros, vazão e altura manométrica equivalentes, é possível determinar-se a potência exigida no turbobombeamento. A eficiência a

dotada para a bomba equivalente é 60%.

b) Consumo de vapor no turbobombeamento, (kgv/h)

Emprega-se a subrotina STRATE, tendo como parâmetros as condições operativas médias das turbinas das turbobombas e adotando-se rendimento de 35%. As turbinas a vapor empregadas nesta aplicação são geralmente de reduzida eficiência, devido à concepção construtiva simplificada e à operação fora das condições nominais.

#### B.5 - Secagem e Refino do Açúcar

a) Consumo de vapor na secagem e refino, (kgv/h)

A secagem é uma operação sempre realizada nas usinas de açúcar e tem sua demanda de energia térmica geralmente abastecida a partir da expansão de vapor de alta pressão para médias pressões, compatíveis com as temperaturas desejadas. O consumo horário no secador é calculado pelo produto entre a vazão de produto secado, em (kg/h), e o consumo específico de vapor na secagem, normalmente arbitrado em 25 kgv/ton. de açúcar. No caso do refino, bem pouco comum em usinas de açúcar, a abordagem é idêntica. Observe-se que estas demandas, contrariamente às já analisadas, não levam à produção de vapor de escape.

#### B.6 - Produção de Vapor de Escape, (kgv/h)

Nas aplicações de vapor de alta pressão em turbinas há a exaustão de vapor de escape ou de baixa pressão, em vazão aproximadamente igual ao próprio consumo, calculado nos itens anteriores. Interessa porém determinar-se a disponibilidade de vapor de escape seco, que é dado pelo produto entre o consumo de vapor de alta pressão e o título de saída, em cada turbina. Para as turbinas de baixa eficiência, é comum o vapor sair no estado superaquecido, situação que o programa de simulação aproxima a de título unitário, razoável para efeito das aplicações térmicas posteriores.

### 3.2.C - Bloco 3 - Consumo de Vapor Vegetal

Existe aqui uma grande diversidade de procedimen

tos e é difícil dizer o que seria uma usina típica, além da variação dos parâmetros operacionais, especialmente neste bloco do modelo de simulação. Os desvios a serem observados quando da comparação entre o valor calculado e o valor medido para o consumo de vapor vegetal certamente serão maiores do que em outros níveis de pressão. Por outro lado, é possível assegurar-se a flexibilidade do programa, colocando algumas opções dentro do programa de dados. Assim, é possível considerar ou não o "flasheamento" do condensado na evaporação no múltiplo efeito e é possível adotar para o aquecimento do caldo para álcool, vapor de escape ou vapor vegetal, identicamente em relação ao caldo para açúcar.

a) Produção de caldo misto, (kg/h)

O volume produzido de caldo misto foi aproximado segundo a relação abaixo:

$$PCALMS = \frac{MOACAN \cdot POLCAN - PBGT \cdot POL \text{ BAG}}{BRCM \cdot PUCM} \quad (3.18)$$

onde: MOACAN - moagem total horária da usina, durante o período considerado, (kgc/h)

POLCAN - teor médio de sacarose na cana moída, (%)

PBGT - produção total de bagaço, (kgb/h)

POLBAG - teor médio de sacarose no bagaço, (%)

BRCM - brix (sólidos solúveis) do caldo misto, (%)

PUCM - pureza (índice do teor de pol) no caldo misto, (-)

Como se observa, adotou-se o balanço de POL para a determinação da produção de caldo misto. O resultado pode ser verificado comparando-se com o valor medido na balança de caldo, quando disponível.

b) Caldo enviado ao processo de fabricação de açúcar, (kg/h)

Determina-se diretamente a parte do parâmetro  $K_f$ , calculado conforme o balanço global de açucares na usina, já discutido no item 3.1.

## C.2 - Evaporação

a) Evaporação máxima no pré-evaporador, (kgv/h)

Considerando o caldo enviado à fabricação, a disponibilidade de vapor vegetal, associada à produção de açúcar, é dada por:

$$VVMAC = V\text{CALAC} \cdot (1 - \text{BRCM}/\text{BRPR}) \quad (3.19)$$

onde: V\text{CALAC} - caldo destinado à produção de açúcar, (kg/h)

BRCM - brix do caldo misto clarificado, (%)

BRPR - brix do caldo na saída do pré-evaporador, (%)

Deve ser incluída também a possibilidade de se efetuar uma concentração no caldo desviado para a destilaria. Neste caso, a disponibilidade de vapor vegetal é acrescida de um valor correspondente a operação do pré-evaporador para a destilaria, de modo a atingir-se determinada concentração inicial de sólidos solúveis no mosto, fornecida como dado. A sequência de cálculos neste caso é mostrada a seguir; e considera também o uso de mel residual na produção de álcool:

$$\text{STCM} = \text{BRCM} \cdot \text{V\text{CALAL}} / 100 \quad (3.20)$$

$$\text{STMEL} = \text{PRMEL} \cdot (\text{ARTMEL}/100) \cdot (1/\text{PURMEL}) \quad (3.21)$$

$$\text{VMOST} = (\text{STCM} + \text{STMEL}) \cdot 100/\text{BRMS} \quad (3.22)$$

$$\text{V\text{EVAL}} = \text{V\text{CALAL}} - \text{VMOST} + \text{PRMEL} \quad (3.23)$$

onde: STCM - sólidos totais no caldo misto, (kg/h)

BRCM - brix do caldo misto clarificado, (%)

V\text{CALAL} - caldo destinado à produção de álcool, (kg/h)

STMEL - sólidos totais no mel (ou melaço), (kg/h)

PRMEL - produção de mel, (kg/h)

ARTMEL - açúcares redutores totais normal, (%)

PURMEL - pureza do mel, (-)

VMOST - volume total de mosto nas condições iniciais de fermentação, (kg/h)

BRMS - brix do mosto, (%)

VVEVAL - vapor vegetal produzido na concentração do caldo destinado à destilaria, (kgv/h)

Observe-se que em algumas situações, em que há grande produção de mel e/ou pouco caldo desviado para a fermentação, o valor obtido para VVEVAL pode ser negativo, que indica a necessidade de adição de água e não de concentração. Nesta hipótese evidentemente não há produção de vapor vegetal associada à destilaria.

b) Consumo do vapor vegetal no 2º corpo de evaporador, (kgv/h)

O vapor vegetal requerido para as etapas subsequentes de concentração no múltiplo efeito é dado por:

$$CVVEV = [VCALAC.(1 - BRXR) - SANG]/NEF \quad (3.24)$$

onde: BRXR - brix do xarope, %

SANG - sangria de vapor vegetal, dada no item C.3, (kgv/h)

NEF - número de efeitos na evaporação, (-)

### C.3 - Sangrias de vapor vegetal

a) Consumo de vapor vegetal para o aquecimento, (kgv/h)

É desenvolvido de maneira semelhante para o caldo destinado à fabricação ou para a destilaria. A partir de temperatura do vapor vegetal, fornecida, pode ser determinada sua entalpia de condensação. O calor específico do caldo a ser aquecido é dado pela relação abaixo, conforme Hugot [14], em (kcal/kg);

$$CPCAL = 1 - (BRCL/100)(0,6 - 0,0018T + 0,001(100 - PUR)) \quad (3.25)$$

onde: BRCL - brix do caldo, (%)

T - temperatura do caldo, (C)

PUR - pureza do caldo, (%)

Para a temperatura do caldo, na expressão acima, adotou-se um va

lor médio entre a temperatura de entrada e saída no aquecedor. O consumo de vapor vegetal para aquecimento é dado por:

$$CVVAQ = CAL.CPCAL.(TS-TE).PERT.(1+REC).(0,98)/CLV \quad (3.26)$$

onde: CAL - volume de caldo a ser aquecido, (kg/h)  
 TS - temperatura de saída do aquecedor, (C)  
 TE - temperatura de entrada do aquecedor, (C)  
 PERT - perdas térmicas no aquecedor, (-)  
 REC - recirculação dos filtros, (-)  
 CLV - entalpia de condensação do vapor vegetal, (kcal/kg)

A taxa de retorno ou recirculação dos filtros é de 0,2 no caldo para açúcar e de 0,10 no caldo para álcool. Considera-se na expressão acima um pequeno subresfriamento do condensado, da ordem de 10°C, conforme observações experimentais do CTC, acarretando um aumento de aproximadamente 2% no calor cedido pela condensação do vapor. O emprego de aquecedor regenerativo não é considerado explicitamente, já que os parâmetros TS e TE consideram subjetivamente seu efeito.

b) Consumo de vapor vegetal no cozimento ("tachos a vácuo"), (kgv/h)

O caldo, após ser concentrado no evaporador, está com um teor de sólidos solúveis da ordem de 60%, na faixa de saturação, sendo denominado xarope. A produção horária de xarope pode ser calculada através de um balanço de sólidos, e permite obter o consumo de vapor vegetal, conforme expressão sugerida por Chenu [17], e adaptada a partir de resultados medidos:

$$CVVCZ = PRXAR.(1 - BRX/BRM)(1 - RCC) \quad (3.27)$$

onde: PRXAR - produção de xarope nos evaporadores, (kg/h)  
 BRX - brix do xarope, (%)  
 BRM - brix da massa cozida final, (%)  
 RCC - rendimento em cristal no cozimento, (-)

O parâmetro RCC varia com o número de massas cozidas adotado na usina em foco. Atualmente no Brasil a tendência é não se esgotar o mel, e trabalhar com no máximo 2 massas . Os valores de RCC adotados constam da tabela abaixo:

nº de massas	RCC
1	0,182
2	0,519
3	0,835

c) Consumo de vapor vegetal na destilação, (kgv/h)

O vapor vegetal pode ser usado nas colunas de destilação, especificamente nas colunas B e P. O consumo de vapor neste caso é dado pelo produto entre o volume de álcool total produzido, a fração deste volume que é processado nas colunas com vapor vegetal e o consumo específico de vapor, dado em (kgv/l). Mesmo para uso mais intenso do vapor vegetal, em outras colunas, o sistema de cálculo é o descrito.

d) Sangria total de vapor vegetal, (kgv/h)

O vapor vegetal produzido nos evaporadores, além de seguir primariamente para as subseqüentes operações de evaporação, atende a outros fins, para os quais são efetuadas as sangrias ou extrações: A sangria total é dada pela soma dos consumos de vapor vegetal para o aquecimento do caldo para açúcar e/ou álcool, cozimento e destilação.

#### C.4 - Balanço parcial de vapor vegetal

Com os dados anteriormente determinados é possível avaliar-se o balanceamento da linha de vapor vegetal, baseando-se na disponibilidade máxima de vapor vegetal e na demanda total, no evaporador e extrações. Na hipótese de uma "falta" de vapor vegetal, dentro do esquema considerado, haverá uma complementação com vapor de escape; por outro lado uma eventual disponibilidade além da demanda assegura a operação, já que as demandas não são constantes no tempo, especialmente os processos em bate

lada, como nos cozedores.

### 3.2.D - Bloco 4 - Consumo de Vapor de Escape

A modelagem do consumo de vapor de escape apresenta dificuldades análogas ao vapor vegetal, em que a necessária abordagem generalista encontra grande variedade de procedimentos e situações. Também aqui a solução adotada é semelhante à do consumo de vapor vegetal.

#### D.1 - Aquecimento do caldo

- a) Consumo de vapor de escape para aquecimento (kgv/h)

A metodologia adotada é idêntica ao aquecimento com vapor vegetal, empregando-se as mesmas expressões para o calor específico, taxas de recirculação dos filtros, consumo de vapor e efeito do subresfriamento do vapor de aquecimento (vide item C.3(a)).

#### D.2 - Pré-evaporação

- a) Consumo de vapor de escape na pré-evaporação, (kgv/h)

Através de um balanço entálpico no pré-evaporador, em que se considera, do lado do caldo, a elevação de temperatura até a condição saturada e o volume produzido de vapor vegetal a ser produzido, e do lado do vapor de aquecimento, sua entalpia de condensação e um subresfriamento como no aquecimento, é possível determinar-se o consumo de vapor de escape. Nos casos em que se dispõe de tanques para flasheamento do condensado, admite-se uma redução de 3% no consumo de vapor de escape, segundo observações efetuadas pelo CTC. Observe-se que o valor adotado para o volume de vapor vegetal a ser produzido é o menor entre a disponibilidade máxima de vapor vegetal, item C.2(a) e a demanda máxima de vapor vegetal, item C.4.

#### D.3 - Destilação com vapor de escape

a) Consumo específico de vapor de escape, (kgv/l)

A partir de dados apresentados por Ebeling [24], ajustou-se a curva a seguir, para o consumo específico de vapor na coluna A, em kgv/l de álcool produzido:

$$CEVEA = 5,62 - 0,42 \cdot TEALV$$

onde: TEALV - teor alcoólico no vinho, %

Ao valor obtido para CEVEA deve ser somado o consumo específico da coluna C, da ordem de 0,9 kgv/l de álcool.

b) Consumo de vapor de escape na destilação ,  
(kgv/h)

A partir do volume de álcool produzido e do consumo específico de vapor tem-se diretamente a demanda de vapor. Para o álcool hidratado considerou-se uma redução de 0,5 kgv/l no consumo específico de vapor.

#### D.4 - Desaerador

a) Consumo de vapor no aquecedor - desaerador,

É determinado através de um balanço entálpico, considerando o volume de água preaquecido, as temperaturas na entrada e na saída da água e as condições de pressão e temperatura do vapor adotado.

#### D.5 - Consumo total de vapor de escape

a) Consumo de vapor de escape, (kgv/h)

É determinado diretamente pela soma das demandas dos aquecedores, desaeradores, destilaria e preevaporador.

b) Consumo de vapor de escape, considerando o balanço parcial de vapor vegetal, (kg/h)

A partir do resultado da análise efetuada no item C.4, é necessário incluir uma eventual demanda adicional de vapor de escape, associada a um desbalanceamento na linha de vapor vegetal.

### 3.2.E - Bloco 5 - Balanço de Vapor

#### E.1 - Perdas por condensação nas linhas de vapor

Adotou-se, para linhas de vapor com isolação térmica em bom estado, perdas de 2% na linha de vapor de escape e de 3% nas linhas de vapor vivo. Na situação em que a isolação térmica não está em bom estado estes valores foram 4% e 6%, respectivamente.

#### E.2 - Linha de vapor de escape

A partir da produção total de vapor de escape, calculada conforme item B.6, e considerando o consumo total, conforme item D.5(b), somado às perdas por condensação, pode ser determinado o excedente ou "faltante" de vapor de escape. Na hipótese em que a demanda é maior que a disponibilidade, é necessário expandir-se vapor de alta pressão, o que corresponde a um consumo adicional nesta linha de vapor.

#### E.3 - Linha de vapor vivo

O fechamento do balanço de vapor é feito na linha de vapor de alta pressão ou vapor vivo. A produção máxima de vapor nas caldeiras é determinada pelo produto entre a produtividade específica de vapor para o bagaço, calculada conforme item A.2(b), e a produção total de bagaço, conforme item A.1(b). Na hipótese de que a demanda seja maior do que a produção de vapor, a situação da usina é crítica e deve ser analisada em maiores detalhes. Por outro lado, a disponibilidade de vapor vivo indica um excesso de bagaço, que pode ser calculado adotando-se a produtividade específica de vapor já determinada.

### 3.2.F - Bloco 6 - Índices Operacionais

#### F.1 - Índices de utilização dos equipamentos e produção

Apoiando-se nos resultados anteriores, são determinados alguns índices auxiliares para a interpretação da condição operativa da usina, como fatores utilização das caldeiras e turbinas dos turbogeradores, a partir das potências nominais à

plena carga e os valores médios de potência calculados no programa. Também são calculados índices de produção, como a relação entre o volume de álcool produzido e a moagem destinada diretamente à fermentação, e à produção de açúcar e a moagem desviada para sua fabricação.

## F.2 - Índices de excesso de bagaço

O excedente de bagaço calculado no item E.3 pode ser considerado uma disponibilidade bruta de bagaço. Na realidade, a variação nas condições de operação, e sobretudo as contingências no trabalho da usina provocam paradas, cujo efeito direto é a redução do excedente de bagaço. A exata modelagem do sobre consumo de bagaço determinado pela operação das caldeiras fora de seu ponto médio e pelo periódico reacendimento é bastante difícil, mas baseando-se em medições levantadas pelo CTC, é razoável estimar-se um sobreconsumo de bagaço da ordem de 10%. Este é o fator de redução que permite calcular o excedente líquido, ou corrigido, de bagaço. Nesta área há um trabalho interessante a ser desenvolvido na análise das causas que levam ao sobreconsumo (essencialmente as interrupções do processo de moagem e seus efeitos conjugados com a capacidade térmica das caldeiras) e sua eventual redução.

## F.3 - Índices auxiliares para a análise de co-geração

Dentro da análise da cogeração de energia elétrica e térmica, requer-se que a demanda de vapor seja desagregada no consumo para fins térmicos e no consumo para geração de potência. Do quociente entre estes consumos pode-se avaliar o equipamento de co-geração e buscar sua otimização.

## 3.3 - Arquivo de Dados e Saídas de Resultados

No Apêndice 4 apresentam-se listagens com exemplos de arquivos de dados e saída de resultados obtida, para 2 usinas, empregando-se o programa de simulação na sua versão básica. Representam situações reais de operação e os resultados estão dentro de valores normais observados nestas usinas. Infeliz

mente ainda não se dispõe de avaliações experimentais de excedentes de bagaço e demais índices associados a disponibilidade energética para curtos períodos de operação nas usinas, o que dificulta uma comparação com o modelo computacional. Não obstante, os resultados foram discutidos com o pessoal técnico da CTC - Copersucar, que confirmou sua validade para períodos de uma safra (6 meses). Trata-se, no momento, da melhor avaliação feita para o excedente de bagaço; a utilização do programa deverá levar a correções com o conseqüente aumento da precisão. Nos próximos capítulos os casos estudados, referidos como Caso 1 e Caso 2 referem-se a estes arquivos de dados.

#### 4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO COM O MODELO COMPUTACIONAL EM DISTINTAS CONFIGURAÇÕES DE DADOS

Com o objetivo de explorar diferentes alternativas de concepção e operação em usinas, são descritos a seguir alguns resultados de simulações computacionais com distintas configurações de dados, montadas a partir dos casos típicos apresentados anteriormente. Este procedimento permite avaliar o efeito de alterações a nível de projeto e operação sobre o balanço energético da usina, de forma expedita, e demonstra a potencialidade do modelo computacional como ferramenta de análise e otimização em usinas de açúcar e álcool.

##### 4.1 - Condições de Equilíbrio nas Demandas de Vapor Vivo e Vapor de Escape

A figura a seguir mostra a linha de equilíbrio para a qual são iguais a produção e a demanda de vapor de escape. Assumiu-se a potência de moagem e preparo da cana como constante e igual a 20 CV/TCH, considerando variáveis o consumo de vapor de processo, a demanda específica de energia elétrica e o consumo específico de vapor na turbogeração. Conhecidos estes parâmetros, é possível se avaliar a condição de operação, em termos de balanceamento nas linhas de vapor. Para situações representadas acima da linha de equilíbrio, a demanda de processo é maior que a produção de escape correspondente, sendo necessária expansão na válvula de "by-pass" entre a linha de vapor vivo e de escape. Para situações que estão abaixo das linhas de equilíbrio, a demanda de processo é menor do que a disponibilidade de vapor de escape, o vapor é perdido para a atmosfera. É importante observar que esta avaliação não considera as modulações de carga térmica e elétrica, que são bastante significativas e fazem com que na realidade a usina opere em uma região do gráfico, e não apenas em um ponto.

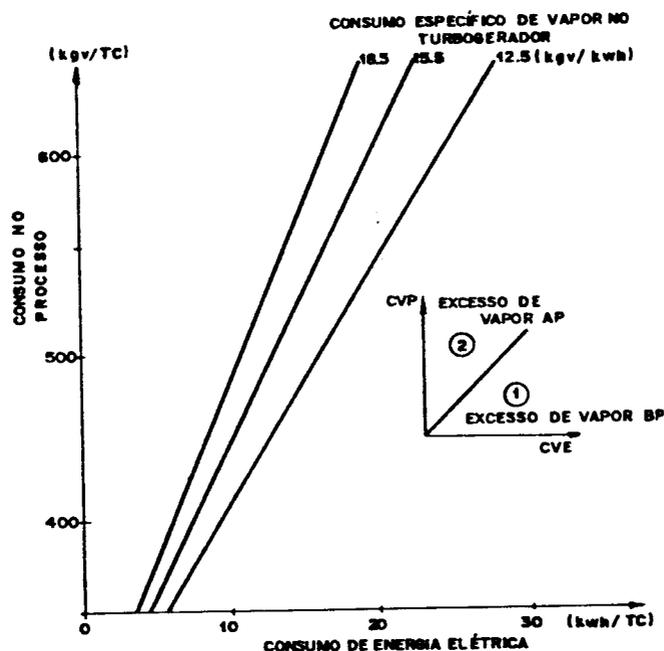


Figura 5 - Condições de equilíbrio nas demandas de vapor vivo (AP) e vapor de escape (BP)

#### 4.2 - Variação da Disponibilidade do Bagaço

Para a usina apresentada no caso 1, se avalia a seguir a influência das condições de produção de vapor (pressão e temperatura), do teor de fibra da cana e da fração adquirida de energia elétrica sobre o excedente de bagaço.

##### 4.2.A - Efeito das Condições do Vapor Vivo e da Fibra da Cana

A tabela abaixo mostra os resultados obtidos para diversos índices quando se alteram a pressão e temperatura do vapor vivo e a fibra da cana. Ainda que o teor de fibra não seja uma variável de controle, mas imposta pelas condições culturais e climáticas para a cana de açúcar, sua influência é marcante, afetando diretamente a disponibilidade de bagaço, o consumo de potência para preparo e moagem e indiretamente o consumo de vapor para processo, através da redução do volume de caldo. A figu

ra 6 mostra graficamente estes efeitos, tabelados abaixo.

Tabela 7 - Efeito do teor de fibra na cana e das condições de vapor vivo sobre o excedente do bagaço

Fibra de cana (%)	Condições do Vapor Vivo		Excedente de bagaço (%)	Fator de utilização das caldeiras (%)	Balanco de Vapor	
	pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	temper. (C)			vapor vivo (ton v/h)	vapor escape (ton v/h)
12	21	300	7,9	0,782	38,9	34,1
12	42	400	9,6	0,714	43,9	-82,2
12	63	450	7,1	0,714	31,4	-122,3
12	85	500	4,4	0,714	18,7	-149,3
13,5	21	300	15,9	0,794	88,1	40,8
13,5	42	400	18,7	0,712	96,3	-77,2
13,5	63	450	16,5	0,712	82,2	-117,9
13,5	85	500	14,0	0,712	67,9	-145,3
15	21	300	22,4	0,805	137,4	47,4
15	42	400	26,0	0,710	148,6	-72,3
15	63	450	24,0	0,710	132,9	-113,6
15	85	500	21,8	0,710	117,1	-141,4

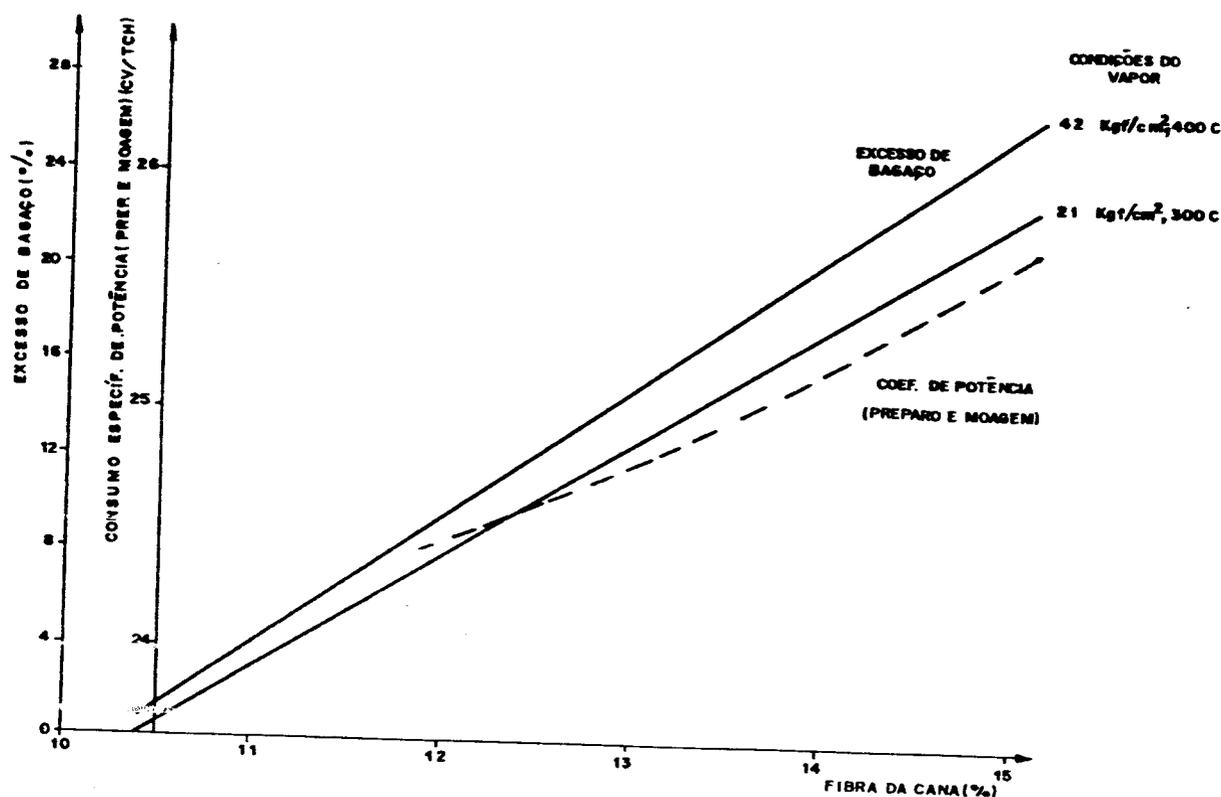


Figura 6 - Variação de índices de excesso de bagaço, consumo de potência e vapor de processo com o teor de fibra de cana

Nestas avaliações considerou-se que todas as turbinas, para energia mecânica ou elétrica, consumiam vapor sob condições idênticas às da geração da caldeira, e com eficiências isentrópicas conforme discutido na modelagem.

É interessante observar que, para as condições estudadas, a pressão de 42 kgf/cm<sup>2</sup> mostrou ser a mais conveniente, do ponto de vista de produção de bagaço excedente. Esta conclusão é parcial, já que não foram feitas alterações para o processo. O emprego de elevadas pressões só faz sentido quando conjugado a uma redução do consumo de vapor de escape. Se tal redução não for efetuada, a demanda de processo passa a ser determinante e anula as vantagens das altas pressões.

#### 4.2.B - Efeito do Consumo de Vapor no Processo

Diversos fatores influem no consumo de vapor de processo. Segundo Zarpelon [18], contribuem para aumentar o consumo a embebição com água fria, embebição simples, incorporação de água nos caldos, evaporação mal dimensionada, uso incorreto das sangrias da evaporação, não aproveitamento de condensados de vapor vegetal, incrustações nas superfícies de troca térmica, falta de isolamento nos equipamentos e tubulações, não flashamento de condensados, recirculações de caldos e méis, vinhos com baixo grau alcoólico, álcool com alto grau alcoólico. Atualmente, o consumo médio de vapor para processos está em torno de 500 Kgv/TC, e nas usinas em que tal demanda é superior ao consumo de vapor vivo, a obtenção de excedentes de bagaço passa necessariamente pela redução desta demanda de vapor na fabricação de álcool e açúcar.

Nas situações em que é preponderante a demanda de processo, o excedente de bagaço pode ser estimado rapidamente, adotando-se valores médios de produtividade de bagaço, igual a 250 kg de bagaço com 50% de umidade por tonelada de cana, e de produtividade de vapor, igual a 2 kg de vapor por kg de bagaço com 50% de umidade. Assim, a produção máxima de vapor corresponde a 500 kg/TC, e cada 10 kgv/TC de redução no consumo de escape para o processo corresponde a 2% de bagaço excedente. Por exemplo, se uma usina lograr equilíbrio no balanço de vapor, com uma

demanda no processo de 300 kgv/TC, pode se esperar um excesso de bagaço ao redor de 40% do bagaço total produzido.

#### 4.2.C - Efeito da Comercialização (Compra/Venda) de Energia Elétrica

Uma oportuna aplicação do modelo computacional é na avaliação do efeito do consumo dos turbogeradores sobre o excedente de bagaço, devido a suas consequências econômicas. Neste aspecto deve-se observar que a usina pode ser considerada como uma unidade produtora de energia na forma de bagaço e eletricidade. Maiores produções de energia elétrica determinam, até certo ponto, reduções no excedente de bagaço e vice-versa.

Para a usina mostrada no caso 1, com moagem de 18500 TC por dia e potência instalada de 15 MW, consumindo 12,29 kWh/TC, tem-se a relação entre a disponibilidade do consumo total, apresentada na figura 7. Para evidenciar o efeito da eficiência das turbinas a vapor, avaliaram-se 2 situações. Em um primeiro caso, adotou-se a eficiência isentrópica das turbinas conforme valores médios observados e discutidos na modelagem. Para um segundo caso, foram adotadas maiores eficiências, considerando a operação com maior fator de carga e rotação nominal, atingindo 72% para as turbinas dos turbogeradores e 52% para as turbinas de uso geral.

Um diagrama deste tipo fornece alguns parâmetros importantes, como o excedente de bagaço máximo, determinado pelo consumo de vapor de processo e a fração máxima de venda de energia elétrica, correspondente à plena operação dos turbogeradores. Deve se lembrar que estes índices se alteram com modificações no processo e com o uso de pressões e temperaturas diferentes no vapor vivo, bem como sob outras características da cana e relações entre a produção de álcool e açúcar. Ainda que possua estas limitações, este gráfico apresenta um uso efetivo do modelo de simulação como uma ferramenta poderosa para compreensão e análise do uso e produção de energia em usinas.

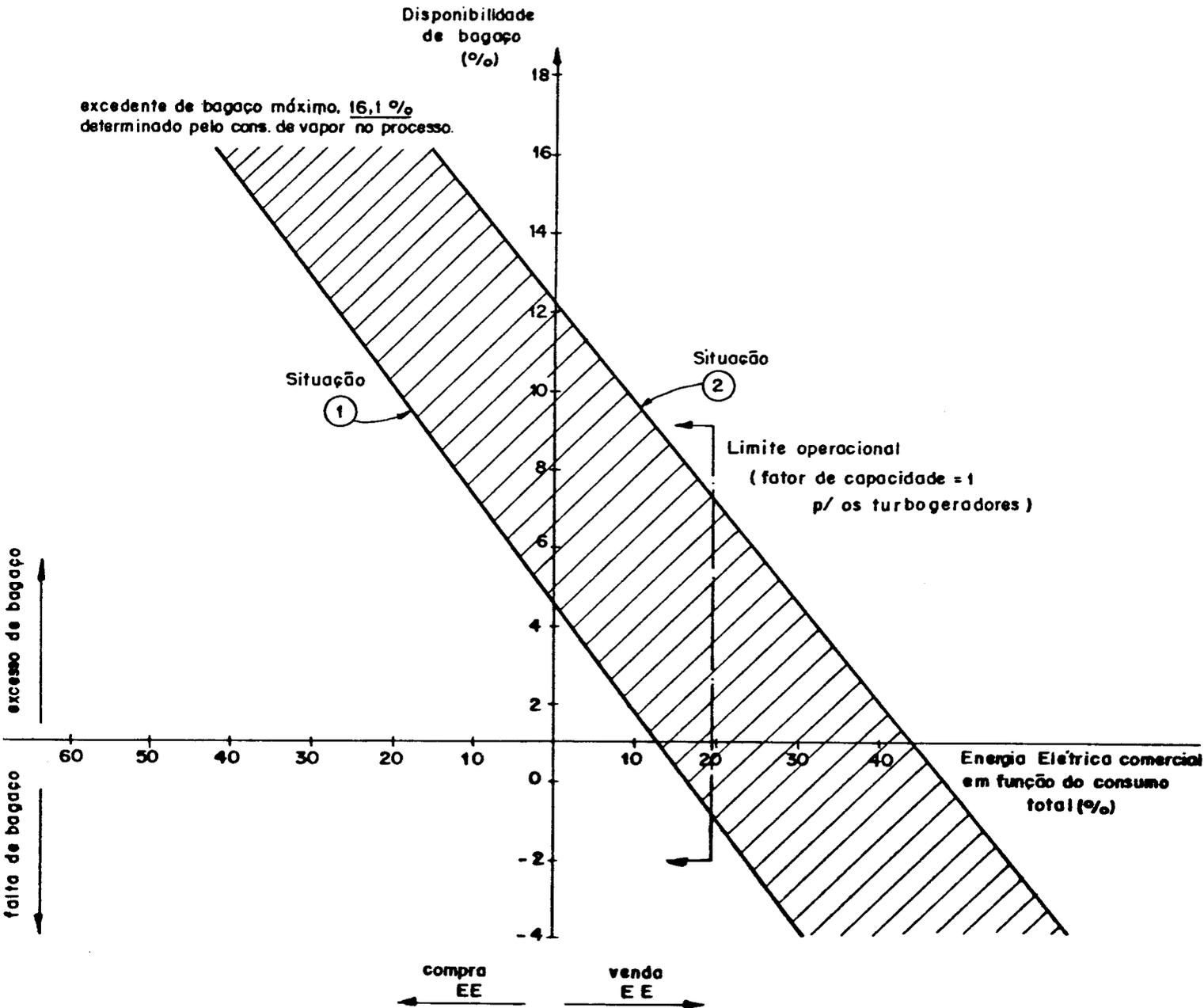


Figura 7 - Variação da disponibilidade de bagaço em função da fração comercializada de energia elétrica, para a usina do caso 1, com 15 MW de potência instalada, 18500 TCD e 12,29 kWh/TC de consumo

#### 4.3 - Alterações no Processo com Efeito no Balanço de Vapor

Outra interessante aplicação do modelo computacional é na avaliação do efeito das alterações no processo sobre o balanço de vapor, especialmente o vapor de escape. Observe-se que nem sempre estas alterações se traduzem em excedentes de ba

gaço, pois quando o consumo de vapor vivo é preponderante, a redução do uso de vapor de escape não tem efeito sobre o consumo de bagaço nas caldeiras.

#### 4.3.A - Aquecimento do Caldo

O aquecimento do caldo, para pasteurização ou clarificação posterior, pode empregar vapor de escape ou vapor vegetal, produzido nos pré-evaporadores. Na usina apresentada como caso 1 o caldo para fabricação de açúcar emprega vapor vegetal no aquecimento, e o caldo para a destilaria utiliza vapor de escape. Empregando o modelo computacional avaliou-se outros esquemas de aquecimento, apresentados na tabela 8. Pode-se observar que o aquecimento de todo o caldo com vapor vegetal é a alternativa de menor consumo de vapor de escape, ainda que não implique em maior excedente de bagaço, já que há excesso de vapor de escape neste caso.

Tabela 8 - Efeito do sistema de aquecimento de caldo sobre o consumo de vapor de escape

Vapor empregado no aquecimento		Consumo de Vapor de Escape (kgv/TC)	Excesso de Vapor de Escape (kgv / h)	Excedente de Bagaço (%)
Caldo para açúcar	Caldo para álcool			
escape vegetal	escape	472,1	40 785	4,32
escape vegetal	escape vegetal	452,9	55 885	4,32
escape vegetal	vegetal	457,2	52 491	4,32
escape vegetal	vegetal	438,9	66 869	4,32

#### 4.3.B - Evaporação

A concentração do caldo para a produção de açúcar é realizada em evaporadores de múltiplo-efeito, podendo empregar também tanques de reevaporação (flasheamento) de condensado para reduzir a demanda de vapor de escape no primeiro corpo de evaporador. A tabela 9 apresenta os resultados do modelo computacional quando alterado o número de efeitos na evaporação e

sob a utilização opcional de vapor de "flash". Esta avaliação foi feita para a usina mostrada no caso 1 e analogamente ao aquecimento, as alterações efetuadas não introduzem variações no excedente de bagaço, que se mantém em 4,32% ainda neste caso.

Tabela 9 - Efeito do número de efeitos na evaporação e da existência de tanques de reevaporação sobre o consumo de vapor de escape total

Número de efeitos na evaporação	Existência de tanques de reevaporação de condensado	Consumo de Vapor de escape (kvg/h)	Excesso de Vapor de escape (kvg/h)
4	não	458,9	51 122
4	sim	452,9	55 885
5	não	448,5	59 316
5	sim	442,8	63 833

#### 4.3.C - Nível da Pressão de Escape

A alteração da pressão de escape afeta o nível de temperatura e a entalpia de condensação do vapor no processo, bem como a demanda de vapor nas turbinas. Esta influência é bem avaliada no modelo, que mostra uma pequena variação na demanda específica de vapor de escape e um efeito mais pronunciado sobre o excedente de bagaço. A tabela 10 apresenta alguns resultados, avaliados em torno do caso 1 e inclui também o estado do isolamento térmico como variável. Evidentemente que a adoção de pressões mais baixas pode ser interessante, desde que o novo nível de temperatura não traga complicações para o processo e a troca de calor nos equipamentos térmicos da usina.

Tabela 10 - Efeito do nível de pressão de escape e estado do isolamento sobre o excedente de bagaço e o consumo de vapor de escape

Pressão de escape (kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperatura de condensação (C)	Isolamento em bom estado	Excedente de vapor de escape (kvg/h)	Consumo de vapor de escape (kvg/TC)	Excedente de bagaço (%)
1,4	125,46	sim	49 218	452,4	5,74
1,4	125,46	não	42 244	452,4	3,29
1,5	126,79	sim	55 885	452,9	4,32
1,5	126,79	não	48 903	452,9	1,82
1,6	128,08	sim	62 567	453,3	2,89
1.6	128,08	não	55 588	453,3	0,36

#### 4.4 - Variação da Relação de Produção: Açúcar/Álcool

No planejamento da safra, considerados os horizontes de produção de açúcar e álcool e disponibilidade de cana associada, é interessante determinar-se como varia o balanço de vapor, e via de consequência, o excedente de bagaço, em função do volume de caldo desviado para a fabricação de açúcar. Esta correlação é fundamental para alocar-se corretamente os objetivos de produção para cada período da safra na usina, visando a maior geração possível de excedentes e resultante da adequada operação. Neste trabalho é desenvolvida uma aplicação de Programação Dinâmica com este propósito.

Com o auxílio das expressões já apresentadas para o balanço de açúcares, pode-se obter diferentes pares de produção de álcool e açúcar correspondentes a uma mesma moagem, que aplicados no modelo computacional deram os resultados conforme a figura 8. Estão representadas duas situações, em que se avaliou o efeito da eficiência das turbinas a vapor, de forma análoga ao item 4.2.C. Observa-se claramente que para valores de  $K_f$  (fração de caldo desviado para a fabricação de açúcar) crescentes a partir de zero, o excedente de bagaço é determinado pelo consumo de vapor vivo nas turbinas, até o ponto de inflexão em que a demanda

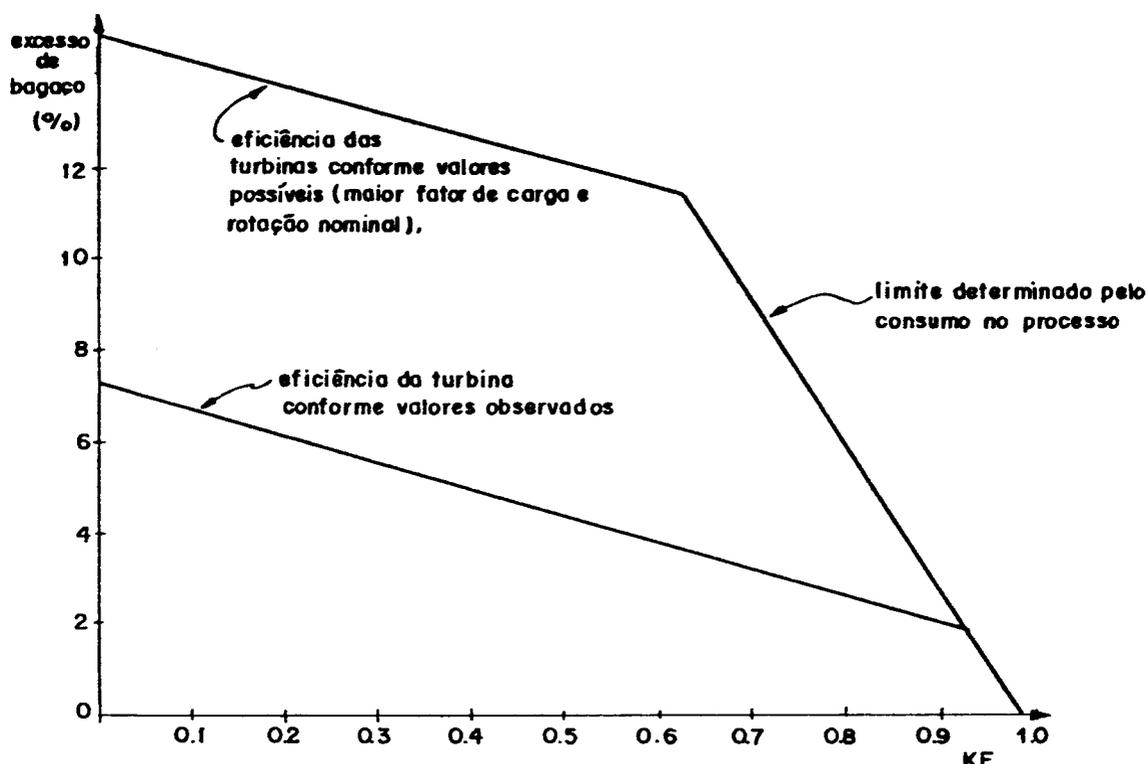


Figura 8 - Variação do excesso de bagaço em função da fração de caldo desviado para a fabricação de açúcar, para a usina do caso 1

de vapor para processo passa a ser dominante e determina o excesso de bagaço. A posição do ponto de inflexão depende da eficiência das turbinas, como confirma a figura, avaliada para a usina mostrada no caso 1.

Uma maneira alternativa de se avaliar o efeito do perfil de produção sobre o excedente de bagaço é diretamente conforme a relação  $\ell$  álcool/kg de açúcar produzidos. Como mostra a figura 9, avaliada também considerando a usina do caso 1 e em duas hipóteses de eficiências das turbinas a vapor, as curvas resultantes são assintoticamente tendentes ao excedente de bagaço máximo, que ocorre para uma produção máxima de álcool, sem produção de açúcar. Por outro lado, mesmo para a máxima produção de açúcar, é produzido melão e, conseqüentemente, pode ser obtido álcool. No caso estudado, esta produção mínima de álcool é 0,3 $\ell$  de álcool por kg de açúcar.

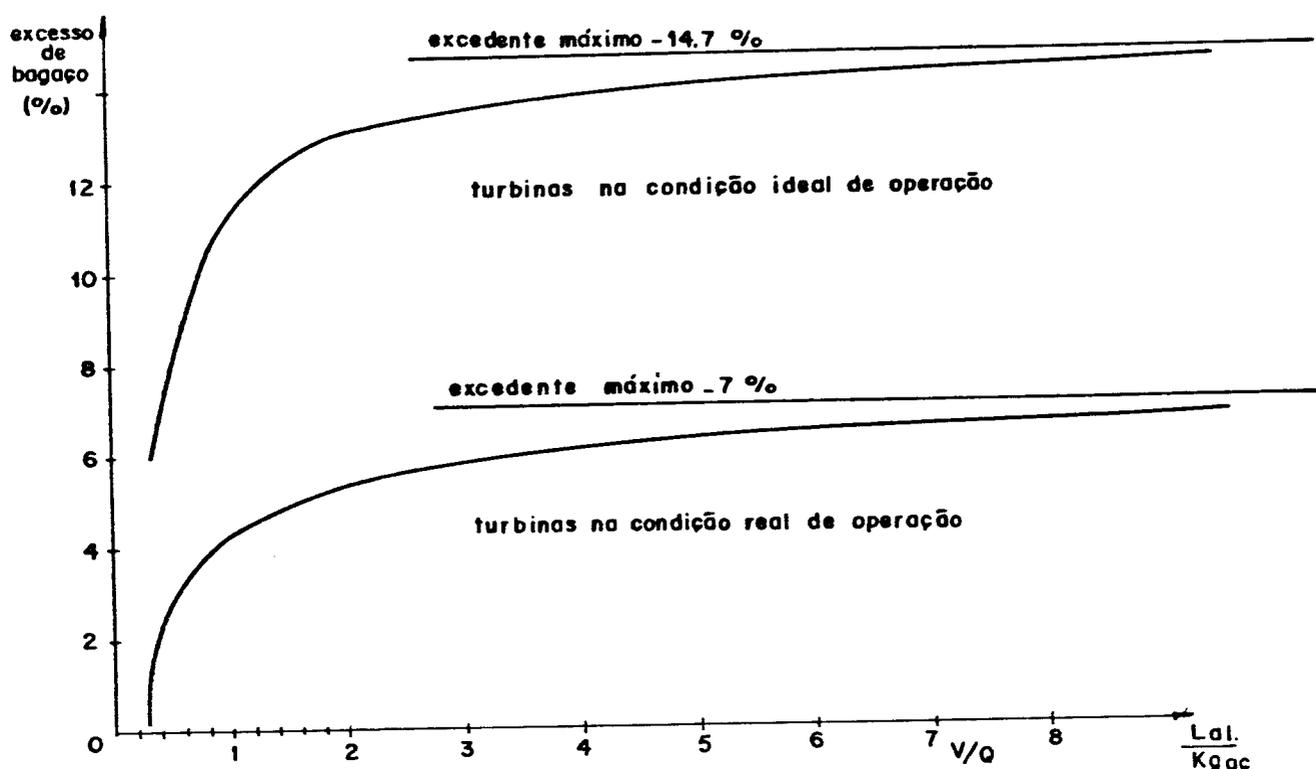


Figura 9 - Variação do excesso de bagaço em função da relação de produção  $\ell$  álcool/kg açúcar para a usina do caso 1.

#### 4.5 - Produção de Bagaço Excedente Durante a Safra

A avaliação discutida anteriormente pretende ba

sicamente servir de ferramenta prospectiva para o planejamento da safra, mas pode servir também para um diagnóstico de safras já realizadas. Neste sentido, considerando-se volumes de produção e moagem durante a safra 85/86 para a usina apresentada como caso 2, aplicados ao modelo computacional, foi determinada a tabela 11. Não foram considerados, por simplificação, as variações mensais no Pol e na fibra da cana.

Tabela 11 - Produção de bagaços e Índices mensais durante a safra 85/86 na usina caso 2

mês	Excedente de bagaço (%)	álcool/kg açúcar	Balanceamento do vapor de escape (kgv/h)	Produção do bagaço (ton, 50% umidade)
abril	2.35	8,66	49 565	931
maio	2.96	1,46	15 085	1414
junho	2.98	0,73	-1 224	1666
julho	1.64	0,76	-3 404	914
agosto	-3.61	0,67	-11 314	-1960
setembro	-2.75	0,63	-10 474	-1483
outubro	2.16	1,94	8 546	849

Em valores finais, para uma moagem total de 1.232.421 toneladas de cana, a usina produziu, segundo a simulação efetuada, 2331 toneladas de bagaço excedente, com 50% de umidade, correspondente a aproximadamente 1,5% do bagaço total produzido.

PARTE III - POSSIBILIDADES DE INCREMENTO DA ENERGIA PRODUZIDA EM  
USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

5. A CO-GERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

5.1. Introdução

5.2. Conceitos em Co-geração

5.3. Situação de Operação

5.4. Análise de Algumas Situações de Transição no Aumento  
da Pressão

6. A PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO PLANEJAMENTO DA SAFRA EM USINAS  
DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

6.1. O Método de Programação Dinâmica

6.2. Aplicação ao Planejamento da Safra

7. EFEITOS DA INTRODUÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

7.1. A Inovação Tecnológica na Produção de Álcool

7.2. Efeito de Tecnologias Específicas

7.3. Perspectivas para o Setor Energético nas Usinas de  
Açúcar e Álcool

7.4. O Potencial da Secagem do Bagaço

## 5. A CO-GERAÇÃO EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

### 5.1 - Introdução

Os sistemas de co-geração configuram uma forma racional de utilização de energia primária e visam o simultâneo suprimento de energia elétrica ou mecânica e energia térmica, a partir da queima de um único combustível e uso sequencial dos efeitos da combustão. Este procedimento já é clássico na indústria canavieira.

A sua tecnologia é conhecida desde o século passado, quando tiveram intensa difusão. Por volta de 1900, em torno de 58% da produção de energia elétrica nos EUA adotava co-geração, contudo chegando a apenas 4% em 1974. Este dramático declínio pode ser atribuído a numerosos fatores, entre os quais se destacam a expansão das redes elétricas de transmissão e distribuição, o aumento da confiabilidade e qualidade do serviço público e fundamentalmente a redução dos custos reais da energia servida pela concessionária e as restrições legais à aquisição de energia co-gerada pela concessionária. Exatamente por não contar com os fatores acima, até meados deste século, a experiência europeia com co-geração teve maior continuidade. Nos dias de hoje,

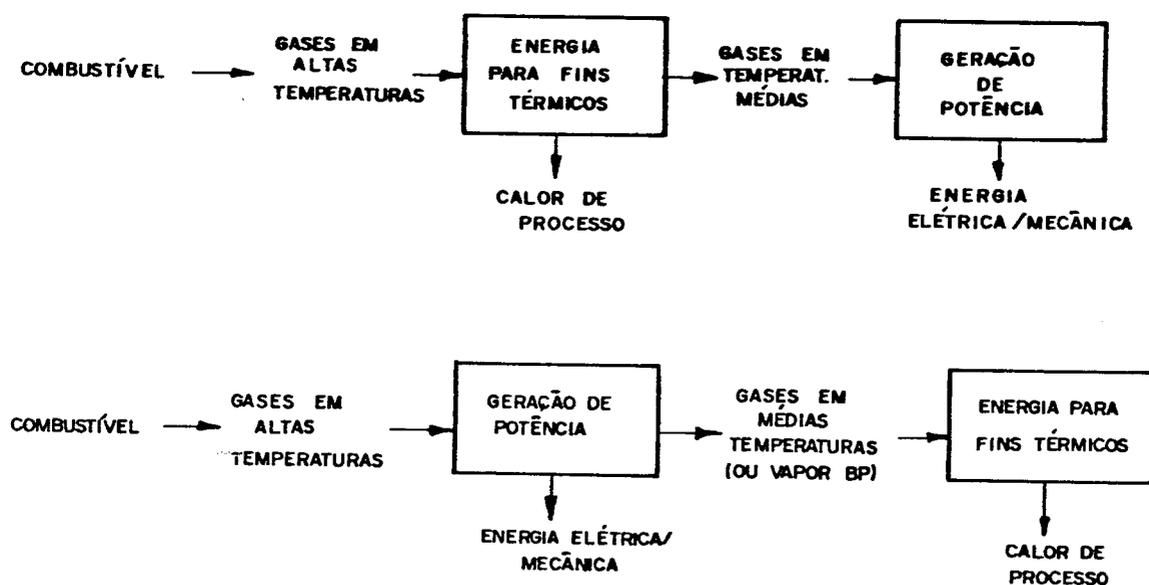
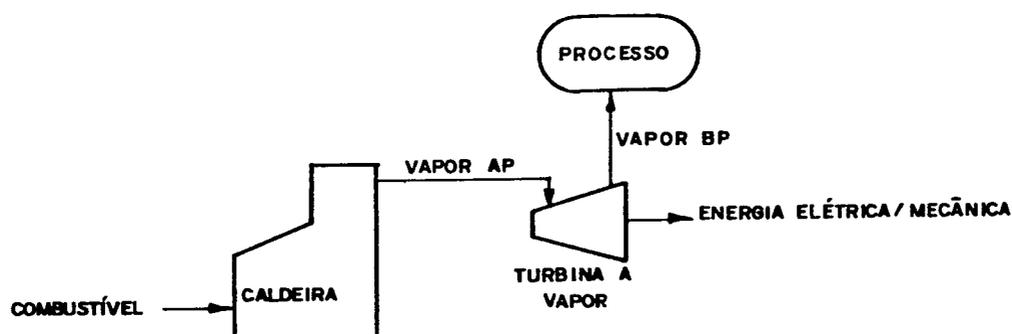


Figura 10 - Sistemas adotados para co-geração

em países como Alemanha, França e Itália, de 16% a 20% da energia elétrica total produzida é co-gerada. [19].

Os sistemas adotados para co-geração podem ser subdivididos, em função do nível de temperatura requerido no processo, como mostra a figura 10. A segunda alternativa, "topping", tem aplicação mais generalizada e emprega essencialmente os ciclos de potência e fornecimento de calor conforme a figura 11.

#### TURBINA A VAPOR:



#### TURBINA A GÁS:

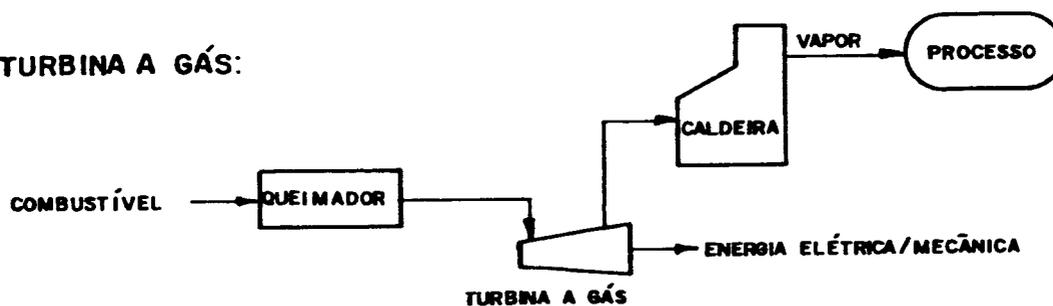


Figura 11 - Ciclos empregados em co-geração

## 5.2 - Conceitos em Co-geração

### 5.2.A - Definição do Problema

Ao se considerar a possibilidade de adoção de

sistemas de co-geração para um dado setor industrial, são colocadas algumas questões, cujas respostas estão condicionadas sobretudo pela viabilidade econômica da alternativa:

- . Convém co-gerar?
- . Qual equipamento adotar?
- . Existem excedentes?

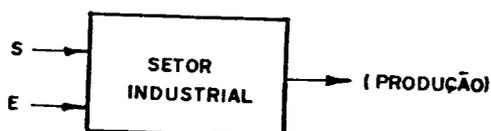
A busca de respostas claras a estas questões passa pelo conhecimento do setor que demanda e do sistema que produz os vetores energéticos, mas é balizada por uma imposição:

A demanda de energia térmica deve ser sempre satisfeita; a demanda de energia elétrica/mecânica pode ser maior, igual ou menor que a disponibilidade.

Isto se dá devido à flexibilidade em obter alternativas de suprimento de potência. A análise desenvolvida a seguir está restrita a sistemas com turbinas a vapor contra pressão, que constituem a maioria das situações existentes e possíveis no contexto industrial. Pode sem dificuldades ser estendida para incluir turbinas a vapor extração/condensação, turbinas a gás e ciclos combinados. Não se diferencia, nesta abordagem, a energia mecânica da energia elétrica, sendo ambas consideradas globalmente. A demanda de energia térmica se associa à demanda de vapor de baixa pressão, no desenvolvimento efetuado.

### 5.2.B - Caracterização do Setor Industrial

O setor industrial pode ser caracterizado, do ponto de vista da demanda energética associada, como consumidor de energia térmica ou de processo, em operações de secagem, aquecimento, evaporação, cozimento, etc. e de energia elétrica ou mecânica, para as operações de transporte, bombeamento, usinagem mecânica, moagem, etc. Esquematicamente, tem-se:



onde: S - consumo de energia térmica, (J/h) ou (J/kg produto);  
 E - consumo de energia elétrica/mecânica, (J/h) ou (J/kg produto)

o que permite obter o parâmetro  $\alpha$ , adimensional e característico de cada setor, com evidentes variações em função da tecnologia e das matérias primas adotadas;

$$\alpha = \frac{E}{S} \quad (5.1)$$

Sendo conhecida a temperatura requerida para processo e o fluido empregado para aquecimento, tem-se:

$$m_s = \frac{S}{e} \quad (5.2)$$

onde:  $m$  - fluxo mássico requerido no processo, (kg/h) ou (kg/kg<sub>produtos</sub>);

$e$  - energia térmica específica para aquecimento, no caso de vapor, aproximadamente igual à entalpia de condensação, que em condições típicas de processo (1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, 127°C) vale 521 kcal/kg.

Como ilustração, determinou-se o valor de  $\alpha$  para alguns setores industriais, dados na tabela 12. Com exceção do setor "açúcar e álcool", onde  $\alpha$  foi obtido a partir de dados típicos (consumo de energia elétrica: 11,5 kWh/TC, consumo de energia mecânica: 20 HPh/TC e consumo de vapor na fabricação: 400 a 600 kgv/TC), nos demais casos, adotou-se o consumo energético total do setor, conforme o Balanço Energético Nacional, desagregado em combustíveis e energia elétrica. Supondo que todos os combustíveis são empregados para fins térmicos, com eficiência de 75%, e que toda a eletricidade se destina a fins motrizes ou de iluminação, pode ser estimado  $\alpha$ . Para evitar a possibilidade de inclusão subjetiva de eletrotermia e co-geração, práticas que decorrem da recente conjuntura energética, o ano de corte empregado foi 1975. Na tabela 12 também se incluem o nível de temperatura exigido no processo e o fluido típico adotado para transporte de energia térmica, fatores decisivos em relação à seleção do sistema de co-geração.

Deve ser acentuado que o valor de  $\alpha$  dado acima é indicativo, representando a média do setor, dentro do qual seguramente apresentam-se variações de uma empresa para outra.

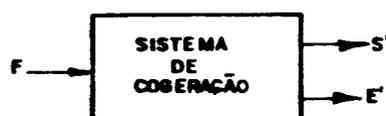
Tabela 12 - Parâmetros sobre co-geração para alguns setores industriais

Setor Industrial	Consumo de Combustíveis 1975 (10 <sup>3</sup> tEP)	Consumo de E.Elétrica 1975 (Gwh)	Nível de Temperatura no Processo	Fluído para transporte E.Térmica	$\alpha = E/S$
Cerâmica	1507	683	alto	gases	0,0481
Papel e Celulose	1042	2275	baixo	vapor	0,2318
Textil	757	3030	baixo	vapor	0,4249
Alim. e Bebida*	5555	3677	baixo	vapor	0,0703
Açúcar e Álcool	-	-	baixo	vapor	0,1089 a 0,726

\*(inclui o setor açúcar e álcool)

### 5.2.C - Caracterização do Sistema de Co-geração

Analogamente ao setor industrial, o sistema de co-geração pode ser esquematizado em função dos fluxos energéticos associados. Para o ponto de eficiência máxima, tem-se:



onde: F - consumo de combustível na co-geração, (kg/h);

S' - energia térmica produzida, (J/h);

E' - energia elétrica/mecânica produzida, (J/h).

de onde se obtém o parâmetro  $\beta$ , que caracteriza o sistema de co-geração:

$$\beta = \frac{E'}{S'}$$

O valor de  $\beta$  depende do tipo de equipamento de co-geração e das condições de operação. No caso de turbinas a vapor de contra pressão, com pressão de escape para vapor de processo de 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> (manométricos), a figura 12 apresenta a variação de  $\beta$  em função da eficiência isentrópica da turbina, para diferentes condições de entrada na turbina. Estes resultados,

típicos para usinas de açúcar e álcool, foram obtidos por simulação computacional. Observe-se que as eficiências típicas para turbinas a vapor são 47% no caso de máquinas simples, 1 estágio e 60% para máquinas mais aperfeiçoadas, múltiplos estágios. Para turbinas a gás,  $\beta$  situa-se entre 0,48 a 0,77 e para ciclos combinados, turbina a gás e turbina a vapor,  $\beta$  está entre 0,60 a 1,09, sempre em função das características de projeto e operação.

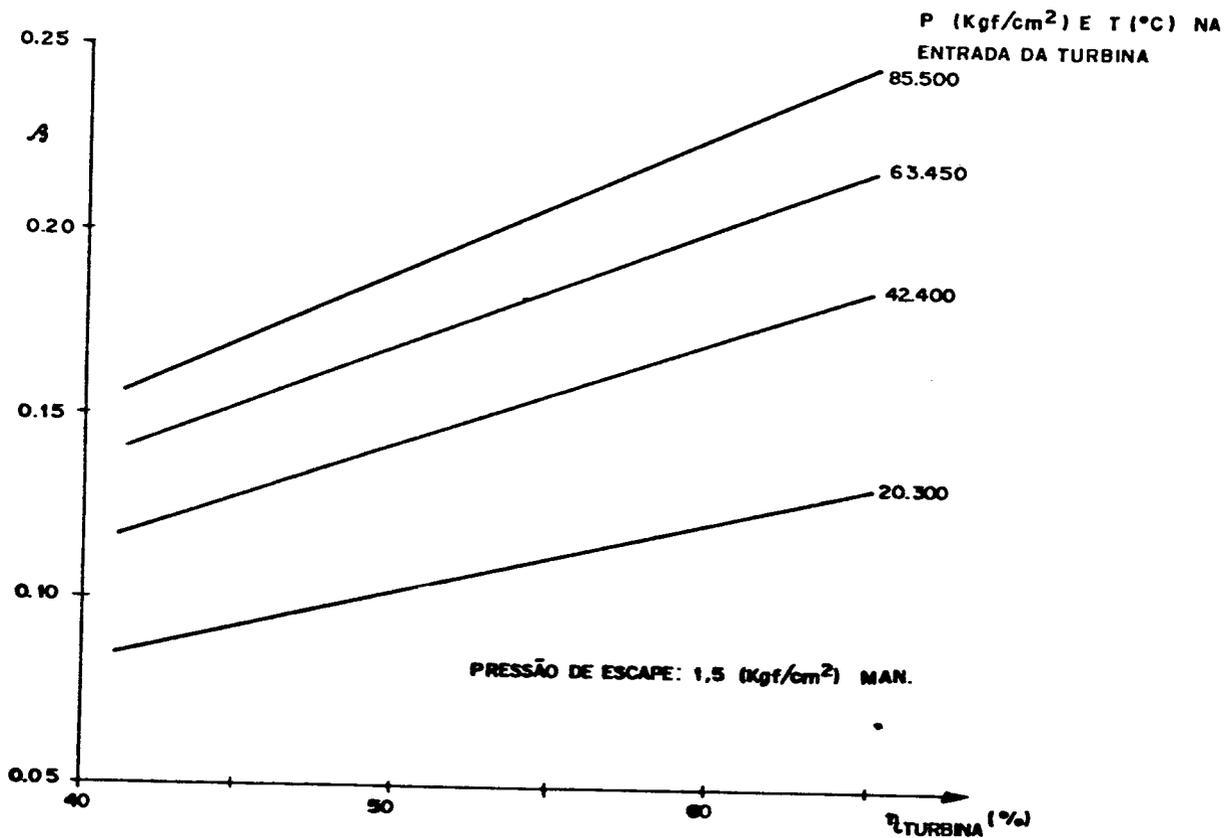
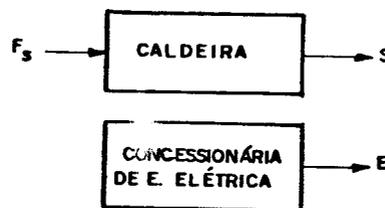


Figura 12 - Variação de  $\beta$  com as condições de operação, para turbina a vapor contra pressão

Ao sistema de co-geração corresponde um sistema tradicional ou clássico para fornecimento de calor e energia elétrica, dado como:



onde:  $F_s$  - consumo de combustível para geração independente do valor (Kg/h)

Neste caso, as energias produzidas são iguais à demanda, já que não há dependência entre a produção de calor para o processo e o requerimento de energia elétrica.

### 5.3 - Situações de Operação

O sistema de co-geração deve ajustar-se sempre às exigências do setor industrial, mesmo que isto implique na produção de excedentes. Como já afirmado, é preciso assegurar o fornecimento de calor para processo, logo:

$$S = S' \quad (5.3)$$

Os processos reais de fabricação não possuem demandas de calor de processo regulares e uniformes, mas bastante variáveis. Por exemplo, no caso da fabricação de açúcar, onde coexistem operação contínua e em batelada, a demanda máxima de vapor pode atingir valores 50% maiores do que a demanda média, conforme cita Hugot [14]. Desta maneira, seja por questões de margem de segurança, seja por contingências e irregularidades na operação da planta industrial conjugada, o sistema de co-geração deve ser capaz de enfrentar tais desequilíbrios. Isto vale dizer que o sistema de co-geração sempre opera em torno de um ponto médio de demanda. Da curva de carga térmica, exemplificada na figura 13, pode ser obtido o valor médio da demanda térmica,

$$S = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (5.4)$$

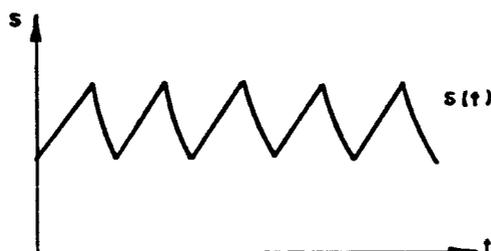


Figura 13 - Curva de carga térmica para um processo arbitrário

As situações de operação que podem ocorrer quando se associa um sistema de co-geração genérico com um setor industrial com demanda térmica e eletromecânica uniforme são:

a) Situação 1:  $\alpha = \beta$ :

Há equilíbrio e o sistema de co-geração opera no ponto energeticamente recomendável, sem excedentes. As alterações visando aperfeiçoar e reduzir o consumo de energia tem de buscar simultaneamente a geração de potência e o fornecimento de calor ou, por outro lado, a eficiência de utilização do combustível.

b) Situação 2:  $\alpha \neq \beta$ :

Há desequilíbrio entre a demanda e a produção de potência e calor, no ponto ótimo de operação da co-geração. Como a demanda térmica deve ser atendida, surgem duas possibilidades, analisadas a seguir.

- Caso 1:  $E < E'$ : a demanda de energia elétrica/meccânica é menor que a disponibilidade e portanto o consumo de vapor em processo passa a ser determinante. Não há consumo adicional de combustível para produção de potência e  $F = F_s$  (vide item anterior). O sistema se equilibra com a expansão de vapor de alta pressão para as condições de processo através de uma válvula redutora de pressão ou pela queda de pressão no regulador de velocidade das turbinas a vapor. De uma cuidadosa análise do grau de superaquecimento do vapor na linha para processo, que requer condições de saturação, das perdas térmicas na linha de vapor e das oscilações de demanda pode concluir-se sobre a conveniência da instalação de dessuperaquecedores de vapor, que neste caso, afetam diretamente o consumo de combustível.

É interessante observar neste caso que o bagaço deverá ser necessariamente queimado para atender à demanda de processo, sendo contudo o vapor gerado na pressão da caldeira. Fica evidente a possibilidade de geração adicional de energia, além das estritas necessidades da usina. Em algumas instalações existem mesmo turbogeradores em reserva ou com baixo fator de utilização, permitindo imediata interligação com o sistema da concessionária para venda de energia. A possível vantagem econô

mica da venda de energia co-gerada deve ser comparada com a economia de bagaço resultante de aperfeiçoamento no processo.

- Caso 2:  $E < E'$ : a demanda de energia elétrica/mecânica é maior que sua disponibilidade no ponto de equilíbrio. O déficit pode ser abastecido pela compra da concessionária ou pela produção de quantidade adicional de vapor,  $\Delta m_s$ , destinada à produção de potência, mas sem aplicação como energia térmica no processo. Neste caso, surge um sobreconsumo de combustível, dado por  $(F - F_s)$ .

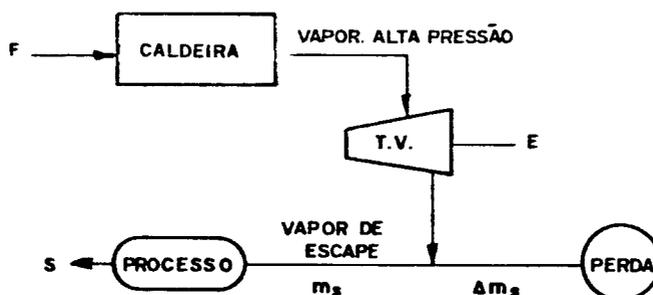


Figura 14 - Sistema de co-geração desequilibrada, com  $E > E'$

Considerando que a queima de combustível para co-geração e para geração independente de vapor seja feita nas mesmas condições de eficiência, tem-se que:

$$F_s = \frac{m_s}{k}$$

$$F = \frac{m_s + \Delta m_s}{k}$$

onde  $k$  - produtividade de vapor, nas condições consideradas caldeiras, ( $\text{kgv}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ), de onde se determina o sobreconsumo de combustível:

$$(F - F_s) = \frac{\Delta m_s}{k}$$

O valor do parâmetro  $k$  depende essencialmente do tipo de combustível e das condições de operação e projeto da caldeira, como por exemplo pressão e a temperatura do vapor, exist

tência de economizador e pré-aquecedor de ar, tipo de queimador, etc. A tabela 13 apresenta alguns valores indicativos de k, para bagaço e outros combustíveis, calculados para condições médias.

Tabela 13 - Valores de produtividade de vapor

COMBUSTÍVEL	Vapor a 20 (kgf/cm <sup>2</sup> ) e 300°C		Vapor a 42 (kgf/cm <sup>2</sup> ) e 400°C	
	$\eta_{cald} = 75\%$	$\eta_{cald} = 80\%$	$\eta_{cald} = 75\%$	$\eta_{cald} = 80\%$
bagaço (50% umid.)	2,20	2,50	2,10	2,30
lenha	2,46	2,80	2,35	2,57
carvão vapor "médio"	4,34	4,94	4,15	4,55
óleo combustível "médio"	10,04	11,41	9,58	10,50
Valores de k, produtividade específica de vapor (kgv/kg <sub>comb</sub> )				

#### 5.4 - Análise de Algumas Situações de Transição no Aumento de Pressão do Vapor

É conhecido o efeito positivo que o emprego de pressões elevadas para o vapor vivo traz sobre o balanço de vapor da usina e conseqüentemente sobre o excedente de bagaço disponível, dependendo do consumo de vapor nos processos. Em grande parte das usinas tem-se procurado, quando necessário, substituir as caldeiras antigas por modelos mais modernos, com novas concepções de fornalha e pressões maiores, visando exatamente a otimização do balanço térmico. Contudo, tal substituição não se dá de modo brusco. Geralmente as usinas trocam apenas parte de suas caldeiras e suas turbinas, devido ao nível de investimento requerido e progressivamente incorporam os novos sistemas de geração e uso de vapor. Resulta deste quadro que certas usinas possuem 4 níveis de pressão no circuito de vapor: vapor vivo alta pressão, vapor vivo média pressão, vapor de escape ou de processo e vapor vegetal. Existem mesmo situações em que o estado e a confiabilidade dos equipamentos que utilizam vapor vivo de média pressão não recomendam sua substituição e a adoção de 4 níveis de pressão passa a ser um esquema normal e não transitório.

A análise desenvolvida a seguir busca determinar para duas situações básicas do circuito de vapor, com caldeiras a dois níveis de pressão, as produções requeridas de vapor e o excedente ou falta de vapor na linha de vapor de escape. Outras situações poderiam ser estudadas, como o uso de turbinas de condensação na geração elétrica, todavia com pouco significado nas perspectivas atuais da indústria canavieira.

As situações analisadas estão esquematizadas na figura 15, onde a linha de vapor vegetal não foi incluída já que está sempre balanceada a partir da produção do preevaporador e expansão em "by-pass", correspondendo a uma demanda na linha de vapor de escape.

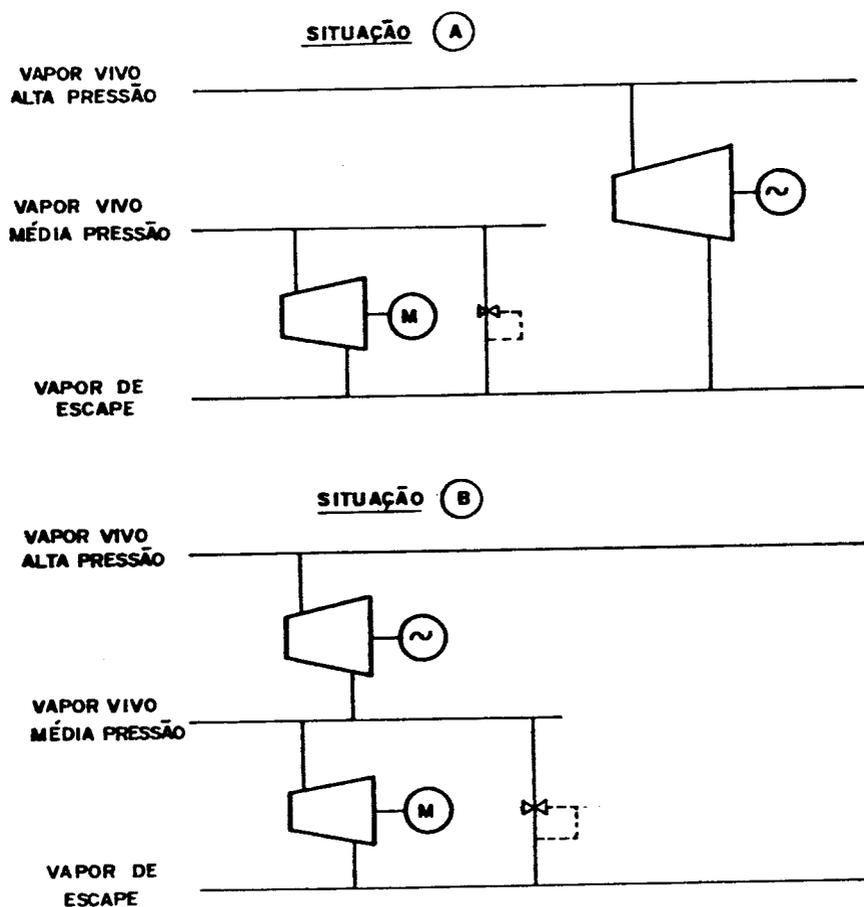


Figura 15 - Situações de transição no aumento de pressão

Foi desenvolvido um programa que, a partir das condições de operação, determina, para os esquemas básicos A e B, as produções necessárias de vapor por nível de pressão e o ba lanceamento na linha de vapor de escape, bem como a produção de vapor vivo a média pressão, efetivamente necessária e os parâme

tros  $\alpha$  e  $\beta$  de avaliação de co-geração. Os resultados obtidos para quatro configurações de dados estão no Apêndice 5.

O modelo computacional permite constatar que estão em jogo dois efeitos. Para a alternativa A, o vapor vivo AP expande até pressões mais baixas que na alternativa B, em turbinas com eficiência isentrópica maior do que as turbinas de uso geral. Por outro lado, a alternativa B é uma "cascata térmica" com maior massa de vapor desde o nível de alta pressão, o que sob o ponto de vista termodinâmico é desejável. Nas situações estudadas, que refletem a diversidade de casos na indústria, observou-se que o último efeito é preponderante, indicando que a alternativa B é melhor, como indica a tabela 14. Mesmo assim, é preciso observar que podem existir em outros setores industriais, situações que justifiquem a alternativa A. A tabela 14 resume os resultados do Apêndice 5.

Tabela 14 - Evaporação total necessária para os casos A e B

Pressão AP	Pressão MP	evaporação total necessária (kgv/TC)	
		Caso A	Caso B
42	16	499,44	368,53
42	21	445,67	403,31
60	16	479,60	368,53
60	21	425,84	314,77

Ainda que a tabela 14 tenha sido levantada para situações em que a evaporação total necessária não é afetada pela demanda de vapor de processo, este parâmetro é essencial, pois sempre que o "excedente" assume valores negativos, é a fabricação que está efetivamente determinando o nível de produção de vapor. Da mesma forma são fundamentais os consumos específicos de potência mecânica e elétrica, que na avaliação foram adotados igual à média das usinas cooperadas, mas podem variar bastante.

Os excedentes de bagaço que podem ser atingidos dependem diretamente das eficiências das caldeiras empregadas. Admitindo-se que as caldeiras antigas, mesmo quando melhoradas, possuem produtividade de vapor da ordem de 2,2 kgv/kg de bagaço

e que as caldeiras modernas, para pressões elevadas, tem este índice perto de 2,5 kgv/kg de bagaço, a alternativa B é novamente favorecida, pois corresponde a maior volume de vapor sendo gerado em condições de maior eficiência.

Esta última observação nos remete à questão realmente decisiva, além de considerações puramente termodinâmicas. A substituição parcial do parque de geração de vapor se deve principalmente aos altos investimentos associados às caldeiras. Sob este critério a alternativa B é bastante discutível já que implica um grande volume de geração de vapor sob alta pressão, e é significativa a diferença de preço entre caldeiras de média e alta pressão. Uma possibilidade a ser melhor estudada talvez seja iniciar a adoção de caldeiras AP pela alternativa A, passando posteriormente à alternativa B e daí, à total adoção de pressões mais elevadas, se conveniente.

Apenas com uma cuidadosa análise particularizada, em que todos os parâmetros de demanda térmica, mecânica e elétrica, inclusive suas curvas de carga, são conhecidos, bem como os módulos de geração de vapor e seus custos, é possível uma indicação alternativa a adotar. A análise econômica tem aqui um papel fundamental.

## 6. A PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO PLANEJAMENTO DA SAFRA EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

### 6.1 - O Método de Programação Dinâmica

Desenvolvido originariamente por Bellman, em torno de 1955, este método tem sido reconhecido como uma ferramenta poderosa na otimização de uma ampla variedade de situações. Sua aplicação não é sofisticada, sendo muito adequada através de algoritmos computacionais. E foi a partir dos anos 70 que a Programação Dinâmica, PD, recebeu seu maior impulso, associado à expansão da capacidade e velocidade dos computadores modernos [20].

Os problemas de otimização aos quais a PD se aplica são genericamente chamados problemas de otimização dinâmica, problemas de controle variacional ou problemas de otimização para processo de decisão em estágios. Estes problemas caracterizam-se pelo fato que a decisão tomada no presente vai afetar o comportamento do sistema no futuro, de tal forma que a solução ideal é uma sequência de decisões, durante um período de controle, e não apenas uma solução para um momento determinado.

Esta classe de problemas, aos quais a PD conduz a uma solução ideal, é muito grande. As equações do sistema dinâmico podem ser não lineares e variáveis no tempo. O critério de performance, no qual a otimização é baseada, pode ser bastante arbitrário. As restrições mais diversas são permitidas, e a solução será sempre um ótimo absoluto, não um máximo ou mínimo local. Além disso, a PD pode considerar efeitos estocásticos ou randômicos, fornecendo um mapa de decisões ótimas, a serem adotadas conforme o comportamento do sistema.

Maiores detalhes sobre este método podem ser obtidos no Apêndice 6.

### 6.2 - Aplicação ao Planejamento da Safra

A decisão de como distribuir as cotas de produção de açúcar, em usinas com destilaria anexa, ao longo da safra,

e visando maximizar a geração de excedentes energéticos, é um interessante problema a ser abordado através da Programação Dinâmica. Assim, a partir das equações anteriormente descritas, desenvolveu-se um programa computacional bastante flexível e capaz de estabelecer um plano de produção industrial para máxima produção de bagaço. Atualmente este planejamento é efetuado com base nas limitações de produção e estocagem e nas pressões da demanda, sem considerar os efeitos sobre a produção de bagaço.

Claramente é um problema de decisões em estágios, e as decisões se afetam progressivamente. A abordagem sugerida tem os seguintes parâmetros:

equações do sistema

$k$  - variável de estágio - tempo

$x(k)$  - variável de estado - fração completada da cota, ou seja, cana moída para açúcar até o estágio  $k$ , em relação à moagem total necessária para açúcar.

$u(k)$  - variável de controle-fração da cana destinada ao açúcar, em relação à moagem total, durante o período de  $k$  até  $(k+1)$ .

critério de performance

adota-se a quantidade de bagaço excedente, que depende das variáveis de estado e de controle do sistema.

restrições

os valores final e inicial da cota são necessariamente iguais a 100% e 0%, respectivamente, e a cana disponível no período pode completar apenas uma fração da cota. Além disso, os valores já atingidos da cota não podem ser reduzidos, evidentemente.

Evidentemente o problema é mais complexo do que a formulação usada aqui, envolvendo, entre outros, detalhes do custo de estocagem dos produtos (principalmente álcool) e a própria política da comercialização.

O bagaço produzido por estágio para uma da usina depende essencialmente do volume de cana processada durante o período, da fibra da cana e do perfil de produção, isto é, dos volumes relativos de produção de álcool e açúcar. Assim, é possível estimar-se o volume total de bagaço produzido, e com o auxílio de curvas como da figura 8 no capítulo anterior, a partir da relação de produção, obter-se o excedente de bagaço. Fica aqui evidente a grande utilidade do modelo de simulação para o planejamento, permitindo avaliar os níveis de excesso de bagaço sob diversas situações operacionais.

Com relação às características da cana e seu volume esperado de produção, são valores estimados pelo pessoal da área agrícola com razoável nível de certeza. Um esforço para aumentar a confiabilidade destas informações pode corresponder diretamente a um melhor resultado final no planejamento; não obstante, o modelo de programação dinâmica sugerido permitir correções durante a execução da safra. Sempre que houver contingências, a nível de quantidade e características da cana para cada período, ou a nível de demanda estimada dos produtos finais, ou ainda a nível de equipamento e processo, o planejamento deve ser refeito, estabelecendo-se um novo percurso ótimo. Recomenda-se mesmo uma permanente revisão e acompanhamento dos horizontes e das condições da usina que possam afetar seus excedentes energéticos, para que as correções sejam feitas sempre em tempo.

A seguir são apresentados alguns resultados obtidos através do modelo computacional, aplicado à usina Caso 1, empregando-se dados de fornecimento de cana relativos a 1985. Durante este ano, a moagem total foi de 2.738.100 toneladas de cana, distribuídas em cada mês conforme tabela .

*Tabela 15 - Dados mensais de moagem de cana para usina do exemplo de aplicação da Programação Dinâmica*

mês	moagem (TC)	mês	moagem (TC)
maio	17.540	agosto	711.120
junho	531.330	setembro	639.400
julho	673.360	outubro	165.450

Conhecendo-se a produção de açúcar realizada (ou a realizar) por esta usina, de 1.025.440 sacas de 50 kg e adotando-se uma produtividade média de 106,4 kg aç/TC, tem-se o total de cana necessária apenas para a fabricação de açúcar, igual a 951.800 TC. A partir destes dados pode-se recolocar o problema inicialmente proposto: como distribuir esta moagem para açúcar dentro do programa de fornecimento de cana, da tabela 15, buscando máxima produção de bagaço excedente?

Para maior pertinência como a realidade industrial foi adicionada, neste exemplo, uma restrição adicional, associada à moagem máxima admissível para açúcar no período, devido às limitações de capacidade nos equipamentos de fabricação. O valor arbitrado para esta restrição foi de 350.000 TC por período. A figura 16 mostra os diversos caminhos ótimos obtidos neste exemplo para operação com as turbinas a vapor na condição ótima e na condição real de serviço. Neste caso a discretização empregada foi de 10%.

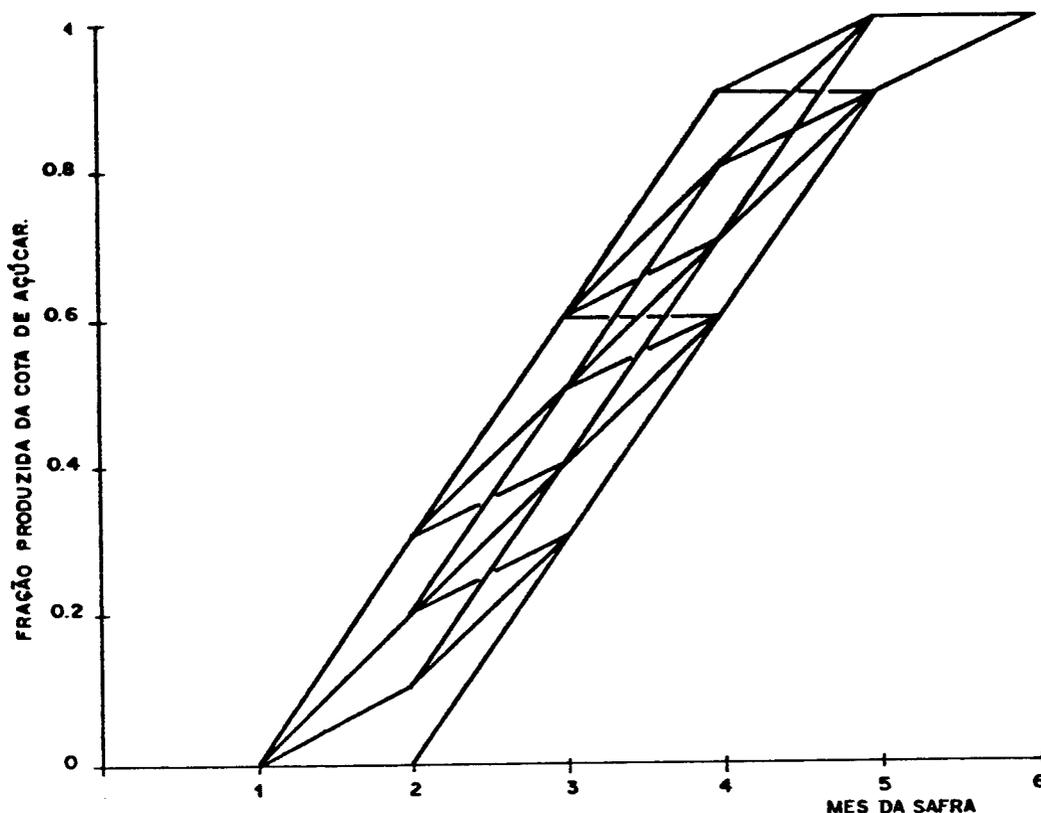


Figura 16 - Percursos ótimos no planejamento da safra, para a usina caso 1, com excedentes de bagaço conforme figura 8

É interessante observar que a eficiência das turbinas não afeta o percurso ótimo, mas apenas o excedente final de bagaço. Para as turbinas em condições ideais de carga e rotação, o excedente de bagaço no final da safra seria 86.350 toneladas, correspondente a 12,6% do bagaço total produzido. Para as turbinas nas condições reais de operação tais excedentes seriam de 35.680 toneladas, relativos a 5,2% do total. A presença de diversos caminhos ótimos deve-se à linearidade da relação entre o excedente de bagaço e o perfil da produção, admitida até aqui constante com o tempo, de acordo com a figura 8.

Quando se considera que o excedente de bagaço varia com o tempo, para uma relação dada de produção, em função do desgaste dos equipamentos mecânicos e das incrustações nos equipamentos térmicos, a solução obtida tem um único percurso ótimo, como mostrado a seguir, como discretização de 5%.

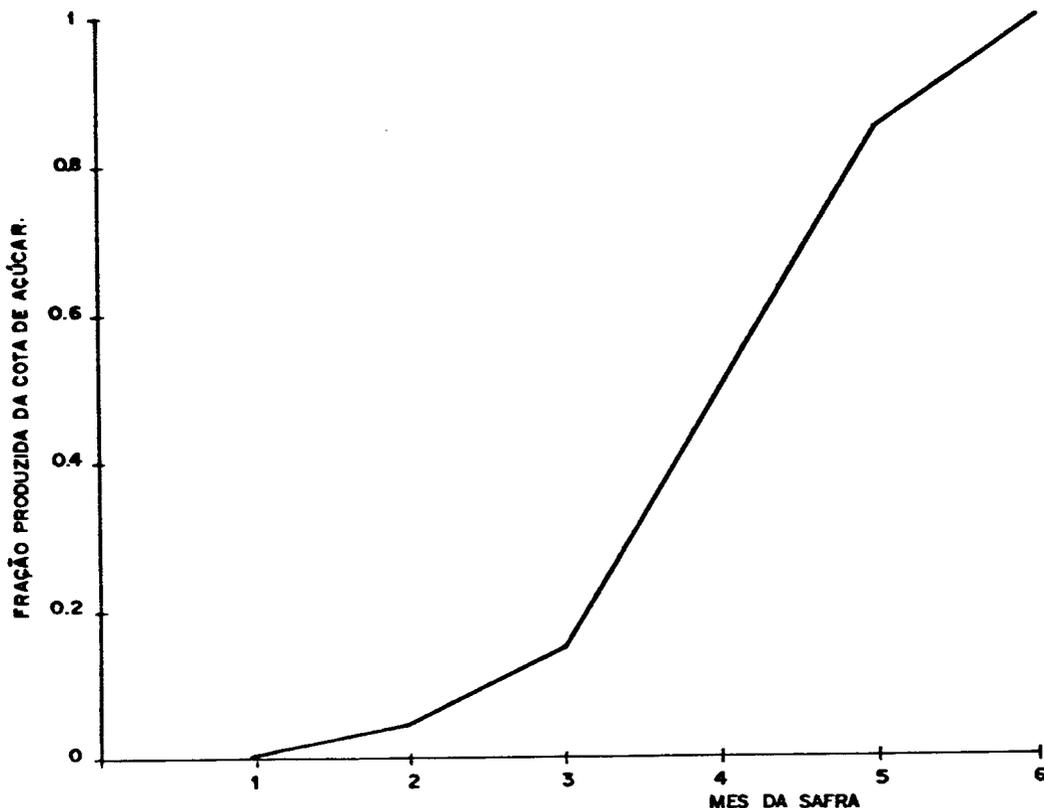


Figura 17 - Percurso ótimo para o planejamento da safra em situação análoga à figura anterior, considerando uma redução de 10% na geração de excedente de bagaço ao longo da safra

Observe-se que este último resultado mostra-se conforme poderia ser esperado. Se o excedente de bagaço é maior no início da safra e se maiores volumes de álcool, relativamente ao açúcar, também significam maiores excedentes de bagaço, é razoável que se desloque, dentro das limitações de moagem, a produção de açúcar para o final da safra. A tabela 16 detalha a figura anterior.

Tabela 16 - Dados mensais do plano de safra considerando queda no bagaço excedente ao longo da safra (refere-se ao gráfico anterior).

mês (estágio)	moagem para açúcar (1000 TC)	fração completada da cota de açúcar		produção de bagaço no mês (1000 ton)	produção total de bagaço (1000 ton)
		início do mês	fim do mês		
maio (1)	0,00	0,00	0,00	0,31	0,31
junho (2)	47,59	0,00	0,05	8,80	9,11
julho (3)	95,18	0,05	0,15	10,43	19,54
agosto (4)	333,13	0,15	0,50	7,50	17,04
setembro (5)	333,13	0,50	0,85	6,14	33,18
outubro (6)	142,77	0,85	1,00	0,79	33,97

Sem maiores dificuldades podem ser incluídos no modelo de Programação Dinâmica diversos outros condicionantes e funções de contorno. Por exemplo, podem ser consideradas variações periódicas da fibra, Pol da cana, umidade do bagaço, etc. Outra linha interessante a explorar seria a abordagem probabilística para o fornecimento e características de cana. Neste caso define-se o caminho ótimo dentro de um intervalo de confiança desejável.

Em síntese, acredita-se que este programa, desde que bem adaptado à situação particular de cada usina, possa servir de forma rápida e simples para auxiliar a determinação (e a correção) do plano de safra energeticamente mais recomendável.

## 7. EFEITO DA INTRODUÇÃO DE NOVAS TECNOLOGIAS

Neste capítulo são discutidas as perspectivas energéticas da indústria sucro-alcooleira, considerando a adoção de novos métodos e técnicas, já disponíveis ou em desenvolvimento. Com maiores detalhes é abordada a questão da secagem do bagaço.

### 7.1 - A Inovação Tecnológica na Produção de Açúcar e Alcool

Embora seja um setor industrial de importância secular na economia brasileira, seu dinamismo face à absorção e geração de novas técnicas foi pouco expressivo. As usinas eram mais reconhecidas pelo seu apego às formas tradicionais de construção e operação, e as poucas alterações tecnológicas significativamente marcantes foram a adoção da moenda de eixo horizontal, o aquecimento a vapor e o múltiplo efeito na evaporação [21].

A partir de meados da década passada este setor foi bastante alterado em seu perfil de produção, essencialmente através da demanda de álcool combustível, que atualmente já corresponde a quase a metade de toda a cana moída no país. Vivia-se então os denominados choques do petróleo (1973 e 1979), a requerer uma nova racionalidade energética, em especial nos países com pequenas reservas de hidrocarbonetos. Com abundante solo agricultável e clima adequado, a solução brasileira foi optar pela biomassa energética.

É interessante observar como este novo contexto propôs questões e limitantes até então pouco considerados, como o abastecimento energético. Como qualquer empreendimento comercial, a usina tradicional deveria produzir açúcar com rentabilidade econômica, mesmo que tal objetivo incluísse a demanda de óleo combustível. Já os novos produtores tiveram de encarar, além da meta econômica evidentemente prioritária, restrições sobre os balanços térmicos e energéticos. Atualmente uma usina produtora de açúcar e álcool é um complexo transformador de energia solar, armazenada na cana como sacarose e celulose, em

energia secundária de diversas formas, líquida (álcool), sólida (bagaço) e elétrica.

A apropriação de tecnologia foi portanto uma imposição deste quadro, sem a qual não poderia ser enfrentada a profunda mudança no panorama energético. Um exemplo de como a adoção de novos métodos e equipamentos permitiu elevar a produtividade é mostrado na figura 18, em que se observam alguns índices operacionais típicos em uma usina durante os últimos anos [22].

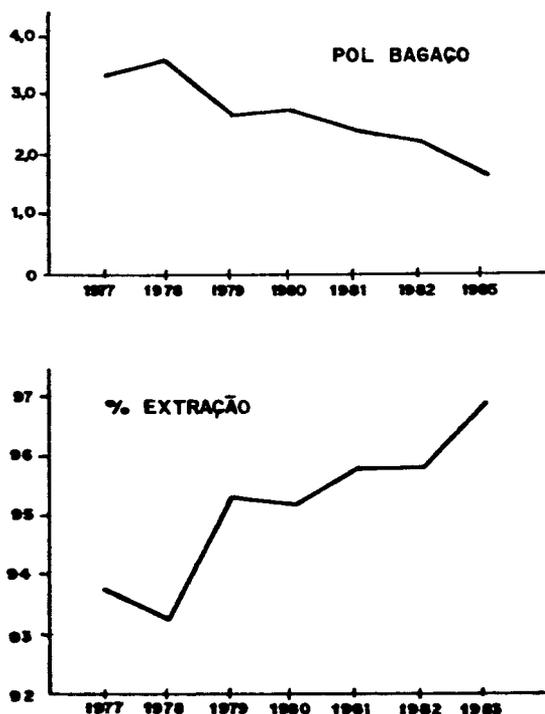


Figura 18 - Sacarose no bagaço e extração para uma moenda que incorporou gradativamente tecnologias recentes [22]

A resposta ao desafio da chamada crise energética deu-se assim não apenas mediante a mera extensão da área plantada em cana, mas também pela expressiva evolução tecnológica nas áreas industrial e agrícola. Os aspectos energéticos têm hoje grande relevo e certamente a margem de aperfeiçoamento é estimulante. Conforme um estudo, a nível de processos ideais e segundo a Termodinâmica Clássica, o atual consumo de energia na fermentação e destilação do álcool é cerca de vinte vezes superior ao consumo mínimo teórico. No Apêndice 7 se apresenta em detalhe a determinação deste consumo "mínimo minimorum".

## 7.2 - Efeito de Tecnologias Específicas

Para definir as tendências de evolução tecnológica e selecionar aquelas capazes de afetar o perfil energético, este trabalho apoiou-se nas publicações do Centro de Tecnologia Copersucar, em especial os Seminários de Tecnologia Industrial. Estes volumes reúnem e apresentam sinteticamente as técnicas já desenvolvidas ou em desenvolvimento para o setor agroindustrial canavieiro [22].

Nos itens a seguir são sucintamente avaliadas algumas novas tecnologias em seu efeito sobre a demanda de vapor e energia elétrica, classificadas em cinco grupos: extração de caldo, fabricação de álcool e açúcar, utilidades, instrumentação e controle de processos e controle da poluição.

### 7.2.A - Alimentação, Preparo e Moagem da Cana

Os objetivos básicos dos aperfeiçoamentos nesta área tem sido a elevação das taxas de moagem e a melhoria do nível de extração, correspondendo a menor perda de sacarose no bagaço. Os estudos têm se voltado para a aplicação de calhas de alimentação por gravidade, rolos de pressão, rolos alimentadores e picadores e desfibradores de grande eficiência. De um modo geral tais equipamentos implicam em maiores potências instaladas e seja através de turbinas a vapor ou motores elétricos, causam uma elevação na demanda de vapor vivo.

O emprego de sistemas de embebição é também recomendado, especialmente visando reduzir a sacarose do bagaço. Do ponto de vista energético é fundamental sua correta utilização, já que o excesso de água no caldo impõe uma demanda térmica adicional na evaporação.

Existe uma aparente possibilidade das moendas serem paulatinamente substituídas por difusores, devido a sua maior eficiência de extração de açúcares e menor consumo de energia. No entanto, o atual predomínio das moendas pode se prolongar, apoiado nos ganhos de eficiência mecânica, que implicam em menores potências requeridas e na adoção de novos sistemas de acionamento, com espaço inclusive para motores elétricos [23].

Com a tecnologia das moendas modernas já se conseguem extrações médias comparáveis aos difusores.

Segundo Ebeling [24], a utilização de materiais de alta resistência nas camisas das moendas tem permitido reduzir a umidade do bagaço em 3 a 4 pontos percentuais.

### 7.2.B - Fabricação de Açúcar e Álcool

Nesta área são diversas as novas tecnologias já em aplicação ou em desenvolvimento, refletindo a diversidade de alternativas existentes para os processos. As modificações sugeridas buscam aumentar a qualidade do produto final, elevar a produtividade e reduzir a demanda energética.

Para o tratamento do caldo se propõe o emprego de balões de reevaporação do caldo aquecido e de trocadores de calor regenerativos, acarretando uma redução significativa no consumo de vapor de baixa pressão. No caso dos trocadores regenerativos, sua utilização implica também em menor consumo de água e conseqüente redução no consumo de energia elétrica.

Na fabricação de açúcar, a modernização da seção de evaporação tem efeito direto na economia de vapor. Podem ser modificados o número de efeitos, incorporados tanques de reevaporação dos condensados e efetuadas sangrias adequadas para os tachos a vácuo e aquecedores, com efeitos positivos sobre o consumo de vapor de escape. Os aperfeiçoamentos na seção de cozimento atendem mais aos requisitos de qualidade do açúcar, mas tem permitido reduzir o consumo de vapor.

Associadas também à fabricação de açúcar, algumas inovações correspondem a maiores demandas de energia elétrica. Este é o caso de melhores sistemas de produção de vácuo, como multijatos e hidroejetores, desaguamento mecânico das torças de filtro e filtragem de caldo e xarope. Observe-se que melhores sistemas de vácuo também implicam em reduzir o consumo de vapor de baixa pressão.

Na fabricação de álcool, os desenvolvimentos tecnológicos podem indicar a elevação do consumo de vapor, no caso da redução ou refinação de álcool baixo, ou uma maior de

manda de energia elétrica, como nos equipamentos para recuperação de álcool das dornas, na fermentação contínua e nos sistemas de separação de óleo fúsel.

As possibilidades para redução da demanda de vapor na destilaria dependem essencialmente da incorporação de colunas mais eficientes, cuja tecnologia já é corrente na indústria química. Tais colunas têm pratos valvulados e possuem menores taxas de refluxo. Tem sido também difundidos os regeneradores e sistemas de aquecimento indireto, com ganhos na eficiência térmica. A operação das colunas sob pressão ou em vácuo está todavia em estudos.

Um melhor controle microbiológico na seção de fermentação tem importância sobre a demanda de vapor, já que uma concentração mais elevada em açúcares no caldo pode significar um vinho com teor alcoólico mais alto e menores consumos nas colunas de destilação.

O desenvolvimento de novos métodos de separação e concentração de correntes líquidas, com o uso de membranas semi-porosas em sistemas de osmose reversa, pode no futuro deslocar grande parcela da demanda de vapor de baixa pressão para energia elétrica.

### 7.2.C - Utilidades

Os aperfeiçoamentos na área das utilidades têm implicação imediata sobre o balanço energético e geralmente são conduzidos com este fim.

Visando aumentar a eficiência térmica na geração de vapor, tem sido difundida a utilização de desaeradores, sistemas de pré-aquecimento de ar de combustão, secadores de bagaço e novos sistemas de queima em grelha inclinada ou em suspensão. É preciso lembrar que tais equipamentos geralmente respondem a maiores demandas de energia elétrica. Por exemplo, as modificações dos sistemas de exaustão das caldeiras, com a incorporação de pré-aquecedores de ar, tem forçado o emprego de ventiladores de tiragem induzida, com elevadas potências instaladas.

A racionalização na demanda de energia elétrica tem sido objeto de vários estudos e propostas, em que se incluem o redimensionamento dos motores, a correção do fator de potência e a sincronização dos turbogeradores na casa de força. A aplicação de inversores de frequência no controle de grandes motores acionando exaustores e ventiladores é bastante promissora.

Ainda que o tratamento de água para fins industriais possa significar uma considerável demanda de energia elétrica, sua qualidade contribui para reduzir a demanda térmica. A frequência e o volume de purgas para arrasto de lodo nas caldeiras e a formação de depósitos e incrustações nos trocadores de calor exemplificam tais situações.

#### 7.2.D - Instrumentação e Controle de Processos

Da mesma forma que em outros setores industriais, tem sido intensa a difusão de sistemas de controle automático em usinas de açúcar e álcool. Entre as aplicações já disponíveis, destacam-se o controle do nível de cana na alimentação de moendas, o controle de pH na calagem a quente e a frio, o controle do nível de caldo nos evaporadores, o controle do nível do tubulão e tiragem em caldeiras, o controle da temperatura de aquecimento do caldo e o controle e registro da água de embebição. Ainda a nível de estudos se desenvolve o controle de combustão de caldeiras a bagaço, o controle da fermentação e a transformação de sistemas de controle analógico para controle digital, empregando microprocessadores, em moendas e evaporadores.

Os efeitos energéticos destes sistemas são sempre interessantes e resultam de uma operação mais regular e estável, objetivo essencial do controle. Das aplicações listadas acima, em sua maior parte, é a economia de vapor de baixa pressão, em especial na evaporação, a consequência energética mais relevante.

### 7.2.E - Controle de Poluição

A tecnologia em implantação ou desenvolvimento para tratamento das águas de processo, dos efluentes e dos gases de chaminé tem permitido reduzir convenientemente os efeitos negativos da produção de álcool e açúcar sobre o meio-ambiente.

Em sua maioria, os equipamentos para controle da poluição como decantadores de água de lavagem de cana, retores e decantadores de fuligem, hidrociclones e aeradores de lagoas de estabilização, acarretam uma maior demanda de energia elétrica. Apenas quando se dispõe de excedentes de vapor de baixa pressão tem sido sugerida a concentração da vinhaça, que por sua vez reduz o consumo energético para distribuição e transporte.

### 7.3 - Perspectivas para o Setor Energético nas Usinas de Açúcar e Álcool

Considerando a adoção de novas tecnologias, cujo efeito foi comentado anteriormente, pode-se afirmar que, em termos médios, sobressaem duas tendências, gerais e complementares, para o setor industrial de produção de açúcar e álcool. Tem havido uma constante redução na demanda de vapor de baixa pressão, seja pela introdução de novas idéias, seja pelo aperfeiçoamento dos sistemas atuais, como o adequado isolamento térmico, o aproveitamento das correntes de baixa temperatura, uma melhor manutenção das linhas de vapor, enfim, uma conscientização do uso racional da energia.

A segunda tendência que se observa é o incremento na demanda de energia elétrica, geralmente através de bombas e ventiladores. Nem sempre os motores instalados correspondem a correta exigência de potência destas máquinas de fluxo, cujo comportamento sob cargas parciais pode acarretar perdas e levadas, especialmente por redução do fator de potência.

A maior consequência destas tendências é o crescimento ou eventualmente o surgimento do excesso de vapor de escape. Sob certas situações, a maior demanda de energia elé

trica pode reduzir a disponibilidade e mesmo anular o excedente de bagaço da usina. Daí ser fundamental que se avaliem as possibilidades de equilíbrio no balanço térmico neste novo contexto, em que deverão ser otimizadas simultaneamente a produtividade de vapor (Kg vapor/Kg bagaço) e o consumo de vapor nos acionadores primários (kWh/Kg vapor).

As alternativas para elevação da eficiência das caldeiras já foram apresentadas no item 7.3.C - Utilidades. A redução do consumo de vapor nas turbinas pode ser atingida empregando-se maiores temperaturas e pressões para o vapor vivo, instalando-se turbinas de múltiplos estágios e adaptando-se multiválvulas e válvulas de sobrecarga nas atuais turbinas. Estas providências já têm sido implementadas ou estão planejadas pela maioria das usinas, como um reflexo das alterações em seu balanço energético. O modelo de simulação computacional apresentado neste trabalho, Capítulo 3, é uma ferramenta oportuna para se avaliar as perspectivas energéticas e alternativas de interesse no reestabelecimento do equilíbrio no balanço de vapor.

#### 7.4 - O Potencial da Secagem do Bagaço

Visando elevar a eficiência térmica na geração de vapor bem como ampliar a distância economicamente viável para seu fornecimento, têm sido propostos diversos sistemas de secagem do bagaço. Ao sair da última moenda, a umidade do bagaço está ao redor de 50%, podendo ser secado empregando-se os gases das chaminés ou após enfardamento em secagem ao ar, onde a fermentação exotérmica do açúcar residual reduz a umidade para cerca de 25%.

A secagem com os gases configura-se como uma forma de recuperação de energia térmica, permitindo aumentar a produtividade de vapor, sem contudo aportar energia adicional ao sistema de geração de vapor. Mas existem importantes limites no campo de aplicação dos secadores, em função das disponibilidades de calor para evaporação da umidade.

A figura a seguir apresenta valores para o balanço térmico nos secadores. O calor  $Q_s$  refere-se a energia teórica para aquecimento do bagaço e evaporação parcial de sua umi

dade. Um valor prático para este calor requerido foi calculado estimando-se uma eficiência térmica de 65%. A disponibilidade de energia para secagem,  $Q_c$ , depende por sua vez da variação de temperatura dos gases no secador, do excesso de ar na combustão e da umidade do bagaço queimado. Para poder comparar  $Q_s$  e  $Q_c$  foi feita a correção relativa a redução de peso do bagaço após a secagem. Maiores detalhes sobre a determinação destes calores são apresentados no Apêndice 8.

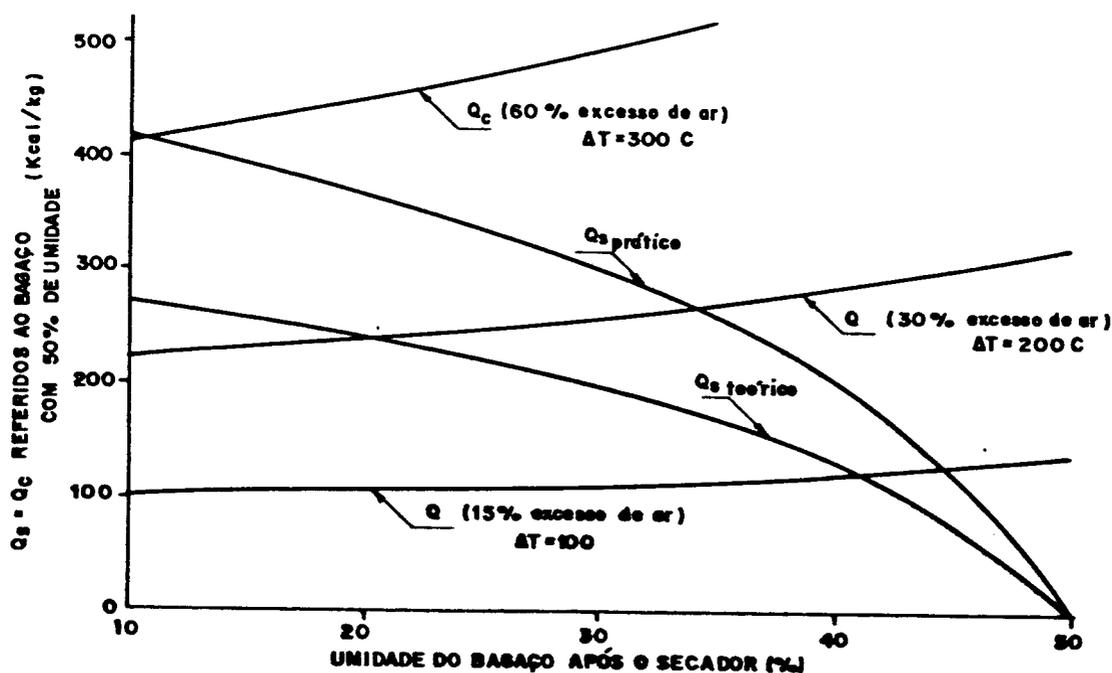


Figura 19 - Calor requerido na secagem do bagaço,  $Q_s$ , e calor cedido no secador,  $Q_c$

Como pode ser observado nesta figura, os gases possuem, dentro da variação considerada de temperatura, capacidade para secar o bagaço até um valor limite. Considerando uma queima de bagaço em condições típicas, com 30% de excesso de ar e uma variação de temperatura no secador de  $200^{\circ}\text{C}$ , a umidade de equilíbrio estaria em torno de 35%, caso o bagaço queimado fosse usado também para fornecer os gases de secagem.

Pode-se adotar os secadores dentro de duas situações: secar para consumo nas próprias caldeiras ou secar apenas o bagaço excedente, para facilitar sua compactação e posterior comercialização. Neste último caso a figura é novamente

útil, permitindo avaliar por exemplo, qual a umidade que pode ser atingida em um secador para comercialização, queimando bagaço com 50% de umidade e 15% de excesso de ar e 100°C de variação da temperatura no secador. Conforme a figura, tem-se que neste caso o calor disponível por Kg de bagaço pode secar 1 Kg de bagaço até 45% de umidade, ou ainda 0,5 Kg até aproximadamente 32%.

Na hipótese em que o secador opera em regime fechado com a alimentação da caldeira, devendo secar todo o bagaço a queimar, com os gases desta mesma queima, as condições são mais rígidas. A figura abaixo mostra, em função do excesso de ar na combustão e da variação de temperatura dos gases dentro do secador, a umidade de equilíbrio, em que se igualam a demanda e o aporte de calor.

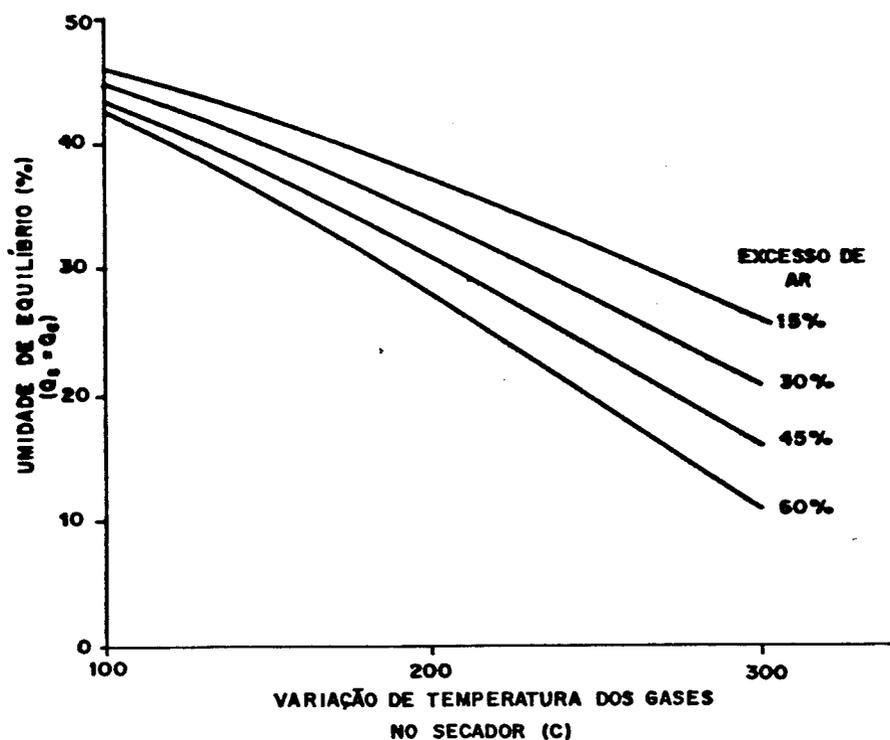


Figura 20 - Condições de equilíbrio para secagem de bagaço em ciclo fechado

Com relação a operação da caldeira deve ser observado que o secador pode proporcionar melhores eficiências na combustão, com redução na emissão de particulados e nas per

das de chaminé. Não obstante, a nível de operação surgem também limites para a secagem. A temperatura no interior da fornalha não pode exceder geralmente a  $1200^{\circ}\text{C}$ , limite que seria ultrapassado sob determinados níveis de umidade.

Empregando-se a metodologia já bastante conhecida para estimativa da temperatura adiabática de chama [25] procedeu-se a sua determinação para o bagaço, sob distintas umidades e excesso de ar na combustão. Os resultados constam da figura 21 e ainda que válidos sob condições adiabáticas e sem considerar efeitos da dissociação dos gases, fica evidente que podem ser atingidos níveis perigosos de temperatura, quando se reduz bastante a umidade. Estes riscos ocorrem exatamente nas caldeiras em que as condições de queima são piores, com altas temperaturas na saída para a chaminé e elevados excessos de ar.

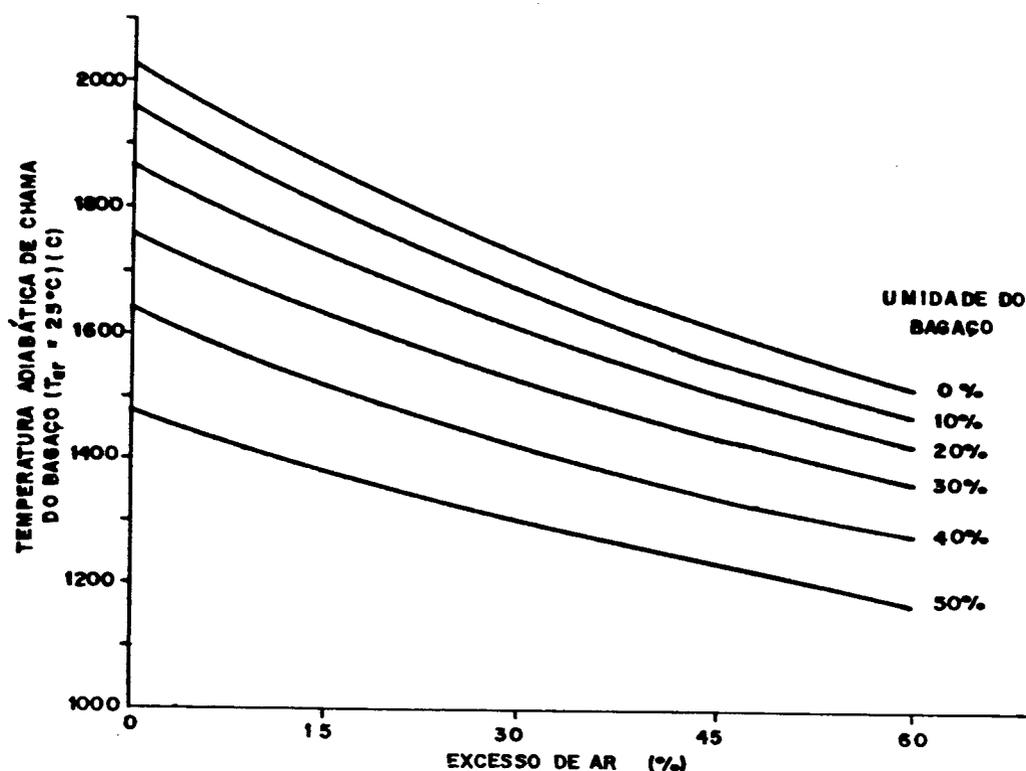


Figura 21 - Temperatura adiabática de chama na combustão de bagaço

Em termos energéticos o secador deve ser analisado em sua capacidade de recuperar as perdas de chaminé, de certa forma semelhante ao pré-aquecedor de ar. Contudo, em secadores é possível reduzir a temperatura dos gases para cerca de

100°C, enquanto mesmo bons pré-aquecedores não se excedem a 180°C. Por outro lado o secador impõe um consumo adicional de energia para movimentação de bagaço. Segundo estudos voltados para a secagem até 20% de umidade [26], um coeficiente médio de consumo de potência na secagem seria 6 Kwh por tonelada de bagaço, que pode ser considerado um valor alto.

## 8. CONCLUSÕES

A análise apresentada no Capítulo 2, válida para a produção de álcool nas condições do Estado de São Paulo, indica relações produção/consumo de energia de 6,4 a 9,5, respectivamente nos dois cenários (valores médios e melhores valores praticados). Estes valores passam a 8.8 e 12.3 (dois cenários) se for considerada apenas a energia fóssil. Tais resultados são bastante favoráveis e significativamente superiores aos correspondentes a outras culturas possíveis para a produção de álcool, como a mandioca, de 1.72 a 1,14, dependendo do nível de utilização dos resíduos agrícolas na fase industrial, e o sorgo sacarino, ao redor de 2,66 [30]. No entanto é conveniente lembrar que as produtividades agrícolas e eficiências industriais continuam a aumentar nesta região, e podem ter-se valores ainda melhores nos próximos anos. O uso de um único índice talvez seja inadequado, e a importância crescente da co-geração certamente levará a uma apresentação de resultados de forma diferente no futuro. Como o setor agrícola não é mais discutido no restante do trabalho, é também conveniente remarcar o possível efeito de novas técnicas, como o corte da cana sem despontar e o desenvolvimento de novas variedades de cana, inclusive com teor de fibra mais elevado, no aporte de energia à indústria.

A modelagem do setor industrial pôde ser feita de modo muito realístico, a partir da grande quantidade de informações e parâmetros fornecidos por técnicos do setor. No entanto, acredita-se ser necessário um esforço de avaliação em bases mais amplas, estendendo os limites de validade, as situações de aplicação e incorporando novos parâmetros. A diversidade e a complexidade do setor industrial impuseram simplificações na modelagem; contudo, mesmo em sua forma atual, o modelo permite simular satisfatoriamente casos típicos, e obter índices de utilização de equipamentos, avaliar potenciais de conservação de energia e de geração de excedentes de bagaço e energia elétrica. O modelo final é o mais abrangente e, ao mesmo tempo, preciso de que temos notícia para o setor industrial.

As aplicações do modelo de simulação serviram para explorar suas possibilidades como ferramenta de análise do

perfil energético da usina. Devem ser destacados entre os resultados destes estudos as avaliações dos efeitos energéticos globais de alterações a nível de equipamento, variáveis de processo e características da matéria prima. Por exemplo, pode ser demonstrado que a adoção de aquecedores de caldo com vapor vegetal permite reduzir em cerca de 7,5% o consumo de vapor de escape, para a usina estudada, bem como que tal redução não se traduz em imediato incremento no excedente de bagaço, devido às características particulares do balanço de vapor considerado. Outros resultados interessantes referem-se à curva de variação do excedente de bagaço em função do perfil de produção (relação açúcar/álcool) e a determinação da curva de disponibilidade de bagaço, em função da energia elétrica comercializada. Nos casos estudados o consumo de vapor vivo é dominante e determina a evaporação necessária nas caldeiras, tendo ficado evidente a importância da operação das turbinas a vapor dentro das condições recomendadas de carga e rotação, o que permitiria quase dobrar o excesso de bagaço em certos casos.

A visão unificada dos aspectos energéticos parece ser a maior vantagem do modelo global de simulação. Embora não se disponha ainda, na maioria dos casos, de instrumentação instalada e medições sistemáticas para cotejar com os resultados da simulação, sua discussão junto ao pessoal técnico do setor permite acreditar em sua pertinência à realidade industrial. As aplicações efetuadas no Capítulo 4 demonstram efetivamente sua utilidade e abrem um grande campo para outras análises.

Neste sentido, pode ser mostrado como o modelo de simulação fornece dados para a otimização energética da alocação das metas físicas da produção (quotas de álcool e açúcar) ao longo dos períodos da safra, segundo um método empregando a Programação Dinâmica. O percurso ótimo das metas de produção pôde ser calculado considerando condições de contorno bem próximas da realidade, como eficiência decrescente e teor de fibra crescente ao longo da safra. É importante acentuar que a adoção de um plano de safra deste tipo, dentro evidentemente das restrições de mercado e estocagem, não implica em despesas operacionais adicionais e resulta em maiores excedentes energéticos.

A co-geração de energia eletromecânica e térmica também se configura como uma tecnologia importante na busca de

maior produtividade energética. Foi desenvolvida uma abordagem em que a partir dos índices de demanda e produção de energia térmica e potência pôde ser verificado o equilíbrio do sistema de co-geração e sua capacidade de geração adicional, bastante incrementada pela adoção de níveis de pressão mais elevados para o vapor vivo. A paulatina adoção de níveis maiores de pressão nas caldeiras coloca o problema de distribuir o consumo das turbinas. Discutiu-se algumas situações de transição quanto à pressão, com o uso de modelos computacionais e evidenciando a necessidade de um estudo detido e particularizado para se obter a solução recomendável, caso a caso.

A evolução tecnológica na indústria canavieira tem provocado seguidas alterações a nível de métodos, processos e equipamentos, cujas consequências energéticas podem ser investigadas através de modelos de simulação. Conforme se apresenta no Capítulo 7, distinguem-se dois efeitos energéticos básicos associados à evolução tecnológica: a redução na demanda de vapor para processo e um aumento na demanda de energia elétrica. A maior consequência destas alterações é o crescimento na disponibilidade de vapor de escape, impondo um acompanhamento do balanço térmico, reduzindo a demanda de vapor vivo nos acionadores primários e elevando a produtividade energética.

A utilização do modelo de simulação vai muito além dos exemplos apresentados neste trabalho; por outro lado, o aperfeiçoamento deste modelo com maior quantidade de dados dos processos deverá levá-lo a uma precisão ainda maior nos próximos anos. Especialmente os aspectos associados à etapa de fabricação devem ser melhor avaliados, inclusive incorporando dados da curva de demanda de vapor no tempo e índices confiáveis de eficiência térmica. Acredita-se que esta ferramenta venha a ser adotada como um poderoso auxílio ao planejamento do setor térmico das usinas, principalmente com o advento de novos produtos da cana de açúcar, tornando indispensável a operação eficiente do setor de energia.

## APÊNDICES

1. ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL: DETALHAMENTO DO SE  
TOR AGRÍCOLA
  - 1.1. Produtividade Agrícola e Eficiência Industrial
  - 1.2. Operações Agrícolas e Colheita
  - 1.3. Transporte
  - 1.4. Fertilizantes
  - 1.5. Calcáreo, Herbicida e Inseticidas
  - 1.6. Mudas
  - 1.7. Máquinas e Equipamentos Agrícolas
  - 1.8. Mão-de-obra
  
2. ANÁLISE ENERGÉTICA DE ÁLCOOL: DETALHAMENTO DO SETOR INDUSTRIAL
  - 2.1. Geração de Vapor
  - 2.2. Conversão Termomecânica: Turbinas das Moendas
  - 2.3. Conversão Termoelétrica: Turbogeneradores
  - 2.4. Utilização de Energia Elétrica
  - 2.5. Energia Utilizada no Preparo e Moagem da Cana
  - 2.6. Consumo de Energia nos Processos: Açúcar e Álcool
  - 2.7. Insumos do Setor Industrial
  - 2.8. Edificações, Equipamentos e Instalações do Setor Indus  
trial
  
3. BALANÇO ENERGÉTICO DO CICLO DE NUTRIENTES PARA A CANA DE AÇÚ  
CAR
  
4. DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO DO SETOR  
INDUSTRIAL, APLICADO A 2 USINAS
  
5. RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DAS ALTERNATIVAS DE ELE  
VAÇÃO DA PRESSÃO EM SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO
  
6. ELEMENTOS BÁSICOS DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA
  - 6.1. O Princípio de Bellman
  - 6.2. A Formulação do Problema
  - 6.3. Derivação da Equação Recursiva

## 7. ENERGIA MÍNIMA PARA A FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL

### 7.1. Introdução

### 7.2. Análise

#### 7.2.A - Fermentação

#### 7.2.B - Destilação

### 7.3. Comentários

## 8. ANÁLISE TÉRMICA DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA

### 8.1. Calor Teórico para a Secagem do Bagaço

### 8.2. Calor Real para Secagem do Bagaço

### 8.3. Gases de Combustão do Bagaço

#### 8.3.A - Composição do Bagaço Seco

#### 8.3.B - Composição dos Gases de Combustão

### 8.4. Calor Cedido pelos Gases de Combustão do Bagaço

### 8.5. Redução de Peso na Secagem

APÊNDICE 1 - ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL: DETALHA  
MENTO DO SETOR AGRÍCOLA

1.1 - Produtividade Agrícola e Eficiência Industrial

As médias entre diversas regiões e variedades (CTC) são:

Tabela A.1 - Produtividade da Cana-de-Açúcar

Corte	Produtividade t/ha
1º - Cana-planta	100
2º - 1ª soca	80
3º - 2ª soca	75
4º - 3ª soca	70
5º - 4ª soca	65

Normalmente, são realizados quatro cortes (média de 81,25 t/ha); com cinco cortes, a média cai para 78 t/ha. As soqueiras são cortadas após um ano, e a cana-planta dois anos após o corte de soqueira anterior. A média, portanto, para 04 ou 05 cortes é de 65 t/ha . ano.

Quanto à conversão para álcool, a utilização de uma definição de eficiência industrial significativa é possível a partir de 1983, com as medidas de sacarose na cana. As conver~~sões~~s intermediárias neste estudo usam o valor padrão de 70 l álcool/TC; para a estimativa de energia produzida, nos dois cenários, recorre-se a algumas avaliações. Durante a safra 83/84, a média das destilarias autônomas tem operado com cerca de 72 l/TC, e os máximos ficam em torno de 80 l/TC. Para as anexas, que de~~vem~~ apresentar uma média superior, é difícil ter medidas confiáveis pela própria produção conjunta de açúcar e álcool. No entan~~to~~to, com base em várias observações, adotou-se para os dois Cenários, para o total da produção do Estado:

Cenário 1: 73 l/TC;

Cenário 2: 83 l/TC.

## 1.2 - Operações Agrícolas e Colheita

### Operações Agrícolas

Nas operações agrícolas, excluído o corte e transporte de cana, o equipamento utilizado e sua capacidade es-  
tão listados abaixo.

Tabela A-2 - Operações Agrícolas: Equipamentos

	Máquina	Pot. (cv)	Implemento	Capacidade		Consumo (l diesel/h)
				Velocidade (km/h)	Largura (m)	
01	Ford 6600	79	Carreta distribuidora de calcáreo	3,24	3,00	6,00
02	Case 2470	202	Grade 16 D x 32"	6,00	2,95	27,60
03	CAT D-6	140	Subsolador 04 hastes	4,88	2,60	30,25
04	Case 2470	202	Grade rome 16 D x 32"	6,19	2,95	28,40
05	CBT 1105	98	Grade niveladora 20 D x x 24"	7,21	2,40	12,12
06	MF 296	112	Sulcador adubador duplo	4,11	2,80	11,50
07	MF 275	69	Carreta para plantio	1,41	5,60	3,30
08	MF 275	69	Cobridor traseiro (02 linhas)	9,00	2,80	5,40
09	Ford 4600	64	Bomba de herbicida	5,50	6,00	4,00
10	Valmet 86 ID	79	Cultivador (03 enxadinhas/rua)	5,14	2,80	5,20
11	Ford 6600 (trâmpulo)	79	Adubadeira (3 x 3 enxadinhas)	6,67	5,20	6,74
12	Ford 4600	64	Enleiradeira (04 discos)	7,84	1,75	3,33
13	CBT 2500	102	Tríplice operação	5,33	3,50	9,70
14	Valmet 118.4	116	Tríplice operação	5,85	3,50	9,20
15	MF 296	112	Tríplice operação	6,67	3,50	8,30
16	Ford 4600	64	Bomba de herbicida	5,50	6,00	
17	Ford 6600	79	Cultivador tipo pé de pato	5,50	2,80	4,00
18	Toft 6000	218	Colheideira combinada	54,4 t/h		41,10
19	MF 65R	60	Carregadora Santal	20,0 t/h		5,40
20	MB 2213	-	Carroceria	2,00 km/l		-
21	Ford F-13000	-	Basculante	2,56 km/l		-
22	Ford F-13000	-	Carroceria 03 eixos	2,20 km/l		

Todos os valores de capacidade e consumo foram medidos pela Divisão Agronômica do CTC com exceção do primeiro, que foi estimado por esta Divisão.

A sequência normal das operações agrícolas está na Tabela A-3; a eficiência de utilização relaciona o tempo útil com o tempo total, considerando paradas, manobras e carregamento. A capacidade operacional é calculada por:

$$C = VL\eta/10 \quad (A.1)$$

onde C é a capacidade (ha/h); V, a velocidade (km/h); L, a largura de trabalho (m) e  $\eta$  a eficiência de utilização.

Tabela A-3 - Consumo nas Operações Agrícolas

Nº	Operação Agrícola	Equip.	Eficiência (%)	Capacidade Operacional (ha/h)	Consumo Específico (l/ha)	Fração da área trabalhada
Cana-planta						
01	Aplicação de calcário	01	70	0,68	8,32	1,0
02	Gradagem Pesada I	02	70	1,24	22,26	1,0
03	Subsolagem	03	70	0,88	34,38	0,7
04	Gradagem Pesada II	04	70	1,28	22,19	1,0
05	Gradagem de acabamento	05	70	1,21	10,02	1,0
06	Sulcação e adubação	06	65	0,75	15,33	1,0
07	Distribuição de mudas	07	65	0,51	6,47	1,0
08	Fechamento do sulco e aplicação de inseticida	08	70	1,76	3,07	1,0
09	Cultivo químico	09	60	1,98	2,02	1,0
10	Cultivo mecânico	10	70	1,01	5,16	0,2
11	Adubação de cobertura	11	65	2,25	3,00	1,0
Soqueira						
01	Enleiramento da palha	12	70	0,96	3,47	1,0
02	Subsolagem, adubação e cultivo	Média:13-14-15	65	1,35	6,72	1,0
03	Cultivo químico	16	60	1,98	2,02	0,8
04	Cultivo mecânico	17	70	1,08	6,19	0,2

Observações:

- A análise da compactação do solo permite reduzir a área subsolada em 30%;
- o cultivo mecânico é feito apenas em 20% da área, após o cultivo químico.

O consumo total de energia nas operações agrícolas pode ser calculado com base na Tabela A-3, para o que denominamos Cenário 1:

Cana-Planta:  $C_p = 118,28$  l/ha

Cana soca :  $C_s = 23,04$  l/ha

O Cenário 2 utiliza as técnicas de cultivo mínimo [27] onde as operações que antecedem a sulcação e adubação são substituídas por uma única operação realizada com o SSD-2 (desenvolvido no CTC), ou com o sulcador convencional. A destruição da soqueira é feita com herbicida.

Características do SSD-2

Tabela A-4 - Características do SSD-2

Conjunto	Eficiência (%)	Capacidade operacional (ha/h)	Consumo (l/h)	Consumo Específico (l/ha)
Valmet 118.4 + SSD-2	74,6	1,0	15,0	15,0
MF 296 + SSD-2	74,6	0,9	13,5	15,0

Neste caso, os resultados são:

$C_p = 45,92$  l/ha

$C_s = 13,04$  l/ha

Colheita

Para os equipamentos 18 e 19 (Tabela A-5), com produtividade média de 81,25 t/ha e 35% de sobreutilização para a carregadeira Santal, tem-se:

Tabela A-5 - Equipamentos para a Colheita

Equipamento	Capacidade operacional (ha/h)	Consumo específico (l/ha)
Colhedeira Toft	0,6695	61,40
Carregadora Santal	0,3323	16,25

No ciclo de 05 anos, realiza-se uma reforma, três tratos culturais e soqueira e quatro cortes, sendo 15% com colheita mecânica e 85% corte normal e carregamento mecânico. O consumo de diesel nas operações agrícolas e de colheita, anual, é dado por:

$$C_{AC} (\text{l/TC}) = \frac{1}{P_A} \{0,2C_P + 0,6C_S + 0,8(0,15C_{CC} + 0,85C_{CM})\} \quad (\text{A.2})$$

onde  $C_{CC}$  e  $C_{CM}$  (l/ha) são o consumo na colheita com máquina e manual, respectivamente, e  $P_A$  é a produtividade agrícola anual, TC/ha . anc.

Os resultados obtidos são:

Cenário 1:  $C_{AC} = 0,7747$  l/TC;

Cenário 2:  $C_{AC} = 0,5522$  l/TC.

### 1.3 - Transporte

Todos os valores de capacidade e consumo utilizados foram medidos pela CTAG - CTC.

- Transporte de cana, da lavoura até a Usina

As medidas de consumo específico [28] indicam variação de 15 ml/t . km a 70 ml/t . km, nas condições de São Paulo em função do tipo de caminhões e distância. A média de transporte é de 16 km. O caminhão mais utilizado, MB 2213 (consumo: 35 ml/t . km) foi tomado como base para o Cenário 1.

O uso de caminhões mais pesados e reboques leva a índices melhores; caso típico é o MB 2219 (consumo: 22 ml/t.km) que é tomado como base para o Cenário 2.

Resultados:

Cenário 1:  $C_{TC} = 1,120$  l/t

Cenário 2:  $C_{TC} = 0,704$  l/t

- Transporte de mudas

Para um consumo de 12 t mudas/ha, para distância média de 16 km, o MB 2213 leva a  $C_{TM} = 16$  l/ha.

- Transporte de torta de filtro

A torta é distribuída em 30% da área de reforma do canal no Cenário 2. Um caminhão-basculante (tipo Ford F-13000) com carga média de 8t e consumo de 2,56 km/l é utilizado; a distância média é de 8 km e a taxa de aplicação é de 12t (úmidas)/ha (5t (secas)/ha).

Como resultado:

$C_{TT} = 9,38$  l/ha

- Transporte do vinhoto

Para o Cenário 2, considera-se a aplicação em 30% das soqueiras. O transporte típico é um caminhão MB 2213, com tanque de 12.000 l (consumo: 2,2 km/l). Taxas de aplicação variam com o tipo de vinhoto: usa-se 100 m<sup>3</sup>/ha, a 8 km de distância média.

Resultado:

$C_{TV} = 60,60$  l/ha

- Transporte de adubo

No Cenário 2, considera-se a redução do adubo aplicado em 30% da área plantada através do uso de torta de filtro e vinhoto. Valores usuais são:

Tabela A-6 - Aplicação de Adubo

	Cana-planta	Cana seca	Total
Cenário 1	500 kg/ha (25-125-125) + 120 kg/ha (30-0-30)	500 kg/ha (70-35-140)	2.120 kg/ha (em 5 anos)
Cenário 2	400 kg/ha (0-50-80)	200 kg uréia	1.000 kg/ha (em 5 anos)

Trabalha-se tipicamente com o Ford-13000 (carga média 12 t). Para distância média de 16 km, no ciclo de 05 anos, entre reformas consecutivas do canavial, tem-se:

Cenário 1: 2.120 kg adubo,  $C_{TA} = 12,44$  l/ha;

Cenário 2: 1.784 kg adubo,  $C_{TA} = 10,47$  l/ha.

A quantidade de adubo no Cenário 2 é calculada considerando que apenas 30% da área pode ser tratada com vinhoto e torta de filtro hoje.

Mostra-se que os diversos consumos podem ser as sociados à produtividade agrícola levando ao consumo total no transporte de acordo com:

$$\text{Cenário 1: } C_T = C_{TC} + \frac{1}{PA} \{0,2(C_{TM} + C_{TA})\} \quad (\text{A.3})$$

$$\text{Cenário 2: } C_T = C_{TC} + \frac{1}{PA} \{0,2(C_{TM} + C_{TA}) + 0,3(0,2C_{TT} + 0,6C_{TV})\} \quad (\text{A.4})$$

Resultado:

$$\text{Cenário 1: } C_T = 1,207 \text{ l/TC}$$

$$\text{Cenário 2: } C_T = 0,962 \text{ l/TC}$$

#### 1.4 - Fertilizantes

A variação de taxa de aplicação é grande, depen dendo do solo. Valores médios estão na Tabela A-7; o Cenário 2, novamente, supõe a aplicação de torta de filtro e vinhoto, res pectivamente, áreas de reforma e soqueiras. Considerando que ape

nas 30% destas áreas podem ser tratados assim, os valores finais de consumo são apresentados na Tabela A-8 (70% das áreas com adu bação convencional). Os custos energéticos específicos são conhe cidos [4].

Tabela A-7 - Taxas de Aplicação de Fertilizantes

Fase da lavoura	Taxa de aplicação (kg/ha)			
	Cana-planta		Cana soca	
Macronutriente	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
Nitrogênio - N	25 + 30	-	70	90
Fósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	125	50	35	-
Potássio - K <sub>2</sub> O	125 + 30	80	140	-

Tabela A-8 - Energia nos Fertilizantes

	Nutriente	Taxa média anual de aplicação	Energia	Energia/ha	Energia/TC
		kg/ha . ano	kcal/kg	Mcal/ha . ano	Mcal/TC
Cenário 1	N	53,5	14.700	786,45	12,01
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	46,0	2.300	105,80	1,63
	K <sub>2</sub> O	115,0	1.600	185,00	2,83
Cenário 2	N	54,0	14.700	793,80	12,13
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10,0	2.300	23,00	1,25
	K <sub>2</sub> O	16,0	1.600	25,60	2,10

Resultados finais:

Cenário 1:  $E_f = 16.560$  kcal/TC

Cenário 2:  $E_f = 15.480$  kcal/TC

### 1.5 - Calcáreo, Herbicida e Inseticidas

- Calcáreo

Taxa de aplicação de 1.670 kg/ha em ciclos de 05

anos; custo energético do calcáreo posto na lavoura 315,5 kcal/kg [ 4 ].

Resultado:

$$E_c = 1.620 \text{ kcal/TC}$$

#### - Herbicidas

Normalmente quatro aplicações a 4,0 kg/ha, em 05 anos; os mais usados são ametina, tebutiuron, diuron e 2,4 - D. A energia associada, tipicamente, já incluída a fabricação do ingrediente ativo, formulação, embalagem e transporte é [ 4 ]:

Tabela A-9 - Energia nos Herbicidas

Herbicida	Apresentação	Concentração	Custo energético (kcal/kg)
2,4 - D	Líquido	670 g/l	44.970
Diuron	Líquido	500 g/l	53.600
Diuron	Pó molhável	80%	56.050

Estimando 80% do consumo do pó molhável, tem-se em média:

$$E_h = 2.690 \text{ kcal/TC, Cenário 1}$$

Parece ser possível obter bons resultados com taxas bem menores. No entanto, no Cenário 2 (cultivo mínimo), é necessário adicionar o custo energético da aplicação de 5,0 kg/ha de herbicida tipo Round-up. O ingrediente ativo glifosate utiliza 108.100 kcal/kg, é vendido a 400 g/l, levando a 259,44 Mcal/ha. Portanto, para o Cenário 2:

$$E_h = 3.490 \text{ kcal/TC}$$

#### - Inseticidas

As formigas são controladas com produtos químicos, a 0,5 kg/ha . ano (7,79/TC), e com custo energético de 24,2 Mcal/kg, [ 4 ]. O resultado é:

$$E_i = 190 \text{ kcal/TC}$$

### 1.6 - Mudas

O consumo médio é de 12t de mudas por hectare, a cada ciclo de 05 anos (ou seja, 0,0369 TC/TC). Admitindo que os procedimentos da produção de mudas são equivalentes aos da lavoura, incrementou-se em 3,7% o consumo energético global para representar o equivalente a mudas.

Cenário 1: 1.940 kcal/TC

Cenário 2: 1.730 kcal/TC

### 1.7 - Máquinas e Equipamentos Agrícolas

Utilizou-se dados colhidos pela Divisão Agrônômica do CTC; os equipamentos foram relacionados em 04 usinas, obtendo-se densidades médias de utilização (peso do equipamento(área)).

*Tabela A-10 - Utilização de Equipamentos Agrícolas*

Usina (área)	Densidade de utilização (kg/ha)				
	Usina A (5.990 ha)	Usina B (11.500 ha)	Usina C (14.500 ha)	Usina D (8.705 ha)	Média
Tratores	36,7	32,8	40,9	35,6	36,50
Implementos	13,3	6,9	8,2	6,6	8,75
Caminhões	67,8	36,5	81,1	47,3	58,18
Total	117,8	72,8	130,1	89,5	103,43

Uma metodologia sugerida por Pimentel [4] é utilizada para calcular o custo energético associado. Basicamente, as hipóteses são:

- 1) Considera-se a energia incorporada do material (aço, pneus), a de fabricação e a de reparos e manutenção. A energia incorporada, no caso, é essencialmente no aço (15.000 kcal/kg) e pneus (20.500 kcal/kg). A energia de fabricação para diversos equipamentos está tabelada por peso (excluídos pneus).
- 2) A energia dos reparos corresponde a 1/3 do reparo total acumu

lado (há valores estimados pela ASAE [29] por classe de equipamento).

- 3) A vida útil do equipamento corresponde a 82% da vida total e o custo energético deve ser corrigido de acordo.

Destas hipóteses resulta a Tabela A-11, onde, como por exemplo, utilizou-se um trator de 130 HP e os implementos são sem pneus (tipo arado):

Tabela A-11 - Energia na Produção e Manutenção dos Equipamentos

Equipamento	Energia do material (kcal/kg)	Peso dos pneus (Fração do peso total)	Energia de fabricação (kcal/kg)	Reparo total acumulado (%)	Energia dos reparos (Fração energ. mat.+fabric.)
Tratores	11.814	0,719	3.294	89,1	0,297
Implementos	15.000	-	2.061	92,6	0,309
Caminhões	15.000 aço 20.500 pneus	0,06	3.494	60,7	0,202

Com os dados sobre a densidade de utilização, a vida útil estimada e a produtividade da cana-de-açúcar obtêm-se:

Tabela A-12 - Custo Energético dos Equipamentos

Equipamento	Energia (mat.) (kcal/ha)	Energia fabricação (kcal/ha)	Energia para reparos (kcal/ha)	Energia mat. + fabricação corrig. vida útil (kcal/ha)	Energia total (kcal/ha)	Vida útil (anos)	Custo energético (kcal/TC)
Tratores	431.211	104.703	159.166	439.449	598.615	5	1.841
Implementos	131.250	18.034	46.129	122.413	168.542	8	324
Caminhões	891.899	191.084	203.280	888.046	1.106.808	5	3.405

Como resultado, a energia utilizada nos equipamentos é:

$$E_e = 5,570 \text{ kcal/TC}$$

## 1.8 - Mão-de-Obra

Embora insistindo em que, para as finalidades deste estudo, a energia correspondente à mão-de-obra não é um custo energético, é interessante estimar o seu valor; dados de Silva [30] relacionam em média 462 homens-hora nas operações agrícolas e de colheita de cana-planta e 220 homens-hora para as soqueiras. Para 544 homens-hora, temos:

$$E_m = 1,880 \text{ kcal/TC}$$

## APÊNDICE 2 - ANÁLISE ENERGÉTICA DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL: DETALHAMENTO DO SETOR INDUSTRIAL

A situação atual e a avaliação do setor foram analisadas em trabalho recente [31] utilizando valores de consumo e eficiência médias para as usinas da Copersucar (cerca de 70, produzindo 40% do açúcar e álcool no país). Estes valores são importantes para determinar o ponto do equilíbrio do sistema de co-geração simples empregado, e verificar as sobras e deficiências de energia. Do item 2.1 ao 2.6 apresenta-se um resumo deste trabalho.

### 2.1 - Geração de Vapor

Os resultados da análise de 349 caldeiras, em 1984, indicam que a eficiência média (operação correta, sem paradas) é de 73,7%. Para comparação, a mesma análise efetuada em 1981, para 320 caldeiras, indicava uma eficiência de 71,6%. A diferença reflete a modernização do sistema, com o aumento dos recuperadores e melhoria dos sistemas de queima. A "pressão média" de operação é agora de 20 kgf/cm<sup>2</sup> com um número significativo de caldeiras operando acima de 42 kgf/cm<sup>2</sup>. É de se esperar, portanto, uma redução na compra de energia elétrica pelo sistema, como um todo.

### 2.2 - Conversão Termomecânica: Turbinas das Moendas

Um levantamento das especificações e condições operacionais de 174 turbinas (27 usinas) em moendas, em 1984, indica grande variação dos consumos específicos de vapor. Há, no entanto, concentração em dois pontos: 32% das turbinas operam com vapor saturado de 14 - 15 kgf/cm<sup>2</sup> e 33% com vapor superaquecido a 19 - 21 kgf/cm<sup>2</sup>. O fator de carga é relativamente baixo (65% em média).

### 2.3 - Conversão Termoelétrica: Turbogeneradores

Para 156 turbogeneradores em 65 usinas, nota-se que 42% da potência total vem de turbogeneradores acima de 2.500 kVA; são máquinas multiestágio, com até 55% de eficiência na expansão, melhor adaptadas às condições atuais de vapor. As turbinas de menor potência apresentam consumo específico equivalente ao das turbinas de moendas.

### 2.4 - Utilização de Energia Elétrica

As usinas muito grandes (>500t de cana/h), em média, possuem o menor consumo específico (9,72 kWh/TC), embora a média de todas seja próxima desta (11,28 kWh/TC), e o desvio padrão é muito menor neste grupo de usinas (1,60 kWh/TC). Nota-se que o consumo específico varia em faixa muito ampla (7 a 19 kWh/TC), indicando possibilidades interessantes de economia de energia. Uma análise mais detalhada indica que 60% da potência é utilizada em máquinas de fluxo (bombas para o processo e ventiladores para caldeiras); em muitos casos tem sido possível reduzir este valor à metade, através do redimensionamento dos circuitos e nova seleção das máquinas e motores.

Para o balanço é importante notar que 31% da energia consumida é adquirida (safra 83/84). Na safra 81/82, este número era cerca de 40%.

### 2.5 - Energia Utilizada no Preparo e Moagem da Cana

Uma estimativa do consumo pode ser feita a partir da potência instalada e de algumas observações sobre as condições de moagem, em algumas usinas. As usinas maiores possuem em média menor potência instalada específica (22,1 CV/TCH para usinas com moagem superior a 300 TCH). Como em geral elas também possuem um preparo superior, é de se esperar que a potência real utilizada esteja bem próxima da instalada. Embora valores mínimos de 17 CV/TCH (potência instalada) tenham sido verificados, a análise do conjunto mostrou que um valor médio de 20 CV/TCH é

uma boa estimativa da potência realmente utilizada em usinas com bom preparo e moagem. A relação entre potência na moagem e potência no preparo é de 1,5; estes dados são referidos a 56 usinas.

## 2.6 - Consumo de Energia nos Processos: Açúcar e Álcool

É o setor mais difícil de analisar em termos de "valores médios" porque a variação da relação açúcar/álcool e a diversidade de procedimentos na produção de álcool, assim como as diferenças no nível de conservação de energia. Técnicas para a redução do consumo de energia na produção de açúcar têm sido estabelecidas e utilizadas há muitos anos. No Brasil, hoje, a produção simultânea de álcool simplifica muito o problema, não sendo necessário esgotar o mel.

O potencial de produção de excedentes de bagaço (ou energia elétrica) tem sido analisado a partir destes números, levando a resultados muito expressivos. No entanto, para a finalidade deste trabalho, considera-se apenas dois Cenários, o primeiro com valores médios atuais e o segundo com os melhores valores obtidos hoje.

Para as usinas de açúcar e álcool consideradas, os valores obtidos hoje são:

- excesso de bagaço médio de 5%, atingindo 15%, nos melhores casos;
- compra de energia elétrica: 31% em média, sendo o valor médio 11,28 kWh/TC. Várias usinas são auto-suficientes.

Para unidades produzindo álcool apenas, médias significativas não são disponíveis; a análise do processo indica (e é o que se observa) que os excessos de bagaço são maiores hoje. De modo conservador, adota-se 8% para a média e mantém-se 15% como o melhor caso.

Consideramos ainda que a energia elétrica comprada pela usina, de origem hídrica, é computada no valor direto de 860 kcal/kWh, coerente com as finalidades deste estudo. O bagaço tem 50% de umidade e a cana tem em média 13,6% de fibra. Com isto, tem-se:

## Cenário 1:

Bagaço excedente	: 8%	41.900 kcal/TC
Energia elétrica adquirida:	31%	3.000 kcal/TC

## Cenário 2:

Bagaço excedente	: 15%	78.600 kcal/TC
Energia elétrica adquirida:	0	0

2.7 - Insumos de Setor Industrial

Os principais produtos químicos e lubrificantes utilizados nos processos de produção industrial são listados abaixo, com os valores médios de consumo e a energia associada.

Tabela A-13 - Energia nos Insumos do Setor Industrial

	Consumo		Energia (kcal/TC)
Ácido sulfúrico	$3,4 \times 10^{-3}$	1/1 álcool	280
Sulfato de amônia	0,83	g/1 álcool	210
Benzol	$10^{-3}$	1/1 anidro	450
Soda em escamas	7	g/TC	22
Lubrificantes	40	g/TC	480
CaO	400	g/TC	130
TOTAL			1.570

Não há interesse em separar dois Cenários pela pequena magnitude dos consumos.

2.8 - Edificações, Equipamentos e Instalações do Setor Industrial

A avaliação do uso de energia na construção e montagem de uma usina de álcool pode ser feita de modo mais superficial, para os fins deste estudo, porque não representa uma parcela significativa dos fluxos de energia envolvidos na produção. Esta energia é usada na edificação de prédios, áreas de serviço e na produção e montagem dos equipamentos industriais.

Para a avaliação, considera-se uma destilaria pa

ra 120.000 l/dia de álcool, trabalhando 180 dias por ano e processando cerca de 308.000 toneladas de cana por ano. A Tabela A-14 fornece as exigências energéticas nas obras civis, segundo coeficientes estimados por Hannon [32].

Tabela A-14 - Energia nas Edificações e Áreas de Serviço

	Área (m <sup>2</sup> )	Energia específica (kcal/m <sup>2</sup> )	Energia total (kcal)
Prédios industriais	5.000	$1,7 \times 10^6$	$13,50 \times 10^9$
Escritórios	300	$4,5 \times 10^6$	$1,35 \times 10^9$
Oficina, laboratório	1.500	$1,7 \times 10^6$	$2,55 \times 10^9$
Tancagem	4.000	$0,5 \times 10^6$	$2,00 \times 10^9$
TOTAL			$19,40 \times 10^9$

Para os equipamentos industriais, a variação entre usinas é muito grande; toma-se novamente um caso típico como base.

Tabela A-15 - Energia na Fabricação dos Equipamentos

	Peso (t)	Energia total (kcal)	Obs.
Esteira de cana (30 m)	45	$,75 \times 10^9$	(a)
Esteira de bagaço (200 m)	180	$3,0 \times 10^9$	(a)
Mesa de lavagem e acessório	42	$,70 \times 10^9$	(a)
Moenda 30" x 54", 5 ternos	220	$6,16 \times 10^9$	(b)
Turbinas, turbogerador, redutores	50	$,9 \times 10^9$	
Caldeiras	310	$4,34 \times 10^9$	(c)
Destilaria:			
- Inox	76	$1,67 \times 10^9$	(d)
- Aço carbono	400	$6,64 \times 10^9$	(e)
TOTAL		$24,16 \times 10^9$	

(a) Essencialmente aço estrutural.

(b) A capacidade desta moenda é maior que a necessidade da fábrica (caso comum). Considerou-se como aço forjado, para avaliação do consumo.

(c) Estimado pelo valor de "tratores e combinadas". Poderia ser uma caldeira de 65t vapor/hora ou duas de 45t vapor/hora; o peso foi tomado de equipamento convencional.

(d) Colunas A, B, C, P; condensadores; trocador K.

(e) Destilaria convencional com caixa de vinho, água e condensadores a 25m; dornas, cubas, tubulões, estrutura total, serpentinas (aço carbono). Esta destilaria teria capacidade nominal para 120.000 l/24 h (álcool anidro); pode atingir 180.000 l/dia.

Nota-se que para os equipamentos há duas parcelas do custo energético a considerar: a energia necessária para a produção do material e a energia utilizada na fabricação do equipamento. A energia necessária para a produção de aço bruto varia conforme o processo. Um resumo de dados coligidos por Chapman [33] indica uma variação de 9.000 kcal/kg até 14.300 kcal/kg, para seis estudos independentes realizados na década de 1970. Utilizou-se 9.030 kcal/kg, valor do Anuário Estatístico da ONU [34]. Valores para o produto acabado (incluindo energia na fabricação do equipamento) podem ser adotados a partir de dados análogos, segundo Gilliland [35], e conforme a Tabela A-16.

Tabela A-16 - Consumo de Energia em Alguns Produtos

	Consumo de energia (kcal/kg)	Comentário
Aço forjado	28.000	Produto acabado
Aço estrutural	16.600	Produto acabado
Turbinas geradoras	9.500	Só fabricação
Tratores	14.350	Produto acabado
Combinadas	13.160	Produto acabado
Aço inox (tubos, vasos)	16.200 a 22.000	Produto acabado

Das Tabelas A-14 e A-15, o total de energia na implantação do setor industrial é da ordem de  $43 \times 10^9$  kcal. Este valor não é mínimo; da análise feita, nota-se que alguns equipamentos importantes (moendas e destilaria) estão sobredimensionados para a produção de 120.000 l/dia de álcool.

Atribuindo a estas edificações e equipamentos uma vida útil de:

Edificações : 50 anos;  
 Máquinas e equipamentos pesados (moendas, caldeiras): 25 anos;  
 Outros equipamentos (leves) : 10 anos;

e considerando um custo de manutenção (energético) equivalente ao custo real, 4% ao ano, tem-se como resultado:

Tabela A-17 - Custo Energético da Destilaria

	En. total 10 <sup>9</sup> kcal	Vida útil anos	En./ano 10 <sup>9</sup> kcal	En./ano manut. 10 <sup>9</sup> kcal	En. total 10 <sup>9</sup> kcal	kcal/ /TC
Edificações	17,40	50	,348	,696	1,044	3.390,
Equipamentos pesados	15,85	25	,634	,634	1,268	4.120,
Equipamentos leves	10,31	10	1,031	,412	1,443	4.690,
TOTAL						12.200,

Verificando as condições de operação de várias destilarias hoje, encontra-se como "melhor caso" (do ponto de vista energético) unidades onde este mesmo equipamento industrial está sendo utilizado (com modificações pequenas) para produzir 180.000 l/dia de álcool. Adotando estes valores para o Cenário 2, tem-se:

- Cenário 1: 12.200 kcal/TC;
- Cenário 2: 8.140 kcal/TC.

APÊNDICE 3 - BALANÇO ENERGÉTICO DO CICLO DE NUTRIENTES PARA A  
CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar, devido a seu alto rendimento de conversão fotossintética, retira significativas quantidades de nutrientes do solo, o que tem como contrapartida a necessidade de uma utilização intensa de nutrientes na forma de adubos, minerais e orgânicos. Aqui se evidencia o interesse da complementariedade lavoura-indústria, onde a devolução ao solo de alguns resíduos industriais, como o vinhoto e a torta de filtro, correspondem a uma restituição dos nutrientes absorvidos.

A Tabela A-18, obtida de ensaios realizados pelo PLANALSUCAR com a variedade CB-41-76, no estado de São Paulo, fornece a quantidade de macronutrientes contidos em colmos e folhas, para a cana planta e a soqueira.

Tabela A-18 - Nutrientes em (Kg/100 ton)

Nutrientes	Colmos		Folhas	
	cana-planta	soqueira	cana-planta	soqueira
Nitrogênio (N)	92	73	62	58
Fósforo (P)	10	13	8	8
Potássio (K)	64	71	89	102
Cálcio (Ca)	59	35	48	32
Magnésio (Mg)	34	31	17	14
Enxofre (S)	28	23	19	16

Considerando-se que para cada tonelada de colmos existam 150 kg de folhas, segundo Chenu [36] e como a prática atual na colheita inclui a queima de folhas, é razoável admitir-se que os nutrientes contidos nas folhas são reciclados "in loco". Associando-se os valores acima à produtividade, em TC/ha, (vide Tabela A-1), tem-se a seguinte retirada média anual de nutrientes, conforme a Tabela A-19.

Tabela A-19 - Nutrientes retirados, em (kg/ha. ano)

Nutrientes		Colmos	Folhas
Nitrogênio	N	60,740	6,906
Fósforo	P	9,540	0,936
Potássio	K	53,980	11,544
Cálcio	Ca	32,100	4,224
Magnésio	Mg	24,780	1,728
Enxofre	S	18,940	1,962

Em um cenário tecnológico mais desenvolvido, on de são aplicados métodos já à disposição da lavoura, empregam-se o vinhoto e a torta de filtro na adubação. Para a metodologia a grícola mais conservadora, estes resíduos não são empregados. A Tabela A-20 apresenta a taxa de aplicação de fertilizantes para estes dois cenários, análogos ao definidos no Capítulo 2.

Tabela A-20 - Taxa média anual de aplicação de nutrientes (adubos comprados) em (Kg/ha. ano)

Nutriente	Cenário 1 Métodos tradicionais	Cenário 2 Métodos modernos (uso de vinhoto torta de filtro)
Nitrogênio N	53,5	15,0
Fósforo P	20,1	4,4
Potássio K	95,4	13,3

Para o cenário 2, é preciso incluir as taxas de aplicação de nutrientes correspondentes à torta de filtro e ao vinhoto. A torta de filtro é um subproduto da clarificação do caldo, sendo produzidas, em média, 40 kg de torta por tonelada de cana, cuja composição é dada na Tabela A-21.

Tabela A-21 - Composição da torta de filtro úmida

Nutriente	kg/ton.torta	Nutriente	kg/ton.torta
Nitrogênio N	2,80	Cálcio	8,00
Fósforo P	2,05	Magnésio Mg	0,78
Potássio K	0,58	Enxofre S	2,63

O vinhoto é o resíduo da coluna de destilação, sendo produzido à taxa média de 13 l por litro de álcool. O volume produzido e sua composição variam bastante, em função principalmente do mosto, se originário de caldo, melão ou caldo misto. O vinhoto oriundo de um mosto de caldo misto apresenta valores intermediários, sendo sua composição dada na Tabela A-22.

Tabela A-22 - Composição do vinhoto de caldo misto (kg/m<sup>3</sup>)

Nutriente	kg/m <sup>3</sup>	Nutriente	kg/m <sup>3</sup>
Nitrogênio N	0,710	Cálcio Ca	1,229
Fósforo P	0,048	Magnésio Mg	0,396
Potássio K	2,904	Enxofre S	1,243

Como estes resíduos apresentam valores reduzidos do teor de macronutrientes, são necessárias altas taxas de aplicação, da ordem de 5 ton MS/ha para a torta de filtro e 80 m<sup>3</sup>/ha para o vinhoto, o que torna sua aplicação possível em apenas 30% da área cultivada. A fração restante recebe fertilizantes como no cenário 1.

A figura A-1 descreve o fluxo dos macronutrientes para os dois cenários considerados, em (kg/ha) para o período de 1 ano. Se forem desprezados os possíveis desvios oriundos das simplificações na metodologia, o déficit de N no cenário 1 deve ser coberto pelo complexo ciclo deste elemento na natureza como, por exemplo, a fixação bacteriana, a decomposição de argilas, a vida animal, etc. Observa-se ainda que nem todo o N computado é na forma disponível para os vegetais, o que pode afetar o balanceamento final.

Associando-se aos nutrientes o seu valor energético, conforme Pimentel [4], N=14.700 kcal/kg, P=5268 kcal/kg e K=1928 kcal/kg, tem-se os valores mostrados na figura A-2. Fica evidente a significativa contribuição energética dos resíduos industriais, bem como a redução do consumo de energia fóssil embutida nos fertilizantes comerciais.

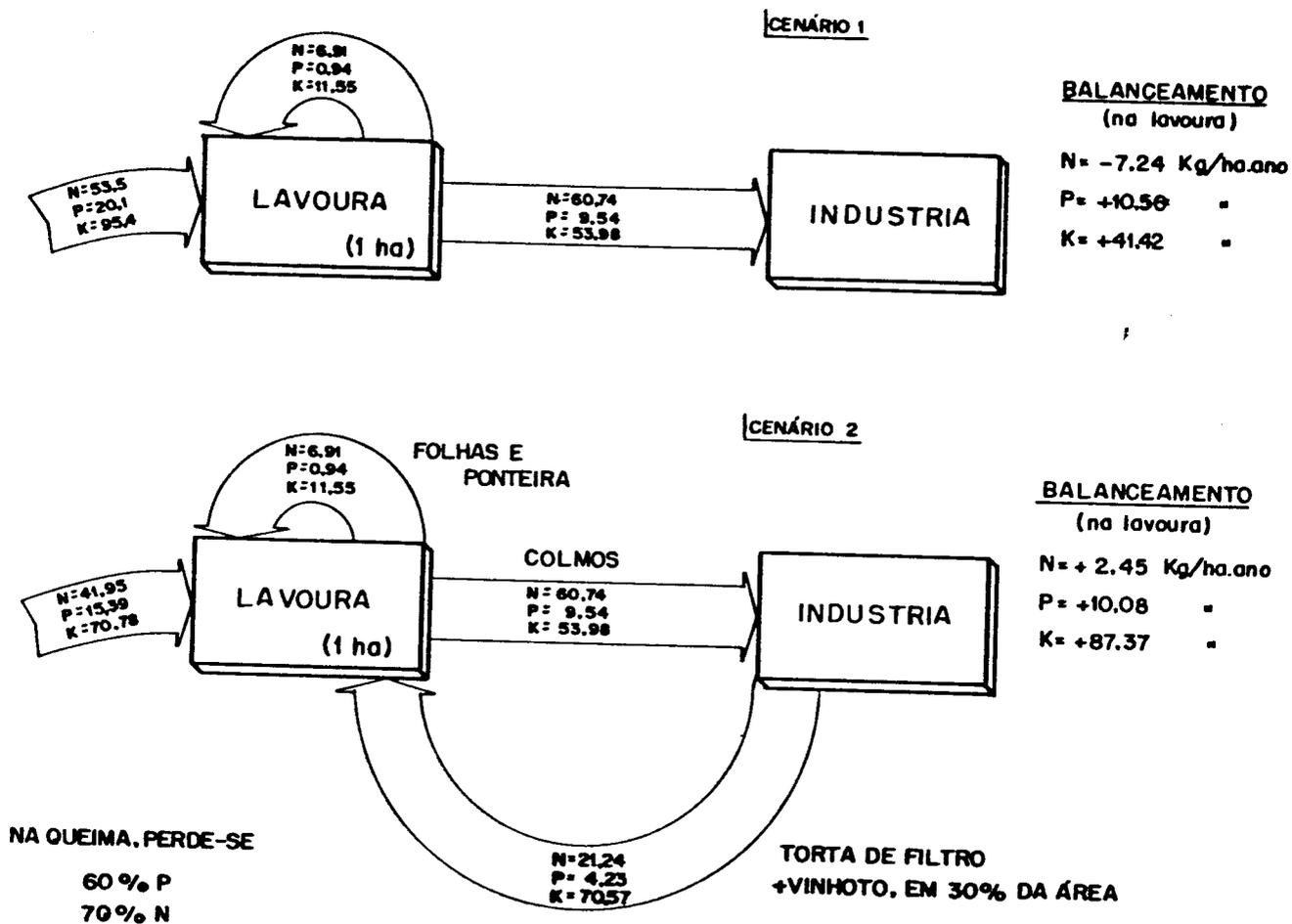


Figura A.1 - Fluxo de macronutrientes (valores em Kg/ha.ano)

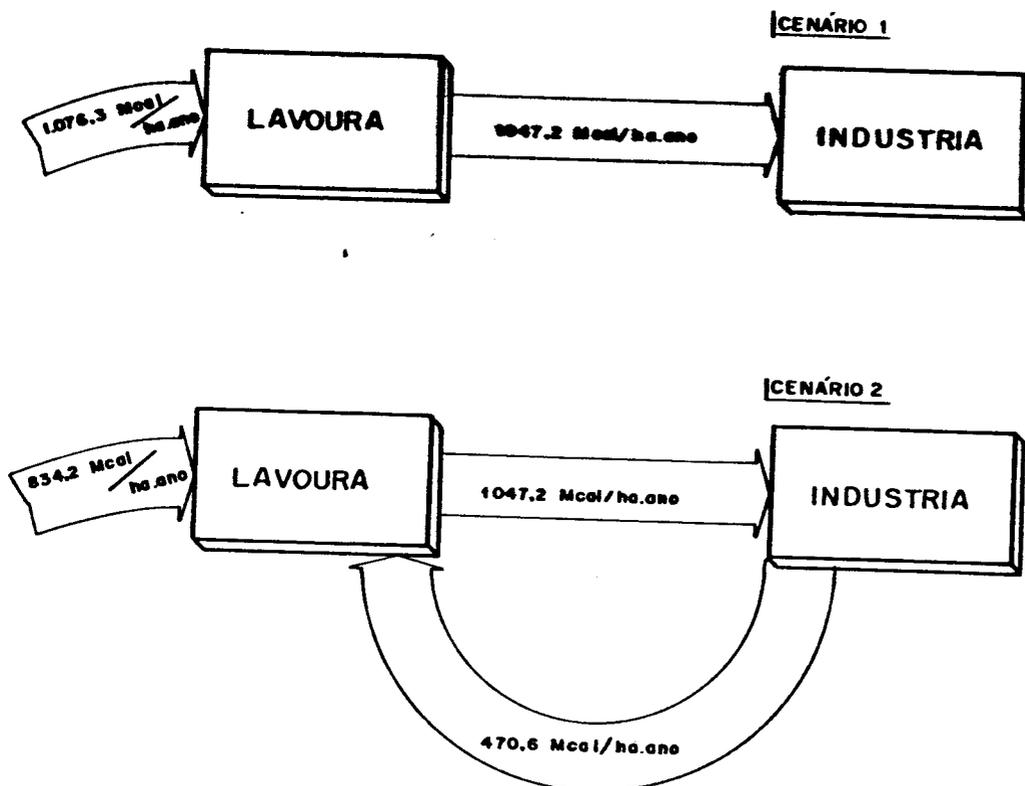


Figura A.2 - Fluxo energético associado aos fertilizantes

APÊNDICE 4 - DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS DO MODELO DE SIMULAÇÃO  
DO SETOR INDUSTRIAL, APLICADO A 2 USINAS

\*\*\*\*\*  
 \*  
 \* - DATALN - \*  
 \* ----- \*  
 \* Programa de dados de entrada autoinstrutivo \*  
 \* associado ao programa principal HNTS12. \*  
 \*  
 \*\*\*\*\*

NO. DO SET DE DADOS: 01

Usina: CASO 01 Data:30/JUN/85

DADOS:

.....  
 PRODUCAO INDUSTRIAL;  
 -----

1-Acucar cristal superior	(TON/DIA)=	750.
2-Acucar demerara	(TON/DIA)=	000.
3-Alcool anidro	(M3/DIA)=	1000.
4-Alcool hidratado	(M3/DIA)=	000.
5-Mel residual	(KG Mel/60 KG Acucar)=	39.
6-Acucares redutores totais (ART) no mel	(%)=	65,37

.....  
 CANA (caracteristicas);  
 -----

1-Fibra da cana	(%)=	12,17
2-POL (sacarose) da cana	(%)=	12,79
3-Acucares redutores como fracao do POL	(%)=	3,00

.....  
 GERACAO DE VAPOR;  
 -----

NO.de caldeiras (-)= 9

CALDEIRA NO. 1

1-Capac. instalada de producao de vapor	(KGV/H)=	45000.
2-Pressao do vapor na saida	(KGF/CM2)=	21.
3-Temperatura do vapor na saida	(C)=	300.
4-Temp. de saida dos gases na chamine	(C)=	240.
OBS: Existencia de pre-ar		
S-Temperatura de saida dos gases entre 180C e 280C.		
N-Temperatura de saida dos gases entre 280C e 420C.		
5-Temp. de entrada do ar para combustao	(C)=	25.
6-Temp. de entrada da agua	(C)=	90.
OBS: Existencia de desaerador		
S-Temperatura de entrada da agua igual a 105C.		
N-Temperatura de entrada da agua entre 60C e 90C.		
7-Excesso de ar na combustao	(%)=	37,5
OBS: Tipo de queimador		
1-Fornalha ferradura		
Excesso de ar entre 60% e 70%		
2-Grelha movel		
Excesso de ar entre 30% e 45%		

58	3-Queima em suspensao		
59	Excesso de ar entre 15% e 20%		
60	8-Nota de avaliacao da operacao	(-)=	8.
61	OBS: Em funcao da operacao da caldeira		
62	ser folgada ou sobrecarregada os		
63	conceitos variam respectivamente		
64	entre 10(OTIMO) e 1(PESSIMO).		
65	9-Perdas por TC na caldeira	(%)=	2,0
66	OBS: As perdas por conducao e conveccao		
67	nas paredes da caldeira variam		
68	entre 1% e 2%.		
69	10-Condicoes do bagaco queimado.		
70	Na caldeira 1 ocorre o caso	=	1.
71	Caso 1-Bagaco queimado como sai das		
72	moendas:		
73	Os dados sao obtidos na		
74	analise da moagem.		
75	Caso 2-Bagaco queimado nao como sai		
76	das moendas:		
77	POL do bagaco	(%)=	.
78	Umidade do bagaco	(%)=	.
79	Cinzas do bagaco	(%)=	.
80			

## CALDEIRA NO. 2

82	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	30000.
83	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	21.
84	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	300.
85	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	270.
86	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.
87	6-Temp. de entrada da agua (C)=	90.
88	7-Excesso de ar na combustao (%)=	37,5
89	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.
90	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0
91	10-Condicoes do bagaco queimado.	
92	Na caldeira 2 ocorre o caso	= 1.

## CALDEIRA NO. 3

95	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	30000.
96	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	21.
97	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	300.
98	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	270.
99	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.
10	6-Temp. de entrada da agua (C)=	90.
11	7-Excesso de ar na combustao (%)=	37,5
12	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.
13	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0
14	10-Condicoes do bagaco queimado.	
15	Na caldeira 3 ocorre o caso	= 1.

## CALDEIRA NO. 4

8	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	45000.
9	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	21.
0	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	300.
1	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	260.
2	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.
3	6-Temp. de entrada da agua (C)=	90.
4	7-Excesso de ar na combustao (%)=	37,5

15 8-Nota de avaliacao da operacao (-)= 8.  
 16 9-Perdas por TC na caldeira (%)= 2.0  
 17 10-Condicoes do bagaco queimado.  
 18 Na caldeira 4 ocorre o caso = 1.

## CALDEIRA NO. 5

20 1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)= 60000.  
 21 2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)= 21.  
 22 3-Temperatura do vapor na saida (C)= 300.  
 23 4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)= 270.  
 24 5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)= 25.  
 25 6-Temp. de entrada da agua (C)= 90.  
 26 7-Excesso de ar na combustao (%)= 37.5  
 27 8-Nota de avaliacao da operacao (-)= 8.  
 28 9-Perdas por TC na caldeira (%)= 2.0  
 29 10-Condicoes do bagaco queimado.  
 30 Na caldeira 5 ocorre o caso = 1.

## CALDEIRA NO. 6

32 1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)= 60000.  
 33 2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)= 21.  
 34 3-Temperatura do vapor na saida (C)= 300.  
 35 4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)= 260.  
 36 5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)= 25.  
 37 6-Temp. de entrada da agua (C)= 90.  
 38 7-Excesso de ar na combustao (%)= 37.5  
 39 8-Nota de avaliacao da operacao (-)= 8.  
 40 9-Perdas por TC na caldeira (%)= 2.0  
 41 10-Condicoes do bagaco queimado.  
 42 Na caldeira 6 ocorre o caso = 1.

## CALDEIRA NO. 7

43 1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)= 65000.  
 44 2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)= 21.  
 45 3-Temperatura do vapor na saida (C)= 300.  
 46 4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)= 260.  
 47 5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)= 25.  
 48 6-Temp. de entrada da agua (C)= 90.  
 49 7-Excesso de ar na combustao (%)= 37.5  
 50 8-Nota de avaliacao da operacao (-)= 8.  
 51 9-Perdas por TC na caldeira (%)= 2.0  
 52 10-Condicoes do bagaco queimado.  
 53 Na caldeira 7 ocorre o caso = 1.

## CALDEIRA NO. 8

54 1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)= 65000.  
 55 2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)= 21.  
 56 3-Temperatura do vapor na saida (C)= 300.  
 57 4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)= 260.  
 58 5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)= 25.  
 59 6-Temp. de entrada da agua (C)= 90.  
 60 7-Excesso de ar na combustao (%)= 37.5  
 61 8-Nota de avaliacao da operacao (-)= 8.  
 62 9-Perdas por TC na caldeira (%)= 2.0  
 63 10-Condicoes do bagaco queimado.  
 64 Na caldeira 8 ocorre o caso = 1.

15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71

## CALDEIRA NO. 9

72			
73	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGY/H)=	100000.	
74	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	22.	
75	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	300.	
76	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	165.	
77	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.	
78	6-Temp. de entrada da agua (C)=	105.	
79	7-Excesso de ar na combustao (%)=	20.	
30	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	9.	
31	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	1.5	
32	10-Condiicoes do bagaco queimado.		
33	Na caldeira 9 ocorre o caso	=	1.

## USOS DO VAPOR VIVO:

## A-PREPARO DA CANA

34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			
51			
52			
53			
54			
55			
56			
57			
58			
59			
60			
61			
62			
63			
64			
65			
66			
67			
68			
69			
70			
71			
72			
73			
74			
75			
76			
77			
78			
79			
80			
81			
82			
83			
84			
85			
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			
95			
96			
97			
98			
99			
00			
01			
02			
03			
04			
05			
06			
07			
08			
09			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			

## TANDEM NO. 1

91	1-Moagem diaria (TC/DIA)=	8500.	
92	2-Moagem diaria maxima (TC/DIA)=	9000.	
93	3-NO. de picadores (-)=	3.	
94	4-NO. de desfibradores (-)=	1.	
95	5-Tipo do desfibrador empregado (-)=	1.	
96	OBS: Os desfibradores podem ser:		
97	Veloc.periferica .90 M/S	- 1	
98	Veloc.periferica .60 M/S	- 2	
99	6-Temp. do vapor usado (C)=	280.	
00	7-Pressao do vapor usado (KGF/CM2)=	19.	

## TANDEM NO. 2

03	1-Moagem diaria (TC/DIA)=	8500.	
04	2-Moagem diaria maxima (TC/DIA)=	9000.	
05	3-NO. de picadores (-)=	2.	
06	4-NO. de desfibradores (-)=	1.	
07	5-Tipo do desfibrador empregado (-)=	1.	
08	6-Temp. do vapor usado (C)=	280.	
09	7-Pressao do vapor usado (KGF/CM2)=	19.	

## TANDEM NO. 3

12	1-Moagem diaria (TC/DIA)=	1500.	
13	2-Moagem diaria maxima (TC/DIA)=	3000.	
14	3-NO. de picadores (-)=	2.	
15	4-NO. de desfibradores (-)=	0.	
16	5-Tipo do desfibrador empregado (-)=	0.	
17	6-Temp. do vapor usado (C)=	280.	
18	7-Pressao do vapor usado (KGF/CM2)=	19.	

## B-MOAGEM DA CANA

## TANDEM NO. 1

23	1-Temperatura do vapor vivo nas turbinas (C)=	280.	
24	2-Pressao do vapor vivo nas turbinas (KGF/CM2)=	19.	
25	3-Condiicoes do bagaco na saida do tandem:		
26	POL do bagaco (%)=	1.64	
27	Umidade do bagaco (%)=	47.9	
28	Cinzas do bagaco (%)=	2.	

29	4-Extracao		
30		(%)=	95.6
31		(-)=	6
32	NO. de moendas no tandem		
33	MOENDA NO. 1		
34	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
35	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.1
36	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
37	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
38	MOENDA NO. 2		
39	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
40	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.1
41	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
42	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
43	MOENDA NO. 3		
44	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
45	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.1
46	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
47	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
48	MOENDA NO. 4		
49	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
50	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.1
51	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
52	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
53	MOENDA NO. 5		
54	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
55	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3
56	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
57	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
58	MOENDA NO. 6		
59	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
60	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3
61	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
62	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
63	TANDEM NO. 2		
64	1-Temperatura do vapor vivo nas turbinas	(C)=	280.
65	2-Pressao do vapor vivo nas turbinas	(KGF/CM2)=	19.
66	3-Condicoes do bagaco na saida do tandem:		
67	POL do bagaco	(%)=	1.68
68	Umidade do bagaco	(%)=	49.6
69	Cinzas do bagaco	(%)=	2.
70	4-Extracao	(%)=	95.6
71		(-)=	6
72	NO. de moendas no tandem		
73	MOENDA NO. 1		
74	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
75	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.1
76	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
77	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
78	MOENDA NO. 2		
79	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
80	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.1
81	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
82	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.
83	MOENDA NO. 3		
84	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94
85	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.1
	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	30.5
	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	290.

E 6 HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 MON, FEB 16, 1987, 6:34 PM (C

86				
87		MOENDA NO. 4		
88	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94	
89	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.1	
90	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	30.5	
91	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	290.	
92		MOENDA NO. 5		
93	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94	
94	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3	
95	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6	
96	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.	
97		MOENDA NO. 6		
98	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.94	
99	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3	
00	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6	
01	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	210.	
02		TANDEM NO. 3		
03	1-Temperatura do vapor vivo nas turbinas	(C)=	280.	
04	2-Pressao do vapor vivo nas turbinas	(KGF/CM2)=	19.	
05	3-Condicoes do bagaco na saida do tandem:			
06	POL do bagaco	(%)=	2.8	
07	Umidade do bagaco	(%)=	43.4	
08	Cinzas do bagaco	(%)=	2.	
09	4-Extracao	(%)=	93.3	
10		NO. de moendas no tandem	(-)=	4
11		MOENDA NO. 1		
12	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.76	
13	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.3	
14	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	25.	
15	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	250.	
16		MOENDA NO. 2		
17	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.76	
18	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.3	
19	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	25.	
20	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	250.	
21		MOENDA NO. 3		
22	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.76	
23	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.3	
24	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	25.	
25	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	280.	
26		MOENDA NO. 4		
27	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.76	
28	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.3	
29	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	25.	
30	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	280.	
31		C-GERACAO de ENERGIA ELETRICA		
32	1-Consumo especifico de energia eletrica	(KWH/TC)=	12.29	
33	2-Fracao comprada de energia eletrica	(%)=	0.	
34		NO. de turbogeradores	(-)=	3.
35		TURBOGERADOR NO. 1		
36	1-Potencia eletrica	(KVA)=	3750.	
37	2-Fator de potencia	(-)=	0.8	
38	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	280.	
39	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	21.	
40	5-Rendimento isentrop. na cond. de operacao	(%)=	64.	
41		TURBOGERADOR NO. 2		
42				

HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 MON, FEB 16, 1987, 6:34 PM (C)

43 1-Potencia eletrica (KVA)= 3750.  
 44 2-Fator de potencia (-)= 0.8  
 45 3-Temperatura do vapor vivo (C)= 280.  
 46 4-Pressao do vapor vivo (KGF/CM2)= 21.  
 47 5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao (%)= 64.

TURBOGERADOR NO. 3

48 1-Potencia eletrica (KVA)= 7500.  
 49 2-Fator de potencia (-)= 0.8  
 50 3-Temperatura do vapor vivo (C)= 280.  
 51 4-Pressao do vapor vivo (KGF/CM2)= 21.  
 52 5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao (%)= 68.

D-TURBOBOMBAMENTO

53 1-Pressao de recalque media (KGF/CM2)= 27.  
 54 2-Pressao de succao media (KGF/CM2)= 2.  
 55 3-Yazao equivalente (KG/H)=540000.  
 56 4-Temperatura do vapor vivo media (C)= 280.  
 57 5-Pressao do vapor vivo media (KGF/CM2)= 20.

E-SECAGEM DO ACUCAR

58 1-Utilizado vapor na secagem? (S ou N) = S  
 59 2-Peso do acucar secado (TON/DIA)= 750.

F-REFINO DO ACUCAR

60 1-0 acucar e refinado? (S ou N) = N  
 61 2-Peso do acucar refinado (TON/DIA)= 0.

USOS DO VAPOR DE ESCAPE;

62 1-Pressao do vapor de escape (KGF/CM2)= 1.5  
 63 2-Concentracao do caldo misto (BX)= 14.44  
 64 3-Pureza do caldo misto (%)= 82.76

A-PRE-EVAPORACAO

65 1-Concentracao do caldo misto na saida (BX)= 25.  
 66 2-Temperatura do caldo na entrada (C)= 95.  
 67 3-Temperatura do vapor vegetal (C)= 115.  
 68 4-Rendimento termico (%)= 97.  
 69 5-0 caldo para alcool e concentrado? (S ou N)= S  
 70 6-Concentracao inicial do mosto (BX)= 17.66

B-AQUECIMENTO DO CALDO PARA ALCOOL

71 1-Temperatura inicial do caldo (C)= 60.  
 72 2-Temperatura final do caldo (C)= 105.  
 73 3-Rendimento termico (%)= 97.  
 74 4-Este aquecimento usa vapor vegetal? (S ou N)= N

C-DESTILACAO COM VAPOR DE ESCAPE

75 1-Teor de alcool no vinho (%)= 7.0  
 76 2-Consumo de vapor na coluna C (KGV/L)= 0.8  
 77 3-Consumo adicional de vapor na destilaria (%)= 0.

D-DESAERACAO DA AGUA PARA AS CALDEIRAS

78 NO. de desaeradores (-)= 1  
 79 DESAERADOR NO. 1  
 80 1-Volume da agua preaquecida (M3/H)= 105.  
 81 2-Temperatura de entrada da agua (C)= 78.

00 3-Temperatura de saída da água (C)= 105.  
 01 4-Rendimento termico do desaerador (%)= 97.  
 02 5-Temperatura do vapor usado (C)= 111.  
 03 6-Pressao do vapor usado (KGF/CM2)= 1.5

.....  
 04  
 05 USOS DO VAPOR VEGETAL;  
 06 -----

07  
 08 A-AQUECIMENTO DO CALDO PARA ACUCAR

09 1-Temperatura inicial do caldo (C)= 30.  
 10 2-Temperatura final do caldo (C)= 105.  
 11 3-Rendimento termico (%)= 97.  
 12 4-Este aquecim. usa vapor de escape? (S ou N)= N

13  
 14 B-EVAPORACAO

15 1-Concentracao do caldo processado (BX)= 25.  
 16 2-Concentracao do xarope produzido (BX)= 58.02  
 17 3-NO. de efeitos na evaporacao (-)= 4.  
 18 4-Rendimento termico (%)= 97.  
 19 5-Existem tanques flash p/ condensado?(S ou N)= S

20  
 21 C-COZIMENTO

22 1-NO. de massas cozidas (-)= 2.  
 23 2-Concentracao media final das massas (BX)= 89.3

24  
 25 D-DESTILACAO COM VAPOR VEGETAL

26 1-Consumo espec.de vapor(colunas B e P)(KGV/L)= 1.6  
 27 2-Fracao do alcool total produzido (%)= 0.  
 28 3-Consumo adicional de vapor na destilaria (%)= 0.  
 29 .....

30  
 31 FECHAMENTO FINAL DA DEMANDA DE VAPOR  
 32 -----

33 1-Consumo de vapor vivo nao computado (KGV/TC)= 0.  
 34 2-Consumo de vapor de esc. nao comput.(KGV/TC)= 0.  
 35 3-Consumo de vapor veget. nao comput. (KGV/TC)= 0.  
 36 4-O isol. termico esta em bom estado? (S OU N)= S

37  
 38 \*\*\*\*\*

HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 MON, FEB 16, 1987, 6:34 PM (C)

```

*****
1  *
2  *
3  *           - DATALN -
4  *           -----
5  *   Programa de dados de entrada autoinstrutivo
6  *   associado ao programa principal HNTS12.
7  *
8  *
9  *
10 *
11 *
12 *
13 *
14 *
15 *
16 *
17 *
18 *
19 *
20 *
21 *
22 *
23 *
24 *
25 *
26 *
27 *
28 *
29 *
30 *
31 *
32 *
33 *
34 *
35 *
36 *
37 *
38 *
39 *
40 *
41 *
42 *
43 *
44 *
45 *
46 *
47 *
48 *
49 *
50 *
51 *
52 *
53 *
54 *
55 *
56 *
57 *
*****

```

NO. DO SET DE DADOS: 01

Usina: CAS002                      Data:30/AGO/85

DADOS:

.....  
 PRODUCAO INDUSTRIAL:  
 -----

1-Acucar cristal superior	(TON/DIA)=	364.14
2-Acucar demerara	(TON/DIA)=	000.
3-Alcool anidro	(M3/DIA)=	000.
4-Alcool hidratado	(M3/DIA)=	287.55
5-Mel residual	(KG Mel/60 KG Acucar)=	39.
6-Acucares redutores totais (ART) no mel	(%)=	65.05

.....  
 CANA (caracteristicas):  
 -----

1-Fibra da cana	(%)=	12.78
2-POL (sacarose) da cana	(%)=	13.58
3-Acucares redutores como fracao do POL	(%)=	3.00

.....  
 GERACAO DE VAPOR:  
 -----

NO.de caldeiras                      (-)=              8

CALDEIRA NO. 1

1-Capac. instalada de producao de vapor	(KGY/H)=	34510.
2-Pressao do vapor na saida	(KGF/CM2)=	28.
3-Temperatura do vapor na saida	(C)=	289.
4-Temp. de saida dos gases na chamine	(C)=	234.

OBS: Existencia de pre-ar

S-Temperatura de saida dos gases  
entre 180C e 280C.

N-Temperatura de saida dos gases  
entre 280C e 420C.

5-Temp. de entrada do ar para combustao	(C)=	23.
6-Temp. de entrada da agua	(C)=	112.

OBS: Existencia de desaerador

S-Temperatura de entrada da  
agua igual a 105C.

N-Temperatura de entrada da  
agua entre 60C e 90C.

7-Excesso de ar na combustao	(%)=	25.5
------------------------------	------	------

OBS: Tipo de queimador

1-Fornalha ferradura

Excesso de ar entre 60% e 70%

2-Grelha movel

Excesso de ar entre 30% e 45%

8	3-Queima em suspensao		
9	Excesso de ar entre 15% e 20%		
0	8-Nota de avaliacao da operacao	(-)=	8.
1	OBS: Em funcao da operacao da caldeira		
2	ser folgada ou sobrecarregada os		
3	conceitos variam respectivamente		
4	entre 10(OTIMO) e 1(PESSIMO).		
5	9-Perdas por TC na caldeira	(%)=	1.5
6	OBS: As perdas por conducao e conveccao		
7	nas paredes da caldeira variam		
8	entre 1% e 2%.		
9	10-Condicoes do bagaco queimado.		
0	Na caldeira 1 ocorre o caso	=	1.
1	Caso 1-Bagaco queimado como sai das		
2	moendas:		
3	Os dados sao obtidos na		
4	analise da moagem.		
5	Caso 2-Bagaco queimado nao como sai		
6	das moendas:		
7	POL do bagaco	(%)=	.
8	Umidade do bagaco	(%)=	.
9	Cinzas do bagaco	(%)=	.

## CALDEIRA NO. 2

31	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	30550.
32	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	27.5
33	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	275.
34	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	240.
35	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	28.
36	6-Temp. de entrada da agua (C)=	110.
37	7-Excesso de ar na combustao (%)=	32.8
38	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.
39	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	1.5
40	10-Condicoes do bagaco queimado.	
41	Na caldeira 2 ocorre o caso	= 1.

## CALDEIRA NO. 3

42	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	48520.
43	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	34.
44	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	348.
45	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	212.
46	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	20.
47	6-Temp. de entrada da agua (C)=	114.
48	7-Excesso de ar na combustao (%)=	13.5
49	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.
50	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	1.5
51	10-Condicoes do bagaco queimado.	
52	Na caldeira 3 ocorre o caso	= 1.

## CALDEIRA NO. 4

53	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	23700.
54	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	12.5
55	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	215.
56	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	260.
57	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.
58	6-Temp. de entrada da agua (C)=	100.
59	7-Excesso de ar na combustao (%)=	53.7

SE 3

HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 MON, FEB 16, 1987, 6:34 PM (C

15	8-Nota de avaliacao da operacao	(-)=	6.
16	9-Perdas por TC na caldeira	(%)=	2.0
17	10-Condicoes do bagaco queimado.		
18	Na caldeira 4 ocorre o caso	=	1.

## CALDEIRA NO. 5

120	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	28310.	
121	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	12.	
122	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	235.	
123	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	210.	
124	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	26.	
125	6-Temp. de entrada da agua (C)=	100.	
126	7-Excesso de ar na combustao (%)=	99.3	
127	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	6.	
128	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0	
129	10-Condicoes do bagaco queimado.		
130	Na caldeira 5 ocorre o caso	=	1.

## CALDEIRA NO. 6

133	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	22310.	
134	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	14.5	
135	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	270.	
136	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	200.	
137	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.	
138	6-Temp. de entrada da agua (C)=	105.	
139	7-Excesso de ar na combustao (%)=	34.	
140	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.	
141	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0	
142	10-Condicoes do bagaco queimado.		
143	Na caldeira 6 ocorre o caso	=	1.

## CALDEIRA NO. 7

146	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	22870.	
147	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	12.5	
148	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	210.	
149	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	250.	
150	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	25.	
151	6-Temp. de entrada da agua (C)=	100.	
152	7-Excesso de ar na combustao (%)=	36.2	
153	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.	
154	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0	
155	10-Condicoes do bagaco queimado.		
156	Na caldeira 7 ocorre o caso	=	1.

## CALDEIRA NO. 8

159	1-Capac. instalada de producao de vapor (KGV/H)=	20950.	
160	2-Pressao do vapor na saida (KGF/CM2)=	15.	
161	3-Temperatura do vapor na saida (C)=	310.	
162	4-Temp. de saida dos gases na chamine (C)=	290.	
163	5-Temp. de entrada do ar para combustao (C)=	23.	
164	6-Temp. de entrada da agua (C)=	100.	
165	7-Excesso de ar na combustao (%)=	58.6	
166	8-Nota de avaliacao da operacao (-)=	8.	
167	9-Perdas por TC na caldeira (%)=	2.0	
168	10-Condicoes do bagaco queimado.		
169	Na caldeira 8 ocorre o caso	=	1.

## USOS DO VAPOR VIVO:

## A-PREPARO DA CANA

NO. de tandens de moagem (-)= 1

## TANDEM NO. 1

1-Moagem diaria	(TC/DIA)=	6633.20
2-Moagem diaria maxima	(TC/DIA)=	6500.
3-NO. de picadores	(-)=	1.
4-NO. de desfibradores	(-)=	1.
5-Tipo de desfibrador empregado	(-)=	1.
OBS: Os desfibradores podem ser;		
Veloc.periferica .90 M/S	- 1	
Veloc.periferica .60 M/S	- 2	
6-Temp. do vapor usado	(C)=	300.
7-Pressao do vapor usado	(KGF/CM2)=	28.

## B-MOAGEM DA CANA

## TANDEM NO. 1

1-Temperatura do vapor vivo nas turbinas	(C)=	280.
2-Pressao do vapor vivo nas turbinas	(KGF/CM2)=	18.
3-Condicoes do bagaco na saida do tandem:		
POL do bagaco	(%)=	2.55
Umidade do bagaco	(%)=	49.97
Cinzas do bagaco	(%)=	2.
4-Extracao	(%)=	94.84
NO. de moendas no tandem	(-)=	7

## MOENDA NO. 1

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.5
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	30.4
4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	246.4

## MOENDA NO. 2

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.5
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	183.

## MOENDA NO. 3

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.5
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	183.

## MOENDA NO. 4

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	183.

## MOENDA NO. 5

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	7.3
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	30.4
4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	246.4

## MOENDA NO. 6

1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.7
3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6

HEWLETT-PACKARD 32201A.7.15 EDIT/3000 MON, FEB 16, 1987, 6:34 PM (C)

E 5

29	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	267.6
30	MOENDA NO. 7		
31	1-Diametro nominal dos rolos	(M)=	0.86
32	2-Rotacao dos rolos	(RPM)=	6.3
33	3-Diametro do pistao hidraulico	(CM)=	35.6
34	4-Pressao nas garrafas	(KGF/CM2)=	267.6
35			
36	C-GERACAO de ENERGIA ELETRICA		
37	1-Consumo especific.de energia eletrica	(KWH/TC)=	15.91
38	2-Fracao comprada de energia eletrica	(%)=	22.
39	NO. de turbogeradores	(-)=	5.
40	TURBOGERADOR NO. 1		
41	1-Potencia eletrica	(KVA)=	5150.
42	2-Fator de potencia	(-)=	0.8
43	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	400.
44	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	40.
45	5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao	(%)=	64.
46	TURBOGERADOR NO. 2		
47	1-Potencia eletrica	(KVA)=	2070.
48	2-Fator de potencia	(-)=	0.8
49	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	320.
50	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	28.
51	5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao	(%)=	64.
52	TURBOGERADOR NO. 3		
53	1-Potencia eletrica	(KVA)=	1250.
54	2-Fator de potencia	(-)=	0.8
55	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	320.
56	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	21.
57	5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao	(%)=	64.
58	TURBOGERADOR NO. 4		
59	1-Potencia eletrica	(KVA)=	1000.
60	2-Fator de potencia	(-)=	0.8
61	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	250.
62	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	14.
63	5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao	(%)=	64.
64	TURBOGERADOR NO. 5		
65	1-Potencia eletrica	(KVA)=	1000.
66	2-Fator de potencia	(-)=	0.75
67	3-Temperatura do vapor vivo	(C)=	250.
68	4-Pressao do vapor vivo	(KGF/CM2)=	14.
69	5-Rendimento isentrop. na cond.de operacao	(%)=	64.
70			
71	D-TURBOBOMBAMENTO		
72	1-Pressao de recalque media	(KGF/CM2)=	33.9
73	2-Pressao de succao media	(KGF/CM2)=	2.
74	3-Yazao equivalente	(KG/H)=	213000.
75	4-Temperatura do vapor vivo media	(C)=	320.
76	5-Pressao do vapor vivo media	(KGF/CM2)=	28.
77			
78	E-SECAGEM DO ACUCAR		
79	1-Utilizado vapor na secagem? (S ou N)	=	S
80	2-Peso do acucar secado	(TON/DIA)=	412.82
81			
82	F-REFINO DO ACUCAR		
83	1-O acucar e refinado? (S ou N)	=	N
84	2-Peso do acucar refinado	(TON/DIA)=	0.
85	.....		



2-Fracao do alcool total produzido	(%)=	100.
3-Consumo adicional de vapor na destilaria	(%)=	0.

FECHAMENTO FINAL DA DEMANDA DE VAPOR

1-Consumo de vapor vivo nao computado	(KGV/TC)=	0.
2-Consumo de vapor de esc. nao comput.	(KGV/TC)=	0.
3-Consumo de vapor veget. nao comput.	(KGV/TC)=	0.
4-O isol. termico esta em bom estado?	(S OU N)=	S

\*\*\*\*\*

3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
0  
1  
2  
3  
4

\*\*\*\*\*  
- HNTSON -

PROGRAMA DE ANALISE DA INDUSTRIA CANAVIEIRA

DADOS DE ENTRADA -

Usina: CASO 01

Data: 30/JUN/85

Producao :

1-Acucar cristal superior	<TON/DIA>=	750,00
2-Acucar demerara	<TON/DIA>=	.00
3-Alcool anidro	<M3/DIA>=	1000,00
4-Alcool hidratado	<M3/DIA>=	.00
5-Mel produzido	<KG/60KG AC>=	39,00
6-ART no mel	<%>=	65,37

Cana :

1-Fibra da cana	<%>=	12,17
2-POL da cana (sacarose)	<%>=	12,79
3-ART como % do POL	<%>=	3,00

Caldeiras:

no.	Capac.	P vapor	T vapor	T gases	T ar	T agua	Exc. ar	Oper.
1	45000.00	21.0	300.0	240.0	25.0	90.0	37.5	8.0
2	30000.00	21.0	300.0	270.0	25.0	90.0	37.5	8.0
3	30000.00	21.0	300.0	270.0	25.0	90.0	37.5	8.0
4	45000.00	21.0	300.0	260.0	25.0	90.0	37.5	8.0
5	60000.00	21.0	300.0	270.0	25.0	90.0	37.5	8.0
6	60000.00	21.0	300.0	260.0	25.0	90.0	37.5	8.0
7	65000.00	21.0	300.0	260.0	25.0	90.0	37.5	8.0
8	65000.00	21.0	300.0	260.0	25.0	90.0	37.5	8.0
9	100000.00	22.0	300.0	165.0	25.0	105.0	20.0	9.0

Uso do vapor vivo:

1-Preparo:

Tandem	Moagem	Moagem max	N pic	N desf	T desf	T vapor	P vapor
1	8500.00	9000.00	3.00	1.00	1.00	280.00	19.00
2	8500.00	9000.00	2.00	1.00	1.00	280.00	19.00
3	1500.00	3000.00	2.00	.00	.00	280.00	19.00

2-Moagem:

Tandem	T vapor	P vapor	POL bag	Umid. bag	Cz. bag	Extracao
1	280.00	19.00	1.64	47.90	2.00	95.60
2	280.00	19.00	1.68	49.60	2.00	95.60
3	280.00	19.00	2.80	43.40	2.00	93.30

Moendas:

Tandem	Moenda	D rolo	Rotacao	D pist	P garr
1	1	.94	6.10	35.60	210.00
1	2	.94	6.10	35.60	210.00
1	3	.94	7.10	35.60	210.00
1	4	.94	7.10	35.60	210.00
1	5	.94	7.30	35.60	210.00
1	6	.94	7.30	35.60	210.00
2	1	.94	6.10	35.60	210.00
2	2	.94	6.10	35.60	210.00

2	3	.94	7.10	30.50	290.00
2	4	.94	7.10	30.50	290.00
2	5	.94	7.30	35.60	210.00
2	6	.94	7.30	35.60	210.00
3	1	.76	6.30	25.00	250.00
3	2	.76	6.30	25.00	250.00
3	3	.76	6.30	25.00	280.00
3	4	.76	6.30	25.00	280.00

## 3- Geracao de energia eletrica:

1-Consumo especifico de energia eletrica (KWH/TC)=	12.29				
2-Fracao comprada da energia eletrica (<math>(\%)</math>)=	.00				
Turbog	Pot.elet	Fat.pot	T vapor	P vapor	Rend.isentr.
1	3750.00	.80	280.00	21.00	64.00
2	3750.00	.80	280.00	21.00	64.00
3	7500.00	.80	280.00	21.00	68.00

## 4-Turbo-bombeamento:

P recalq	P succao	Vazao	T vapor	P vapor
27.0	2.0	540000.0	280.0	20.0

## 5-Secagem e refino do acucar:

1-Peso do acucar secado	(TON/DIA)=	750.00
2-Peso do acucar refinado	(TON/DIA)=	.00

## Uso de vapor de escape:

1-Pressao do vapor de escape	(KGF/CM2)=	1.50
2-Concentracao do caldo misto	(BX)=	14.44
3-Pureza do caldo misto	(%)=	82.76

## 1-Pre-evaporacao:

1-0 caldo p/ alcool e concentrado	=	S
2-Concentracao inicial do mosto na ferm.	(%)=	17.66

## Dados da fabricacao de acucar:

Brix saida	T entrada	T vap.veg.	Rend termico
25.00	95.00	115.00	97.00

## 2-Aquecimento do caldo p/ alcool:

T inicial	T final	Rend termico	Usa vapor vegetal
60.00	105.00	97.00	N

## 3-Destilacao com vapor de escape:

1-Teor de alcool no vinho	(%)=	7.00
2-Consumo de vapor na coluna C	(KGV/L)=	.80
3-Consumo adicional de vapor	(KGV/L)=	.00

## 4-Desaerador:

desaer	Vol agua	T entr	T sai	Rend ter	T vapor	P vapor
1	105.00	78.00	105.00	97.00	111.00	1.50

## Uso de vapor vegetal:

## 1-Aquecimento do caldo p/ acucar:

1-Temperatura inicial do caldo	(C)=	30.00
2-Temperatura final do caldo	(C)=	105.00
3-Rendimento termico	(%)=	97.00
4-Este aquecim. usa vapor de escape=		N

## 2-Evaporacao:

Brix caldo	Brix xarope	No.efeitos	Rend termico	Tanques flash
25.00	58.02	4.0	97.00	S

## 3-Cozimento:

1-No. de massas no cozimento	(-)=	2.0
2-Concentracao media da massa	(%)=	89.30

## 4-Destilacao com vapor vegetal:

1-Cons.especific.de vapor(colunas A,B) (KGV/L)=	1.60
2-Fracao do alcool total produzido (%)=	.00
3-Consumo adicional de vapor (KGV/L)=	.00

## Fechamento da demanda de vapor:

1-Consumo de vapor vivo nao computado(KGV/H)=	.00
2-Consumo de vapor de escape n.comput(KGV/H)=	.00
3-Consumo de vapor vegetal nao comput(KGV/H)=	.00
4-0 isolamento termico esta em bom estado =	5

## RESULTADOS -

## A-Analise do fluxo de materiais:

## 1-Balanco de acucares

1-Fracao do acucar na fabricacao que sai como mel=	.289
2-Fracao do caldo desviado para a fabricacao =	.429

## 2-Rendimento industrial

1-Rend.industrial referido ao acucar equivalente =	.906
2-Rend.industrial funcao de eficiencias setoriais=	.824

## B-Geracao de vapor:

## 1-Bagaco (producao e caracteristicas)

1-Producao de bagaco (in natura)	(TON/H)=	195.9
2-Producao de bagaco (50% umidade)	(TON/H)=	202.3
3-Teores medios no bagaco queimado:		
Umidade (%)=	48.363	
Sacarose (%)=	1.746	
Cinzas (%)=	2.000	

## 2-Analise das caldeiras

caldeira	rendimento termico	produtiv.de vapor
1	.754	2.264
2	.733	2.201
3	.733	2.201
4	.740	2.222
5	.733	2.201
6	.740	2.222
7	.740	2.222
8	.740	2.222
9	.829	2.556

1-Rendimento termico ponderado	(%)=	.758
2-Produtividade media ponderada	(KGV/KGB)=	2.287
3-Producao maxima especifica de vapor	(KGV/TC)=	581.29

## C-Consumo de vapor vivo:

## 1-Preparo e moagem da cana

tandem	pot.picador	pot.desfibr.	pot.preparo	cons.vap.preparo
1	2064.59	1522.92	3587.51	50454.66
2	1258.58	1522.92	2781.50	39118.95
3	222.10	.00	222.10	3123.65
1-Consumo total de vapor no preparo			(KGV/H)=	92697.2

2-Producao de escape total no preparo					(KGV/H)= 92697,2
tandem pot.moenda	con.vap.moenda	c.e.prep	c.e.moen.	c.e.tandem	
1	5814,8	81779,1	10,129	16,418	26,548
2	5594,5	78680,7	7,854	15,796	23,650
3	879,0	12362,7	3,554	14,065	17,616

3-Consumo total de vapor na moagem (KGV/H)=172822,5

4-Producao total de escape na moagem (KGV/H)=172822,5

5-Coef.medio de potencia (prep.e moagem) (CV/TCH)=24,4922

#### 2-Geracao de energia eletrica

turbogerador	cons.espec.vapor	titulo saida
1	9,97	,9931
2	9,97	,9931
3	9,38	,9854

1-Consumo espec.medio na turbogeracao (KGV/CV)= 9,677

2-Titulo medio na saida das turbinas (-)= ,9893

3-Potencia mec.total nos turbogeradores (CV)= 13696,3

4-Pot.mec.total (hipotese de geracao total) (CV)= 13696,3

5-Consumo de vapor nos turbogeradores (KGV/H)=132537,1

6-Cons.de vapor nos turbog.(geracao total)(KGV/H)=132537,1

7-Producao de vapor de escape (KGV/H)=131113,0

#### 3-Turbobombeamento

1-Consumo de potencia nas turbobombas (CV)= 995,7

2-Consumo especifico de vapor (KGV/CV)= 13,5

3-Titulo de saida das turbobombas (-)= 1,0000

4-Consumo total de vapor no turbobomb. (KGV/H)= 13473,9

5-Producao de vapor de escape (KGV/H)= 13473,9

#### 4-Secagem e refino do acucar

1-Consumo de vapor na secagem (KGV/H)= 781,3

2-Consumo de vapor no refino (KGV/H)= ,0

#### D-Consumo de vapor vegetal :

##### 1-Producao de caldo

1-Producao total de caldo misto (KG/H)=796364,2

2-Producao de caldo,referida a cana (KG/TC)= 1033,1

3-Caldo enviado p/fabricacao de acucar (KG/H)=341821,4

##### 2-Sangrias de vapor vegetal

1-Aquecimento do caldo para acucar (KGV/H)= 54965,4

2-Aquec.do caldo para acucar,refer.a cana(KGV/TC)= 166,1

3-Cozimento (Tachos a vacuo ) (KGV/H)= 45285,8

4-Cozimento,referido a cana (KGV/TC)= 136,9

5-Destilaria com vapor vegetal (KGV/H)= ,0

6-Sangria total de vapor vegetal (KGV/H)=100251,2

##### 3-Evaporacao

1-Consumo de vapor vegetal no mult. efeito(KGV/H)= 39124,5

2-Cons. de vap.vegetal,referido a cana (KGV/TC)= 118,2

##### 4-Balanco de vapor vegetal

1-Producao maxima de vapor vegetal (KGV/H)=144385,4

2-Consumo efetivo de vapor vegetal (KGV/H)=139375,6

3-Disponib.para sangrias de vapor vegetal (KGV/H)= 5009,7

#### E-Consumo de vapor de escape :

1-Aquecimento do caldo para alcool

1-Consumo de vapor para aquecimento (KGV/H)= 41015,5  
 2-Consumo de vapor, referido a cana (KGV/TC)= 93,2

2-Pre-evaporacao

1-Consumo no pre-evaporador, para acucar (KGV/H)=150940,2  
 2-Consumo no pre-evaporador, refer. a cana (KGV/TC)= 456,2

3-Destilaria

1-Consumo de vapor de escape p/ a. anidro (KGV/H)=145000,0  
 2-Consumo de vapor de escape p/ a. hidrat. (KGV/H)= .0  
 3-Cons. total de vapor de escape na destil. (KGV/H)=145000,0

4-Desaerador

1-Consumo de vapor de escape no desaerador (KGV/H)= 5463,2  
 2-Consumo no desaerador, referido a cana (KGV/TC)= 7,1

5-Consumo total de vapor de escape

1-Consumo total de vapor de escape (KGV/H)=349036,1  
 2-Consumo de vapor de escape, refer. a cana (KGV/TC)= 452,8

.....  
 Balanco de vapor;  
 -----

VAPOR DE ESCAPE (KGV/H)= 54089,9  
 VAPOR VIVO (KGV/H)= 23400,0  
 .....

F-Indices operacionais:

1-Fator de utilizacao das caldeiras (-)= .8246  
 2-Fator de utilizacao dos turbogeradores (-)= .8399  
 3-Alcool produzido, em relacao a cana (L/TC)= 53,838  
 4-Acucar produzido, em relacao a cana (KG/TC)= 40,705  
 5-Relacao alcool/acucar (L/KG)= 1,3226  
 6-Excesso de bagaco (KGB/H)= 10229,6  
 7-Excesso de bagaco, em rel. ao bagaco total (%)= 5,2223  
 Considerando o sobreconsumo devido as paradas:  
 8-Excesso de bagaco (KGB/H)= 9206,6  
 9-Excesso de bagaco, em rel. ao bagaco total (%)= 4,7000  
 Analise para co-geracao:  
 10-Consumo de vapor para fins termicos (KGV/H)= 349817.  
 11-Consumo de vapor para ger. de potencia (KGV/H)= 411531.  
 12-Relacao de consumo (potencia/fins termicos)(-)= 1,176

\*\*\*\*\*



2	2670.00	.80	320.00	28.00	64.00
3	1250.00	.80	320.00	21.00	64.00
4	1000.00	.80	250.00	14.00	64.00
5	1000.00	.75	250.00	14.00	64.00

## 4-Turbo-bombeamento:

P recalq	P succao	Vazao	T vapor	P vapor
33.9	2.0	213000.0	320.0	28.0

## 5-Secagem e refino do acucar:

1-Peso do acucar secado	(TON/DIA)=	412.82
2-Peso do acucar refinado	(TON/DIA)=	.00

## Uso de vapor de escape:

1-Pressao do vapor de escape	(KGF/CM2)=	1.40
2-Concentracao do caldo misto	(BX)=	13.50
3-Pureza do caldo misto	(%)=	80.00

## 1-Pre-evaporacao:

1-0 caldo p/ alcool e concentrado	=	N
2-Concentracao inicial do mosto na ferm.	(%)=	21.00

## Dados da fabricacao de acucar:

Brix saida	T entrada	T vap.veg.	Rend termico
22.00	95.00	110.00	97.00

## 2-Aquecimento do caldo p/ alcool:

T inicial	T final	Rend termico	Usa vapor vegetal
30.00	30.00	97.00	N

## 3-Destilacao com vapor de escape:

1-Teor de alcool no vinho	(%)=	9.45
2-Consumo de vapor na coluna C	(KGY/L)=	1.50
3-Consumo adicional de vapor	(KGY/L)=	.00

## 4-Desaerador:

desaer	Vol agua	T entr	T sai	Rend ter	T vapor	P vapor
1	200.00	55.00	105.00	97.00	130.00	1.30

## Uso de vapor vegetal:

## 1-Aquecimento do caldo p/ acucar:

1-Temperatura inicial do caldo	(C)=	30.00
2-Temperatura final do caldo	(C)=	105.00
3-Rendimento termico	(%)=	97.00
4-Este aquecim. usa vapor de escape=		S

## 2-Evaporacao:

Brix caldo	Brix xarope	No.efeitos	Rend termico	Tanques flash
22.00	60.00	5.0	97.00	S

## 3-Cozimento:

1-No. de massas no cozimento	(-)=	2.0
2-Concentracao media da massa	(%)=	93.00

## 4-Destilacao com vapor vegetal:

1-Cons.especific.de vapor(colunas A,B)	(KGY/L)=	1.70
2-Fracao do alcool total produzido	(%)=	100.00
3-Consumo adicional de vapor	(KGY/L)=	.00

## Fechamento da demanda de vapor:

1-Consumo de vapor vivo nao computado	(KGY/H)=	.00
---------------------------------------	----------	-----

consumo de vapor de escape n.comput(KGV/H)= .00  
 consumo de vapor vegetal nao comput(KGV/H)= .00  
 isolamento termico esta em bom estado = S

## RESULTADOS -

### A-Analise do fluxo de materiais:

#### 1-Balanco de acucares

-Fracao do acucar na fabricacao que sai como mel= .288  
 -Fracao do caldo desviado para a fabricacao = .620

#### 2-Rendimento industrial

1-Rend.industrial referido ao acucar equivalente = .816  
 2-Rend.industrial funcao de eficiencias setoriais= .837

### B-Geracao de vapor:

#### 1-Bagaco (producao e caracteristicas)

1-Producao de bagaco (in natura) (TON/H)= 77.7  
 2-Producao de bagaco (50% umidade) (TON/H)= 77.7  
 3-Teores medios no bagaco queimado:  
 Umidade (%)= 49.970  
 Sacarose (%)= 2.550  
 Cinzas (%)= 2.000

#### 2-Analise das caldeiras

caldeira	rendimento termico	produtiv.de vapor
1	.768	2.326
2	.758	2.319
3	.792	2.286
4	.706	2.201
5	.710	2.168
6	.781	2.337
7	.744	2.332
8	.692	1.983

1-Rendimento termico ponderado (%)= .750  
 2-Produtividade media ponderada (KGV/KGB)= 2.255  
 3-Producao maxima especifica de vapor (KGV/TC)= 633.73

### C-Consumo de vapor vivo:

#### 1-Preparo e moagem da cana

ndem	pot.picador	pot.desfibr.	pot.preparo	cons.vap.preparo	
1	660.52	1188.45	1848.97	21950.84	
1-Consumo total de vapor no preparo				(KGV/H)= 21950.8	
2-Producao de escape total no preparo				(KGV/H)= 21950.8	
ndem	pot.moenda	con.vap.moenda	c.e.prep	c.e.moen.	c.e.tandem
1	6615.2	93598.3	6.690	23.935	30.625
3-Consumo total de vapor na moagem				(KGV/H)= 93598.3	
4-Producao total de escape na moagem				(KGV/H)= 93598.3	
5-Coef.medio de potencia (prep.e moagem)				(CV/TCH)=30.6249	

#### 2-Geracao de energia eletrica

turbogerador	cons.espec.vapor	titulo saida
1	6.80	1.0000
2	8.45	1.0000
3	9.23	1.0000
4	12.05	.9935
5	12.05	.9935
1-Consumo espec.medio na turbogeneracao		(KGV/CV)= 8.417

2-Titulo medio na saida das turbinas	(-)=	.9988
3-Potencia mec.total nos turbogeradores	(CV)=	4958.7
4-Pot.mec.total (hipotese de geracao total)	(CV)=	6357.3
5-Consumo de vapor nos turbogeradores	(KGV/H)=	41736.2
6-Cons.de vapor nos turbog.(geracao total)	(KGV/H)=	53508.0
7-Producao de vapor de escape	(KGV/H)=	41684.7

### 3-Turbobombeamento

1-Consumo de potencia nas turbobombas	(CV)=	486.2
2-Consumo especifico de vapor	(KGV/CV)=	11.3
3-Titulo de saida das turbobombas	(-)=	1.0000
4-Consumo total de vapor no turbobomb.	(KGV/H)=	5480.0
5-Producao de vapor de escape	(KGV/H)=	5480.0

### 4-Secagem e refino do acucar

1-Consumo de vapor na secagem	(KGV/H)=	430.0
2-Consumo de vapor no refino	(KGV/H)=	.0

### D-Consumo de vapor vegetal :

#### 1-Producao de caldo

1-Producao total de caldo misto	(KG/H)=	329189.1
2-Producao de caldo, referida a cana	(KG/TC)=	1191.1
3-Caldo enviado p/fabricacao de acucar	(KG/H)=	204050.6

#### 2-Sangrias de vapor vegetal

1-Aquecimento do caldo para acucar	(KGV/H)=	.0
2-Aquec.do caldo para acucar, refer.a cana	(KGV/TC)=	.0
3-Cozimento (Tachos a vacuo)	(KGV/H)=	24757.6
4-Cozimento, referido a cana	(KGV/TC)=	144.5
5-Destilaria com vapor vegetal	(KGV/H)=	20368.1
6-Sangria total de vapor vegetal	(KGV/H)=	45125.8

#### 3-Evaporacao

1-Consumo de vapor vegetal no mult. efeito	(KGV/H)=	22602.7
2-Cons. de vap.vegetal, referido a cana	(KGV/TC)=	131.9

#### 4-Balanco de vapor vegetal

1-Producao maxima de vapor vegetal	(KGV/H)=	78837.7
2-Consumo efetivo de vapor vegetal	(KGV/H)=	67728.5
3-Disponib.para sangrias de vapor vegetal	(KGV/H)=	11109.3

### E-Consumo de vapor de escape :

#### 1-Aquecimento do caldo para alcool

1-Consumo de vapor para aquecimento	(KGV/H)=	.0
2-Consumo de vapor, referido a cana	(KGV/TC)=	.0

#### 1A-Aquecimento do caldo para acucar

1-Consumo de vapor para aquecimento	(KGV/H)=	33437.7
2-Consumo de vapor, referido a cana	(KGV/TC)=	195.2

#### 2-Pre-evaporacao

1-Consumo no pre-evaporador, para acucar	(KGV/H)=	73206.6
2-Consumo no pre-evaporador, refer.a cana	(KGV/TC)=	427.3

#### 3-Destilaria

1-Consumo de vapor de escape p/ a.anidro	(KGV/H)=	.0
2-Consumo de vapor de escape p/ a.hidrat.	(KGV/H)=	31762.3
3-Cons.total de vapor de escape na destil.	(KGV/H)=	31762.3

## 4-Desaerador

- 1-Consumo de vapor de escape no desaerador(KGV/H)= 18890.9  
 2-Consumo no desaerador, referido a cana (KGV/TC)= 68.4

## 5-Consumo total de vapor de escape

- 1-Consumo total de vapor de escape (KGV/H)=160723.9  
 2-Consumo de vapor de escape, refer. a cana(KGV/TC)= 581.5

.....  
 Balanco de vapor;  
 -----

VAPOR DE ESCAPE (KGV/H)= -1224.5  
 VAPOR VIVO (KGV/H)= 5799.2  
 .....

## F-Indices operacionais:

- 1-Fator de utilizacao das caldeiras (-)= .7096  
 2-Fator de utilizacao dos turbogeradores (-)= .4356  
 3-Alcool produzido, em relacao a cana (L/TC)= 40.532  
 4-Acucar produzido, em relacao a cana (KG/TC)= 55.119  
 5-Relacao alcool/acucar (L/KG)= .7354  
 6-Excesso de bagaco (KGB/H)= 2571.4  
 7-Excesso de bagaco, em rel.ao bagaco total (%)= 3.3110  
 Considerando o sobreconsumo devido as paradas:  
 8-Excesso de bagaco (KGB/H)= 2314.3  
 9-Excesso de bagaco, em rel.ao bagaco total (%)= 2.9799

## Analise para co-geracao:

- 10-Consumo de vapor para fins termicos (KGV/H)= 161154.  
 11-Consumo de vapor para ger.de potencia (KGV/H)= 162765.  
 12-Relacao de consumo (potencia/fins termicos)(-)= 1.010

\*\*\*\*\*

APÊNDICE 5 - RESULTADOS DA AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DAS ALTERNATIVAS DE ELEVAÇÃO DA PRESSÃO EM SISTEMAS DE CO-GERAÇÃO

As tabelas A-24 e A-27 apresentam os resultados obtidos em quatro configurações de dados, mostrados na tabela A-23, e aplicados nos casos A e B, discutidos no capítulo 5.

Tabela A-23 - Situações avaliadas para os casos A e B

Parâmetro	situação 1	situação 2	situação 3	situação 4
Pressão nas turbinas (Kgf/cm <sup>2</sup> )				
- turbogerador	42	42	60	60
- uso geral	16	21	16	21
Temperatura nas turbinas (C)				
- turbogerador	400	400	450	450
- uso geral	280	300	280	300

Outras hipóteses são: consumo de energia elétrica, 12,5 Kwh/TC; consumo de energia mecânica, 20 CVh/TC; eficiência dos turbogeradores, 68%; eficiência das turbinas de uso geral, 47%, e pressão de escape, 1,5 Kgf/cm<sup>2</sup>.

O excedente apresentado na tabela representa a diferença entre a disponibilidade de vapor de escape e a demanda no processo. Quando positivo indica operação folgada, capaz de atender às variações de carga, significando também que vapor de escape é perdido para a atmosfera. Quando negativo indica a necessidade de expansão de vapor vivo pelo "by-pass", situação em que a demanda de processo é dominante sobre a demanda para fins de geração de potência.

A evaporação total necessária nas caldeiras é dada, no caso A, pela soma dos consumos de vapor vivo de alta e de média pressão, sempre que a demanda de processo não for dominante sobre a disponibilidade de escape. No caso B, a evaporação total é dada pela soma da produção requerida de vapor vivo alta pressão e o consumo efetivo de vapor de MP, dado na penúltima coluna das tabelas, ressalvada a condição de balanceamento, como no caso anterior.

Tabela A-24 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 1

## CASO A

Coeficiente BETA de co-geração		=	10502	
Consumo de vapor vivo média pressão (Kgv/TC)		=	309,653	
Consumo de vapor vivo alta pressão (Kgv/TC)		=	118,125	
Consumo de processo (Kgv/TC)	Excedente (Kgv/TC)	Consumo total de vapor MP (Kgv/TC)	ALFA	
400.000	27.778	309.653	0,11231	
425.000	2.778	309.653	0,10571	
450.000	-22.222	331.875	0,09984	
475.000	-47.222	356.875	0,09458	
500.000	-72.222	381.875	0,08985	
525.000	-97.222	406.875	0,08557	
550.000	-122.222	431.875	0,08168	
575.000	-147.222	456.875	0,07813	
600.000	-172.222	481.875	0,07488	

## CASO B

Coeficiente BETA de co-geração		=	14508	
Consumo de vapor vivo média pressão (Kgv/TC)		=	309,653	
Consumo de vapor vivo alta pressão (Kgv/TC)		=	299,759	
Consumo de processo (Kgv/TC)	Excedente (Kgv/TC)	Consumo total de vapor MG (Kgv/TC)	ALFA	
400.000	209.412	9.894	0,11231	
425.000	184.412	9.894	0,10571	
450.000	159.412	9.894	0,09984	
475.000	134.412	9.894	0,09458	
500.000	109.412	9.894	0,08985	
525.000	84.412	9.894	0,08557	
550.000	59.412	9.894	0,08168	
575.000	34.412	9.894	0,07813	
600.000	9.412	9.894	0,07488	

Tabela A-25 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 2

## CASO A

Coeficiente BETA de co-geração		=	11539	
Consumo de vapor vivo média pressão		(Kgv/TC) =	271.201	
Consumo de vapor vivo alta pressão		(Kgv/TC) =	118.125	
Consumo de processo	Excedente	Consumo total de vapor MP		ALFA
(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	(Kgv/TC)		
400.000	-10.674	281.875		0,1123
425.000	-35.674	306.875		0,1057
450.000	-60.674	331.875		0,09984
475.000	-85.674	356.875		0,0945
500.000	-110.674	381.875		0,08985
525.000	-135.674	406.875		0,08557
550.000	-160.674	431.875		0,08168
575.000	-185.674	456.875		0,07813
600.000	-210.674	481.875		0,07488

## CASO B

Coeficiente BETA de co-geração		=	11139	
Consumo de vapor vivo média pressão		(Kgv/TC) =	271.201	
Consumo de vapor vivo alta pressão		(Kgv/TC) =	403.314	
Consumo de processo	Excedente	Consumo total de vapor MP		ALFA
(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	(Kgv/TC)		
400.000	274.514	-132.113		0,11231
425.000	249.514	-132.113		0,10571
450.000	224.514	-132.113		0,09984
475.000	199.514	-132.113		0,09458
500.000	174.514	-132.113		0,08985
525.000	149.514	-132.113		0,08557
550.000	124.514	-132.113		0,08168
575.000	99.514	-132.113		0,07813
600.000	74.514	-132.113		0,07488

Tabela A-26 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 3

## CASO A

Coeficiente BETA de co-geração		=	10920	
Consumo de vapor vivo média pressão		(Kgv/TC) =	309.653	
Consumo de vapor vivo alta pressão		(Kgv/TC) =	101.769	
Consumo de processo (Kgv/TC)	Excedente (Kgv/TC)	Consumo total de vapor MP (Kgv/TC)		ALFA
400.000	11.422	309.653		0,11231
425.000	-13.578	323.231		0,10571
450.000	-38.578	348.231		0,09984
475.000	-63.578	373.231		0,09458
500.000	-88.578	398.231		0,08985
525.000	-113.578	423.231		0,08567
550.000	-138.578	448.231		0,08168
575.000	-163.578	473.231		0,07813
600.000	-188.578	498.231		0,07488

## CASO B

Coeficiente BETA de co-geração		=	14508	
Consumo de vapor vivo média pressão		(Kgv/TC) =	309.653	
Consumo de vapor vivo alta pressão		(Kgv/TC) =	210.542	
Consumo de processo (Kgv/TC)	Excedente (Kgv/TC)	Consumo total de vapor MP (Kgv/TC)		ALFA
400.000	120.195	99.111		0,11231
425.000	95.195	99.111		0,10571
450.000	70.195	99.111		0,09984
475.000	45.195	99.111		0,09458
500.000	20.195	99.111		0,08985
525.000	-4.805	103.916		0,08557
550.000	-29.805	128.916		0,08168
575.000	-54.805	153.916		0,07813
600.000	-79.805	178.916		0,07488

Tabela A-27 - Avaliação das alternativas caso A e caso B, para a situação 4

Pressão nas turbinas de uso geral	(Kgf/cm <sup>2</sup> ) = 21.00
Temper. nas turbinas de uso geral	(C) = 300.00
Pressão nos turbogeradores	(Kgf/cm <sup>2</sup> ) = 60.00
Temperatura nos turbogeradores	(C) = 450.00
Potência elétrica específica	(Kwh/TC) = 12.50
Potência mecânica específica	(CVh/TC) = 20.00

CASO A

Coeficiente BETA de co-geração	= 12045		
Consumo de vapor vivo média pressão	(Kgv/TC) = 271.201		
Consumo de vapor vivo alta pressão	(Kgv/TC) = 101.769		
Consumo de processo	Excedente	Consumo total de vapor MP	ALFA
(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	
400.000	-27.031	298.231	0,11231
425.000	-52.031	323.231	0,10374
450.000	-77.031	348.231	0,09984
475.000	-102.031	373.231	0,09458
500.000	-127.031	398.231	0,08985
525.000	-152.031	423.231	0,08557
550.000	-177.031	448.231	0,08162
575.000	-202.031	473.231	0,07813
600.000	-227.031	498.231	0,07408

CASO B

Coeficiente BETA de co-geração	= 16566		
Consumo de vapor vivo média pressão	(Kgv/TC) = 271.201		
Consumo de vapor vivo alta pressão	(Kgv/TC) = 256.270		
Consumo de processo	Excedente	Consumo total de vapor MP	ALFA
(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	(Kgv/TC)	
400.000	127,471	14.931	0,11231
425.000	102.471	14.931	0,10571
450.000	77.471	14.931	0,09984
475.000	52.471	14.931	0,09458
500.000	27.471	14.931	0,08985
525.000	2.471	14.931	0,08557
550.000	-22.529	37.460	0,08168
575.000	-47.529	62.460	0,07813
600.000	-72.529	87.460	0,07483

## APÊNDICE 6 - ELEMENTOS BÁSICOS DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

### 6.1 - O Princípio de Bellman

O coração da PD é o princípio da otimalidade de Bellman. É este princípio que torna possível elaborar um procedimento computacional compatível com os recursos de memória disponíveis, sem perder as vantagens de uma solução que analisa todas as possibilidades factíveis.

O princípio da otimalidade pode ser enunciado da seguinte maneira:

"Dado uma trajetória ótima de A até C, a parte da trajetória de qualquer ponto B intermediário até C, também é uma trajetória ótima entre B e C."

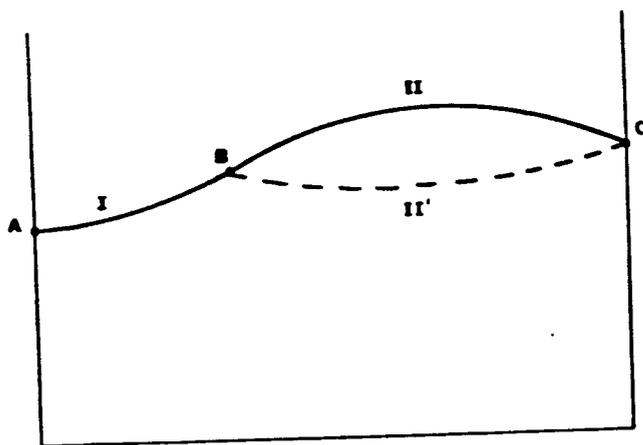


Figura A-3 - Princípio de Bellman

Na figura A-3, se o percurso I-II é o percurso ótimo entre A e C, de acordo com o princípio da otimalidade, o percurso II é o ótimo entre B e C. A prova por contradição é imediata: se existe outro caminho ótimo entre B e C, digamos o percurso II', implica em afirmar que o caminho I-II' é melhor que o ótimo inicial, o que contradiz a proposição inicial. Uma prova mais rigorosa é fornecida por Bellman e Dreyfus [37].

## 6.2 - A Formulação do Problema

Os elementos essenciais na formulação do problema são as equações do sistema, que descrevem o processo, o critério de performance, usado para avaliar a solução, e as restrições, que impõem limites à solução e às equações do sistema.

As equações do sistema são um conjunto de relações entre três tipos de variáveis: variáveis de estágio que determinam a ordem em que os eventos ocorrem (usualmente o tempo); variáveis de estado, que descrevem completamente o sistema, e variáveis de controle ou decisão, que influenciam o processo, alternando as variáveis de estado. Em termos algébricos [38]:

variável de estágio -  $k = 1, 2, 3, \dots, k$   
 variáveis de estado -  $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$   
 variáveis de controle -  $u = u_1, u_2, u_3, \dots, u_m$

Assim, as equações de estado podem ser expressas como a seguir:

$$\begin{aligned} x_1(k+1) &= g_1(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k), u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k), k) \\ x_2(k+1) &= g_2(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k), u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k), k) \\ &\dots\dots\dots \\ x_n(k+1) &= g_n(x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k), u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k), k) \end{aligned}$$

e em termos vetoriais:

$$\bar{x}(k+1) = \bar{g}(\bar{x}(k), \bar{u}(k), k)$$

O critério de performance avalia uma dada sequência de controle  $\bar{U}(1), \bar{U}(2), \dots, \bar{U}(k)$ , seja sob o objetivo de maximizar ou minimizar a função. Denotando o critério por J:

$$J = \sum_{k=0}^k \ell(\bar{x}(k), \bar{u}(k), k)$$

As restrições também podem ser expressas matematicamente:

$$\bar{x} \in X(k)$$

$$\bar{u} \in U(k)$$

onde  $X$  e  $U$  são os conjuntos de valores factíveis respectivamente para as variáveis de estado e de controle.

### 6.3 - Derivação da Equação Recursiva

Quando o princípio da otimalidade é aplicado a um sistema, pode-se obter um procedimento iterativo para chegar-se à solução ótima. A relação iterativa básica é chamada de equação recursiva. Esta equação será formalmente desenvolvida a seguir, para o caso em que se deseja minimizar um custo. No caso contrário, em que se quer maximizar um lucro, a analogia é imediata.

Inicialmente define-se a função de custo mínimo, que expressa o mínimo custo que resulta da aplicação do controle possível a partir do restante de um processo iniciando em qualquer estado admissível  $x$ ,  $x \in X$ , e qualquer estágio  $0 < k < K$ .

$$I(\bar{x}, k) = \underset{\substack{u(j) \in U \\ j=k, \dots, K}}{\text{Min}} \left\{ \sum_{j=k}^K \ell[\bar{x}(j), \bar{u}(j), j] \right\}$$

A primeira etapa é separar o termo do somatório em duas partes:

$$I(\bar{x}, k) = \underset{u(k) \in U}{\text{Min}} \underset{\substack{u(j) \in U \\ j=k+1, \dots, K}}{\text{Min}} \left\{ \ell(\bar{x}(k), \bar{u}(k), k) + \sum_{j=k+1}^K \ell(\bar{x}(j), \bar{u}(j), j) \right\}$$

Observe-se que o primeiro termo da expressão a ser minimizada depende apenas de  $\bar{u}(k)$ , logo não fazendo efeito a minimização ao longo de  $(k+1)$  até  $K$ ,

$$\underset{u(k) \in U}{\text{Min}} \underset{\substack{u(j) \in U \\ j=k+1, \dots, K}}{\text{Min}} \left\{ \ell(\bar{x}(k), \bar{u}(k), k) \right\} = \underset{u(k) \in U}{\text{Min}} \left\{ \ell(\bar{x}(k), \bar{u}(k), K) \right\}$$

O segundo termo não depende explicitamente de  $\bar{u}(k)$ , entretanto como foi definido nas equações de estado,

$$\bar{x}(k+1) = \bar{g}(\bar{x}, \bar{u}(k), k)$$

Usando esta última relação e a função de custo mínimo, a equação funcional recursiva do princípio da otimalidade pode ser escrita:

$$I(x,k) = \underset{u \in U}{\text{Min}} \{l[\bar{x}, \bar{u}, k] + I\{g(x, u, k), k+1\}\}$$

Portanto, o mínimo custo no estado  $\bar{x}$  e estágio  $k$  é resultado da minimização da soma do custo no estágio presente  $k$  e o custo mínimo até o fim do processo decisório, a partir do estágio  $(k+1)$  [38].

## APÊNDICE 7 - ENERGIA MÍNIMA PARA A FABRICAÇÃO DE ÁLCOOL

### 7.1 - Introdução

A determinação do "mínimo minimorum" consumo energético na produção de álcool, embora possa parecer uma análise puramente teórica, apresenta considerável interesse, em especial no desenvolvimento tecnológico dos processos reais de fabricação. Este parâmetro tem diversas aplicações práticas, seja como valor limitante ou valor "alvo" para os estudos de racionalização e conservação de energia, ou como referência fixa na análise comparativa dos processos disponíveis, novos e convencionais. Como exemplo, um estudo do SERI [39] afirma ser possível reduzir o consumo de energia na fase de separação do álcool da mistura etanol-água, dos atuais 1500 Kcal por litro de álcool, empregando-se colunas de destilação, para valores tão baixos quanto 150 Kcal por litro de álcool, se vierem a ser operacionalizados nos processos de separação como extração por solventes, membranas ou adsorção seletiva.

Na análise do consumo energético mínimo teórico para a produção de álcool admitiu-se como premissa inicial, que esteja disponível para a fabricação o caldo de cana ou uma solução aquosa de mel residual da usina de açúcar, constituídos essencialmente de uma solução de sacarose 15° Brix ou 15% em peso. Desta maneira são excluídas todas as operações de recepção e moagem da cana e o tratamento do caldo.

Nos cálculos realizados a seguir, as propriedades foram obtidas de Stull [40] e constam da Tabela A.28 abaixo.

Tabela A-28 - Propriedades termodinâmicas para determinação da energia mínima de fabricação de álcool

substância	fórmula	peso molec.	$\bar{H}_{of}$ ( $\frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$ )	$\bar{G}_{of}$ ( $\frac{\text{Kcal}}{\text{mol}}$ )	$\bar{S}_{298}$ $\frac{\text{Kcal}}{\text{mol K}}$
gás carbônico	CO <sub>2</sub>	44.010	94.05	-94.26	51.07
etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46.068	-66.20	-41.62	38.40
glucose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	180.156	-304.6	-217.62	50.70
frutose	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	180.156	-303.5	-	-
sacarose	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	342.296	-531.1	-369.18	86.10

## 7.2 - Análise

O processo de fabricação do álcool aqui considerado envolve basicamente duas etapas distintas:

- fermentação - a solução açucarada transforma-se em uma solução etanol-água;
- destilação - é feita a separação do álcool da solução.

A seguir se discute separadamente cada etapa.

### 7.2.A - Fermentação

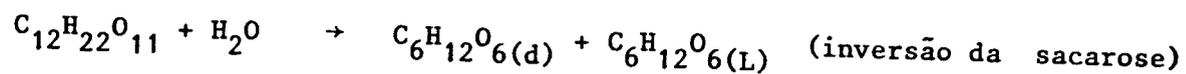
O processo que tradicionalmente transforma o açúcar do caldo em álcool é a fermentação, realizada por levedos do tipo *Saccharomyces*. Contudo, é possível analisar-se termodinamicamente tal processo biológico, abstraindo suas perdas, devidas ao consumo de energia no crescimento da levedura e ao caráter levemente exotérmico da fermentação. Cabe aqui uma observação: os primeiros estudos sobre o rendimento fermentativo, conduzidos por Pasteur, concluíram ser impossível converter mais que 95% do açúcar do substrato em álcool, dado ao consumo energético do crescimento da levedura. Entretanto, com o processo Melle-Boinot, de recirculação do levedo, em princípio é possível superar o limite de Pasteur. Isso vem exemplificar o potencial de aperfeiçoamento na fermentação.

A análise termodinâmica da fermentação implica em se determinar a variação de energia livre antes e depois do processo, ou seja, qual a energia livre da solução de açúcar e qual a energia livre da mistura etanol-água, respectivamente. Na transformação de açúcar em álcool ocorrem dezenas de reações químicas acopladas, aqui resumidas na hidrólise enzimática da sacarose, efetuada pela invertase, com a produção de glucose e frutose, seguida da conversão destes açúcares em etanol, conforme exemplifica a figura .



Figura A-4 - Etapas fundamentais da fermentação da sacarose

Em termos de reação química, tem-se:



O nome "inversão da sacarose" para a primeira das reações acima deve-se à mudança da rotação específica da luz polarizada, medida em um polarímetro, de  $+66^\circ$  para a sacarose, para  $-20^\circ$  da mistura equimolar de glucose e frutose, resultantes da hidrólise enzimática. A segunda reação, de fermentação, inclui diversas sub-reações, cujos principais reagentes intermediários são o ácido pirúvico e o acetaldeído. De posse das reações acima, pode-se mostrar que:

$$\Delta G \text{ hidrólise da sacarose} = -9,36 \text{ Kcal/mol sacarose}$$

$$\Delta G \text{ açúcares simples} \rightarrow \text{etanol} = -54,14 \text{ Kcal/mol glucose}$$

logo, pode-se concluir que:

$$\Delta G \text{ sacarose} \rightarrow \text{etanol} = -58,82 \text{ Kcal/mol sacarose ferment.}$$

Observe-se que não se considerou o fato das reações se darem em solução, já que praticamente não ocorre dissociação nos produtos.

Da variação de energia livre na fermentação pode-se tirar duas interessantes conclusões: primeiro a tendência de ocorrer tal reação e depois o balanço energético resultante. Ao se aplicar a expressão básica do equilíbrio químico.

$$\Delta G = -R.T. \ln K$$

tem-se que:

$$K = \exp\left(-\frac{\Delta G}{R.T.}\right) = \exp\left(\frac{+58.820}{1,986.298}\right)$$

$$K = 1,456 \times 10^{43} \quad (\text{constante de equilíbrio})$$

Portanto, a fermentação da sacarose tem grande tendência a ocorrer, de forma quase completa. Em outros termos, existe um grande

potencial químico para a transformação em etanol, necessitando somente de um efeito catalítico, que no caso mais comum é fornecido biologicamente pela levedura.

Da estequiometria das reações da fermentação, tem-se que 100g de sacarose podem produzir, com 100% de conversão açúcares-álcool, até 53,8g de etanol, o que corresponde ao chamado rendimento Gay-Lussac [41]. Como, da análise anterior, concluiu-se que existe disponível 29,41 Kcal/mol de etanol produzido, tem-se que, em condições ideais, pode-se obter 638 cal/g de etanol, na fermentação. Tal vantagem energética seria obtida em uma hipotética célula de combustível, que empregasse sacarose na alimentação e rejeitasse etanol e gás carbônico como resíduos. Nesta situação teórica, uma destilaria de 120.000 l/dia teria, na fermentação, uma disponibilidade de 2.965 Kwh por 5.000l de álcool, ou seja, aproximadamente 3 MW.

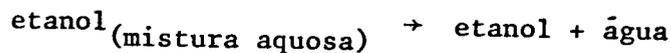
É importante que se façam algumas considerações sobre os resultados até aqui conseguidos. Ainda que existam, com boa fundamentação teórica, diversas rotas químicas para se chegar ao etanol a partir da sacarose, seja em células de combustível ou em reatores com catálise complexa, não resta dúvida que o caminho biológico é o único operacionalmente viável e mesmo de grande eficiência. Considerando-se a variação de entalpia de formação, tem-se que a fermentação gasta apenas 8% da energia solar armazenada no açúcar para convertê-lo em álcool [42].

Contudo, a aplicação da Termodinâmica a um fermentador possui implicações adicionais. Segundo a formalização Termodinâmica clássica, os processos são uma sucessão de estados de equilíbrio, o que supõe sistemas fechados. Ao isolar-se um sistema vivo, no caso a levedura, privando seu intercâmbio de matéria e energia com o meio exterior, teríamos o estado de equilíbrio, que é sinônimo da morte biológica. É preciso, portanto, uma termodinâmica que considere o não-equilíbrio, para sistemas abertos ou vivos. Os trabalhos de Prigogine [43] fornecem o ponto de partida: um sistema biológico evolui até estados estacionários, e com a mínima produção de entropia. Conclui-se que a análise efetuada é aplicável à fermentação se corretamente admitirmos que a solução açucarada e a mistura água-etanol são situações de equilíbrio e ademais, se considerarmos desprezível a geração de entropia pela levedura.

### 7.2.B - Destilação

O produto resultante da fermentação alcoólica, a mistura água e etanol, deve passar por um processo de separação, com o objetivo de aumentar a concentração de álcool e facilitar assim sua aplicação como combustível. A destilação contínua em colunas de pratos é o método tradicionalmente empregado nas condições de hoje, no Brasil.

A determinação do mínimo consumo energético para a separação, até álcool anidro, a partir da solução aquosa de etanol, envolve o mesmo raciocínio termodinâmico aplicado à fermentação, ou seja, determinar para a reação;



a variação de energia livre de Gibbs, associada à disponibilidade de termoquímica em jogo. Da definição da energia livre,

$$\Delta G_{\text{mis}} = \Delta H_{\text{mis}} - T\Delta S_{\text{mis}}$$

o primeiro termo,  $H$ , corresponde ao calor de mistura, que vale para água e etanol, em dissolução infinita (caso bem próximo do mosto fermentado em usinas reais), 10,63 KJ/mol de soluto, ou seja, -44,13 Kcal/l de etanol produzido [44]. Este calor deve-se à exotermia da dissolução do etanol na água, uma mistura molecular sem a dissociação iônica mas com a formação de pontes de hidrogênio, devido ao seu caráter anfiprótico [45], com uma constante dielétrica menor que 30.

O segundo termo,  $T\Delta S_{\text{mis}}$ , corresponde à irreversibilidade energética inerente à mistura, podendo ser avaliada a partir da termodinâmica das soluções. Assim, seja uma mistura de dois gases ideais, A e B, cujos volumes iniciais sejam respectivamente  $V_A$  e  $V_B$  e o volume final  $V_A+V_B$ . Admitindo que a temperatura e a pressão possam ser consideradas constantes, o aumento de entropia na mistura é dado por:

$$\Delta S_{\text{mis}} = -R[n_A \ln X_A + n_B \ln X_B]$$

onde:  $R$  - constante dos gases  
 $n_A, n_B$  - números de moles de A e B  
 $X_A, X_B$  - frações molares de A e B

como  $X_A$  e  $X_B$  são menores que 1, tem-se sempre  $\Delta S_{\text{mis}} > 0$ , portanto a mistura é um processo espontâneo. Observe-se que nesta análise não se considerou a contração de volume que ocorre na mistura, da ordem de 4% para proporções volumétricas idênticas, álcool e água.

Com as relações:

$$N = n_A + n_B$$

$$n_A = X_A N$$

$$n_B = X_B N$$

onde  $N$  é o número de moles total na mistura, tem-se:

$$\Delta S_{\text{mis}} = -NR [X_A \ln X_A + (1-X_A) \ln(1-X_A)]$$

Conclui-se que a maior geração de entropia se dá em condições equimolares, sendo que em uma mistura água-álcool como no mosto, a geração entrópica será bem menor. Partindo-se de 1000 Kg de uma solução açucarada 15° Brix e admitindo-se 100% de eficiência na fermentação, teríamos 80,7 Kg de etanol, resultando numa fração molar de 0,358, logo:

$$\Delta S = -48,97 \cdot 1,986 \cdot [0,0358(\ln 0,0358) + 0,9642(\ln 0,9642)]$$

$$\Delta S = 14,966 \text{ cal/k}$$

para uma temperatura de 20C ou 393K,

$$T\Delta S = 4,396 \text{ Kcal}$$

Observe-se que o valor máximo de  $T\Delta S$ , para mistura equimolar, seria de 19,47 Kcal. Como o valor se refere a 80,7ℓ de álcool,

$$T\Delta S = 0,0545 \text{ Kcal/ℓ}$$

e finalmente,

$$\Delta G = -44,13 - 0,0545$$

$$\Delta G = -44,185 \text{ Kcal/l}$$

Esta é a variação de disponibilidade termoquímica na mistura, sendo portanto a mínima energia que deve ser fornecida à mistura etanol-água para a separação de seus componentes, empregando-se um método isotérmico e reversível. Este resultado está em acordo com outros autores, em estudos semelhantes, segundo os quais a energia de separação na destilação é algumas dezenas de vezes maior que a mínima energia teórica [46].

### 7.3 - Comentários

De posse dos resultados até aqui obtidos, pode-se concluir que, na fabricação do álcool há a geração de um excedente energético da ordem de:

excedente energético na fermentação	+ 510,00 Kcal/l
consumo energético na destilação	<u>- 44,19 Kcal/l</u>
total	+ 465,81 Kcal/l

Trata-se de um grande excedente, em uma usina de 120.000 l/dia, aproximadamente 2.700 Kw, obtidos todavia em condições bastante idealizadas.

Adotando uma postura mais realista, segundo a qual não seria possível resgatar a disponibilidade energética na fermentação, teríamos apenas o consumo na destilação, que corresponderia a 1/24 do consumo energético em instalações convencionais típicas [47] e em torno de um terço do consumo de energia dos novos processos de separação [39].

É interessante tentar localizar as maiores irreversibilidades da situação atual. Todavia, o alto consumo energético reflete não somente o dispêndio de energia na fabricação, como também as perdas e ineficiências de conversão nas diversas etapas. Exemplificando, pouca vantagem traz uma destilaria otimi

zada quanto à energia, se as perdas de álcool na fermentação forem muito grandes. Assim, tais perdas devem ser minimizadas visando melhorar o rendimento energético.

É praticamente impossível se atingir 100% de eficiência na conversão dos açúcares em etanol. Mesmo porque, conforme Almeida Lima et alli [48], uma fração ponderável dos açúcares não são fermentescíveis. Neste aspecto, os trabalhos de Cackett e Rampf [49], conduzidos em duas safras e com grande amostragem, na África do Sul, mostraram que há uma relação linear entre o total de açúcares fermentáveis e o Brix do caldo. Esta relação mostrou-se pouco sensível às condições climáticas. Outro fator importante na eficiência fermentativa é o consumo de açúcar na formação das células da levedura, que fica entre 2 e 12% [50].

Associando-se todos os fatores que reduzem a eficiência na fermentação, tais como as perdas por evaporação e arrasto de álcool no  $\text{CO}_2$ , as reações de oxidação e esterificação, o consumo de açúcar e álcool por microorganismos contaminantes (fermentações láctica, butírica e acética), o crescimento e consumo energético da levedura, tem-se valores de 80 a 90%. Resultados da Copersucar mostram que a despeito da aplicação de maiores taxas de levedura, o rendimento fermentativo tem se estabilizado nos últimos anos em torno de um valor médio de 85,5% [51], e outros resultados apresentam 90,5% como valor máximo em algumas usinas [52].

Outras grandes perdas ocorrem na extração, e segundo estimativas são ao redor de 2% nas águas de lavagem, 8 a 4% na extração (moenda), 0,5% na torta de filtro e 2% por razões indeterminadas [53].

As perdas propriamente energéticas se dão pelo consumo no bombeamento, pasteurização do caldo e acentuadamente nas colunas de destilação. Segundo Rasowsky [54], a fermentação gasta 240 Kcal/l de álcool, mais 2.750 Kcal/l na destilação, onde a coluna de destilação consome um pouco mais de vapor que a coluna de retificação. Convém lembrar que a questão de reduzir o vinhoto e diminuir a emissão de poluentes pelas usinas é necessariamente um fator adicional de consumo de energia [55].

## APÊNDICE 8 - ANÁLISE TÉRMICA DA SECAGEM DO BAGAÇO DE CANA

A seguir se desenvolvem alguns cálculos para a determinação de índices de interesse na secagem do bagaço.

### 8.1 - Calor Teórico para a Secagem do Bagaço

Considerando o calor específico do bagaço seco como 0,42 Kcal/Kg C, evaporação na pressão atmosférica e mesma temperatura de saída, 100C, para o bagaço seco, e os gases, tem-se:

$$Q_{ST} = (0,42+0,58UI)(100-TE) + \left(\frac{UI-UF}{1-UF}\right).539 \text{ [Kcal/Kg]}$$

onde: UI - umidade inicial do bagaço, (-)

UF - umidade final do bagaço, (-)

TE - temperatura de entrada do bagaço no secador admitida igual a 30°C

### 8.2 - Calor Real para Secagem do Bagaço

Os secadores reais possuem eficiência térmica entre 0,6 e 0,7. Adotando-se 0,65, tem-se:

$$Q_s = \frac{Q_{ST}}{0,65} \text{ [Kcal/Kg]}$$

### 8.3 - Gases de Combustão do Bagaço

#### 8.3.A - Composição do Bagaço Seco

A tabela abaixo apresenta valores de ensaios realizados para a composição gravimétrica da fibra seca da cana [15], sem considerar as cinzas.

Tabela A-29- Composição do bagaço

elemento	peso (%)	nº de moles em 100 g
C	49,4	4,12
H	6,3	6,30
O	44,3	2,77

8.3.B - Composição dos Gases de Combustão

Adotando a composição da tabela anterior e incluindo os efeitos do teor de umidade e excesso de ar, tem-se, em (Kg gás/Kg bagaço),

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &- 1,813 (1-U) \\ \text{H}_2\text{O} &- 0,567+0,433 U \\ \text{N}_2 &- 4,530(1-U)(1+\text{EAR}) \\ \text{O}_2 &- 1,379(1-U) \text{EAR} \end{aligned}$$

onde: U - umidade do bagaço queimado, (-)

EAR - excesso de ar,  $\text{EAR} \geq 0$ , (-)

8.4 - Calor Cedido pelos Gases de Combustão do Bagaço

Como se tratam de variações de temperatura relativamente pequenas, adota-se a seguir um valor médio para o calor específico dos gases de combustão. O produto entre a massa de gás produzida na queima e seu calor específico permite calcular o calor cedido por  $\Delta T=1\text{C}$  de variação na temperatura dos gases.

Tabela A-30- Calores específicos médios dos gases de combustão do bagaço

gás	$C_p$ (médio) (Kcal/KgC)
CO <sub>2</sub>	0,1989
H <sub>2</sub> O	0,4740
N <sub>2</sub>	0,2320
O <sub>2</sub>	0,2720

Assim tem-se que:

$$Q_c = 1,680 - 1206U + 1,425EAR + 0,675.U.EAR \quad [\text{Kcal/C}]$$

### 8.5 - Redução de Peso na Secagem

A expressão abaixo apresenta a fração de peso perdido em água quando se seca o bagaço.

$$\psi = 1 - \frac{1-UI}{1-UF} \quad (-)$$

## BIBLIOGRAFIA

1. IFIAS - International Federation of Institutes of Advanced Study "Energy Analysis" - Workshop report nº 6 - Estocolmo - 1974.
2. Boustead, I. e Hancock, G.F. - Handbook of Industrial Energy Analysis - Ellis Horwood Publishers - Chichester - 1979.
3. Macedo, I.C. e Nogueira, L.A.H. - "Balanço de energia na produção de cana de açúcar e álcool nas usinas cooperadas" Boletim Técnico Copersucar - 31/85 - São Paulo - 1985.
4. Pimentel, D. - Handbook of Energy utilization in Agriculture. CRC Press - Boca Raton - 1980.
5. CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. "Consumo de energia na construção civil" - Revista Brasileira de Tecnologia - vol 13(3) - Brasília - 1982.
6. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas - Potencial de Biomassas Vegetais no Estado de São Paulo - São Paulo - 1981.
7. Yeganiantz, D.; Brandini, A. e Kurihara, C. - "Estudo energético da produção de álcool" - Anais do XXI Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural - São Paulo - 1983.
8. Goldemberg, J.; Silva, J.G.; Serra, G.E.; Moreira, J.R. e Gonçalves, J.C. - "Energy Balance for Ethyl Alcohol production from crops", Science, vol 201, 1978.
9. Borzani, W. - "O Pro-Álcool vale?" - entrevista ao "Estado de São Paulo", e publicada na Série Sopral - nº 5 - São Paulo - 1984.
10. Castanho Filho, E.P. e Chaberiberi, D. - Perfil Energético da Agricultura Paulista - Instituto de Economia Agrícola -

São Paulo - 1982.

11. Wang, C.C. - "Energy inventory for TSC's Sugar Cane production" - Taiwan Sugar - vol 28/69 - 1981.
12. Ricaud, R. - Energy input and output for Sugarcane in Louisiana - capítulo incluso na referência [4].
13. Macedo, I.C. - "Considerações sobre a eficiência na produção industrial de açúcar e álcool" - Boletim Técnico Copersucar - 36/87 - São Paulo - 1987.
14. Hugot, E. - Manual da Indústria Açucareira - Ed. Mestre Jou - São Paulo - 1977.
15. Seminário sobre bagaço de cana - Centro Tecnológico Copersucar - Piracicaba - 1983.
16. Padovani Neto, A. e Lorenz, K. - "Características de geração, compra e utilização de energia elétrica nas usinas cooperadas na safra 83/84" - Boletim Técnico Copersucar - 32/85 - São Paulo - 1985.
17. Chenu, P.M.A.M. - "Balanço Térmico e Energético em Usina de Açúcar" - III Seminário Copersucar da Agroindústria Canavieira - Águas de Lindóia - 1980.
18. Zarpelon, F. - "Contribuição ao planejamento energético em usinas de açúcar e destilarias" - I Seminário de Tecnologia de Açúcar e Álcool de Minas Gerais - STAB - Três Pontas - 1980.
19. Polimeros, G. - Energy Cogeneration Handbook - Industrial Press - New York - 1981.
20. Dreyfus, S.E. e Law, A.M. - The Art and the Theory of Dynamic Programming - Academic Press - New York - 1977.
21. Gama, R. - Engenho e Tecnologia - Livraria Duas Cidades - São Paulo - 1983.

22. I Seminário de Tecnologia Industrial - Centro de Tecnologia Copersucar - Piracicaba - 1983.
23. Padovani Neto, A. e Macedo, I.C. - "Eletrificação das moendas nas usinas de açúcar" - Boletim Técnico Copersucar 20/82 - São Paulo - 1982.
24. Ebeling, C. - "Otimização energética de destilarias visando a sobra de bagaço" - Seminário de Avaliação do bagaço da cana de açúcar - São Paulo - 1983.
25. Van Wylen, G. e Sonntag, R. - Fundamentos da Termodinâmica Clássica - Ed. Edgard Blucher - São Paulo - 1976.
26. Eletrobrás/MME - Aproveitamento energético dos resíduos da agroindústria da cana de açúcar - Livros Técnicos e Científicos Editora - Rio de Janeiro - 1983.
27. Cultivo Mínimo - I Seminário de Tecnologia Agronômica - Centro de Tecnologia Copersucar - Piracicaba - 1982.
28. Braunbeck, O. e Figueredo, O. - "Transporte de Cana" - Boletim Técnico Copersucar - 22/83 - São Paulo - 1983.
29. American Society of Agricultural Engineers - Agricultural Engineer's Handbook - St. Joseph - 1976.
30. Silva, J.G.; Serra, G.E.; Moreira, J.R. e Gonçalves, J.C. - "Balanço energético cultural da produção de álcool etílico de cana de açúcar, mandioca e sorgo sacarino - fase agrícola e industrial" - Brasil Açucareiro - Instituto do Açúcar e do Alcool - dezembro de 1976 - Rio de Janeiro - 1976.
31. Macedo, I.C. e Lorenz, K. - "Conversão e Utilização de energia nas Usinas Cooperadas - safra 83/84" - Boletim Técnico Copersucar 33/85 - São Paulo - 1985.
32. Hannon, B. - "Energy and Labor in the Construction Sector" - Science - vol 202 - 1978.

33. Chapman, P.F. - "The energy costs of materials" - Energy Poliey - march - 1975.
34. United Nations - U.N. Statistical Yearbook 1972 - New York - 1973.
35. Gilliland, M.W. - "Energy Analysis and Public Policy" - Science vol 189 - 1975.
36. Chenu, P.M.A.M. - "Potencial de la producción de Energia Eléctrica por Centrales Azucareras" - Sugar y Azucar - febrero de 1980.
37. Bellman, R.E. e Dreyfus, S.E. - Applied Dynamic Programing - Princeton University Press - Princeton - 1962.
38. Larson, R.E. - State Increment Dynamic Programming-Elsevier-Amsterdam - 1968.
39. SERI - Solar Energy Research Institute - Report Nº TR - 231 - 1887 - Colorado - 1983.
40. Stull, D.R. e Sinke, G.C. - Thermodynamic Properties of the Elements - A.C.S. - Washington - 1956.
41. Falcone, M. - "Cálculo do rendimento da fermentação alcoólica" in Curso sobre fermentação alcoólica Vol. II - Instituto Zimotécnico - Piracicaba - s/d.
42. Sama, D.A. - "Biomass to ethanol has merit" - Hydrocarbon Processing - july 1981.
43. Prigogine, I. - Introduction to Thermodynamics of Irreversible Process - John Wiley - New York - 1962.
44. International Critical Tables - McGraw-Hill - New York - 1929.
45. Willianson, A.G. - An Introduction to Non-electrolyte Solutions - University Chemical Texts - John Wiley - New

York - 1967.

46. Le Goff, P. (editor) - Energetique Industrielle - vol I - Technique et Documentation - Paris - 1979.
47. Palacio, H. - Fabricacion del Alcohol - Ed. Salvat - Barcelona - 1956.
48. Almeida Lima, V.; Aquarone, E. e Borzani, W. - Tecnologia das Fermentações - Ed. Edgard Blucher - São Paulo - 1975.
49. Cackett, K.E. e Rampf, J.J. - "Sugarcane to ethanol" - Proc. of The South African Sugar Tech. Association - june - 1981.
50. Stupiello, J.P. e Horii, J. - "Fundo de dorna de fermentação - um fator de eficiência" - STAB Vol I - nº 1 - 1982.
51. Finguerut, J.; Lucredi, H.A. e Vaz Rossel, C.E. - "Fermentação alcoólica nas usinas cooperadas" - Boletim Técnico Copersucar - 23/83 - São Paulo - 1983.
52. Amorim, H.V. e Oliveira, A.J. - "Infecção na fermentação: como evitá-la" - Álcool e Açúcar - nº 5 - São Paulo - 1982.
53. Oliveira, E.R.; Sturion, A.C. e Gemente, A.C. - "Pagamento da cana por teor de sacarose" - Brasil Açucareiro - Instituto do Açúcar e do Álcool - outubro/novembro de 1983 - Rio de Janeiro - 1983.
54. Rasowsky, M. - Álcool - destilarias - IAA - Coleção Canavieira - Rio de Janeiro - 1978.
55. Zarpelon, F. - "Redução do volume de vinhoto" - STAB - vol I, nº 2 - 1982.