

unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

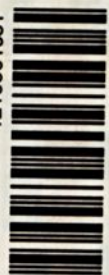
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE DIFERENTES
SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Luiz Gustavo Scartezini Rodrigues

Ilha Solteira - SP

1210001631



unesp



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UNESP - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA	
SERVIÇO DE REGISTRO DE DISSERTAÇÃO	
DATA DE CRIAÇÃO	20.09.05
REGISTRADO POR	LUIS GUSTAVO SCARTEZINI RODRIGUES
AVALIADOR	PROF. DR. JOSÉ CARLOS ROSSI

ANÁLISE ENERGÉTICA DE DIFERENTES SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Luiz Gustavo Scartezini Rodrigues

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de **Mestre**.

Orientador: **Prof. Dr. José Carlos Rossi**

Ilha Solteira – SP, 02 de setembro de 2005.



Proc. 055105-NPD 163

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
19.10.05	30.11.05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1631
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Doação Autor R\$ 10.00	R696a

Co Mys 329879
Mys 59068

NEW 282

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Rodrigues, Luiz Gustavo Scartezini.

R696a Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar / Luiz Gustavo Scartezini Rodrigues. – Ilha Solteira : [s.n.], 2005
122 p. : il. (algumas color.)

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005

Orientador: Jose Carlos Rossi

Bibliografia: p. 109-115

- 650 1. Energia da biomassa. 650 2. Termodinâmica. 650 3. Bagaço de cana.
650 4. Energia elétrica e calor – Cogeração. 650 5. Energia elétrica – Comercialização.

30404010

ANÁLISE ENERGÉTICA DE DIFERENTES SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Luiz Gustavo Scartezini Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE
ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho

Coordenador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Carlos Rossi

Orientador

Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Junior

Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto

Ilha Solteira – SP, 02 de setembro de 2005.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TITULO: ANALISE ENERGÉTICA DE DIFERENTES SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR

AUTOR: LUIZ GUSTAVO SCARTEZINI RODRIGUES
ORIENTADOR: Prof. Dr. JOSÉ CARLOS ROSSI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. JOSÉ CARLOS ROSSI
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – FE – UNESP – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA/SP

Prof. Dr. DIONIZIO PASCHOARELI JUNIOR
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA – FE – UNESP – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA/SP

Prof. Dr. OLÍVIO CARLOS NASCIMENTO SOUTO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA - FUNDAÇÃO EDUCACIONAL DE BARRETOS – FEB – BARRETOS/SP

Data da realização: 02 de setembro de 2005.


Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. JOSE CARLOS ROSSI

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Sergio Luiz Rodrigues e Célia Regina Scartezini Rodrigues.



AGRADECIMENTOS

Certo de que todo trabalho científico é resultado da dedicação de uma equipe, agradeço a todos que, direta e indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho, em especial às seguintes pessoas:

- A minha noiva Juliana Calazans de Oliveira, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, e pelo amor e confiança que sempre depositou em mim.
- A minha família pelo incentivo e apoio dado em toda minha vida.
- A minha irmã pelo seu zelo e apoio.
- A Destilaria Pioneiros S/A pelo auxílio, permitindo a utilização de parte do meu tempo nesta dissertação, assim como suas instalações como laboratório de pesquisa.
- Ao Engenheiro Mecânico Marcos Torres por ter me apresentado o setor sucroalcooleiro, dando-me as primeiras lições.
- Ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos Rossi, pelas orientações e pelo respeito.
- Aos Profs. Drs. Luís Carlos Origa de Oliveira e Dionízio Paschoareli Junior pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.
- Ao meu amigo e companheiro de trabalho Engenheiro Mecânico Marcelo Caldato Fiomari pelas conversas e discussões técnicas realizadas ao longo do trabalho.

RESUMO

No presente trabalho, foram realizadas análises energéticas de diferentes configurações de sistemas cogeneradores, avaliando índices técnicos e econômicos relacionados às características específicas de uma central termelétrica, além de sua interface com seu produto, a fabricação de açúcar e álcool. É retratada a evolução de um sistema simples e convencional, com caldeira de baixa pressão e turbinas de simples estágio, até sistemas com altos níveis de modernização, utilizando caldeiras de alta eficiência térmica, turbina de extração-condensação e utilização de motores de alto rendimento substituindo as turbinas utilizadas no processo de extração do caldo da cana-de-açúcar. Através da utilização de conceitos termodinâmicos, foram realizadas análises quantitativas e comparativas na geração de energia elétrica e sua relação com o balanço térmico do processo, procurando utilizar a energia térmica disponível de maneira mais racional e eficiente. Foram abordadas também, as vantagens técnicas, operacionais e comerciais para implantação de cada planta estudada, constatando-se a viabilidade de implantação da planta com maior índice de modernização mostrada no ultimo caso, mesmo havendo uma pequena perda na eficiência global do ciclo térmico da planta de fabricação de açúcar e álcool.

Palavras Chaves: Energia, Cogeração, Bagaço, Eletrificação, Setor Sucroalcooleiro.

ABSTRACT

This work presents the energy analyses of distinct configurations for cogeneration systems, considering economical and technical factors for a thermoelectric power plant operating in a sugar alcohol factoring process. The interface between the generator and the manufacture of sugar and alcohol is also evaluated. The evolution of a simple and conventional system with low pressure steam generator and single stage steam turbines to systems with high levels of modernization, using high pressure steam generator of high thermal efficiency, turbine of extraction-condensation and use of engines of high income substituting the turbines used in the extraction process is presented. Concepts of thermodynamic are used to demonstrate the thermal cycle of the electric generation process, looking for a more rational and efficient use of thermal energy. Techniques, operational and commercial analysis for implantation of each plant are discussed, evidencing the viability of implantation of a plant with a high index of modernization with small losses in the global efficiency of the plant thermal cycle for manufacture of sugar and alcohol.

Words Key: Energy, Cogeneration, Bagasse, Electrification, Sugar Cane Sector.

LISTA DE TABELAS

Tabela III.01 –	Dados Potência Instalada da Biomassa	31
Tabela III.02 –	Instalações Energéticas	32
Tabela III.03 –	Conteúdo Energético da Cana-de-açúcar	60
Tabela V.01 –	Valores de Entrada do Simulador Caso 01	79
Tabela V.02 –	Valores de Entrada do Simulador Caso 02	87
Tabela V.03 –	Valores de Entrada do Simulador Caso 03	90
Tabela V.04 –	Valores de Entrada do Simulador Caso 04	93
Tabela VI.01 –	Resultados do Simulador Caso 01	95
Tabela VI.02 –	Resultados do Simulador Caso 02	97
Tabela VI.03 –	Resultados do Simulador Caso 03	99
Tabela VI.04 –	Resultados do Simulador Caso 04	101
Tabela VI.05 –	Quadro Comparativo do Potencial Gerador e Exportador	102
Tabela VI.06 –	Quadro Comparativo do Ganho de Receita Bruta	103
Tabela IX.01 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 1997/1998	116
Tabela IX.02 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 1998/1999	117
Tabela IX.03 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 1999/2000	117
Tabela IX.04 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 2000/2001	118
Tabela IX.05 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 2001/2002	118

Tabela IX.06 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 2002/2003	119
Tabela IX.07 –	Dados de produção Destilaria Pioneiros S/A – Safra 2003/2004	119



LISTA DE FIGURAS

Figura III.01 –	Potência Instalada no Brasil por Fonte	31
Figura III.02 –	Potencial de Geração de Energia por Região	33
Figura III.03 –	Evolução da Potência Instalada no Brasil por Fonte Específica	34
Figura III.04 –	Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbinas a Vapor de Contrapressão	40
Figura III.05 –	Diagrama de um Sistema de Cogeração com Turbina a Vapor de Extração-Contrapressão	41
Figura III.06 –	Diagrama de um Sistema de Cogeração com Ciclo Combinado de Gás e Vapor	43
Figura III.07 –	Ciclo de Carnot	44
Figura III.08 –	Ciclo de Rankine	45
Figura III.09 –	Estrutura do Balanço Energético Nacional	58
Figura IV.01 –	Balanço Térmico Simplificado Atual	64
Figura IV.02 –	Balanço Térmico Simplificado 1ª Fase	65
Figura IV.03 –	Balanço Térmico Simplificado 2ª Fase	66
Figura IV.04 –	Turbina V32	68
Figura V.01 –	Balanço Térmico Simplificado Caso 01	75
Figura V.02 –	Volume de Controle Referente ao Desaerador Térmico	76
Figura V.03 –	Volume de Controle Referente à Caldeira	78
Figura V.04 –	Balanço Térmico Simplificado Caso 02	80
Figura V.05 –	Volume de Controle Referente ao Desaerador Térmico Caso 02	81

Figura V.06 –	Volume de Controle Referente à Caldeira Caso 02	83
Figura V.07 –	Desenho Esquemático de uma Turbina de Extração- condensação considerando 03 VC Independentes	84
Figura V.08 –	Balanço Térmico Simplificado Caso 03	88
Figura V.09 –	Balanço Térmico Simplificado Caso 04	92

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

$ex_{\text{água}}$:	Exergia específica da água (kJ/kg)
ex_{bag} :	Exergia específica do bagaço da cana (kJ/kg)
ex_e :	Exergia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg)
ex_{vapor} :	Exergia específica de vapor superaquecido (kJ/kg)
ex_s :	Exergia específica na saída do volume de controle (kJ/kg)
g :	Aceleração gravitacional (m/s^2)
h_0 :	Entalpia da água para o estado de referência (kJ/kg)
$h_{\text{água}}$:	Entalpia específica da água (kJ/kg)
h_e :	Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg)
h_s :	Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg)
h_{vapor} :	Entalpia específica de vapor superaquecido (kJ/kg)
$\dot{I}_{\text{v.c.}}$:	Taxa de irreversibilidade no volume de controle (kW)
$L_{\text{água}}$:	Entalpia de vaporização da água (kJ/kg)

$\dot{m}$:	Vazão mássica (líquido ou vapor) no volume de controle (kg/s)
$\dot{m}_{\text{água}}$:	Vazão mássica de água (kg/s)
$\dot{m}_{\text{bag}}$:	Vazão mássica de bagaço consumido na caldeira (kg/s)
$\dot{m}_{\text{CO}}$:	Vazão mássica de vapor no condensador da turbina de extração-condensação (kg/s)
$\dot{m}_e$:	Vazão mássica que entra no volume de controle (kg/s)
$\dot{m}_{E1}$:	Vazão mássica de vapor na extração 1 da turbina de extração-condensação (kg/s)
$\dot{m}_{E2}$:	Vazão mássica de vapor na extração 2 da turbina de extração-condensação (kg/s)
$\dot{m}_s$:	Vazão mássica que sai do volume de controle (kg/s)
$\dot{m}_{\text{vapor}}$:	Vazão mássica de vapor superaquecido (kg/s)
$\dot{m}_{\text{VD}}$:	Vazão mássica de vapor na entrada da turbina de extração-condensação (kg/s)
p :	Pressão (kPa)
$\dot{Q}_{\text{cond}}$:	Potência térmica perdida no condensador (kW)
$\dot{Q}_{\text{dest}}$:	Potência térmica útil no processo de destilação (kW)
$\dot{Q}_{\text{evap}}$:	Potência térmica útil no processo de evaporação da água do caldo (kW)



$\dot{Q}_{\text{útil}}$:	Potência térmica útil da planta (kW)
$\dot{Q}_{\text{v.c.}}$:	Potência térmica no volume de controle (kW)
$R_{\text{potelecana}}$:	Relação da energia elétrica gerada por tonelada de cana moída (kW · h/t)
R_{vapcana} :	Relação vapor-cana moída (kg/t)
$R_{\text{vappotele}}$:	Relação vapor consumido-potência gerada (kg/kW · h)
s_0 :	Entropia da água para o estado de referência (kJ/kg · K)
s_e :	Entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg · K)
s_s :	Entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg · K)
$S_{\text{ger, v.c.}}$:	Geração de entropia no volume de controle (kJ/kg · K)
T_0 :	Temperatura do fluido no estado de referência (K)
T_j :	Temperatura superficial do volume de controle (K)
u :	Energia interna específica (kJ/kg)
v :	Volume específico (m ³ /kg)
V_e :	Velocidade da vazão mássica na entrada do volume de controle (m/s)

$V_s :$	Velocidade da vazão mássica na saída do volume de controle (m/s)
$\dot{W}_{\text{bomb}} :$	Potências referentes ao bombeamento (kW)
$\dot{W}_{\text{ele}} :$	Potência referente aos acionamentos dos geradores elétricos (kW)
$\dot{W}_{\text{mec}} :$	Potência referente aos acionamentos mecânicos (kW)
$\dot{W}_{\text{total}} :$	Potência total (elétrica e mecânica) (kW)
$\dot{W}_{\text{v.c.}} :$	Fluxo de trabalho no volume de controle (kW)
$Z_{\text{água}} :$	Fração em massa de água no bagaço úmido (%)
$Z_e :$	Cota da vazão mássica na entrada do volume de controle (m)
$Z_i :$	Fração em massa dos diferentes elementos químicos (%)
$Z_s :$	Cota da vazão mássica na entrada do volume de controle (m)

Símbolos Gregos

$\beta :$	Função das frações de massa dos componentes químicos do bagaço (%)
$\Delta h_{\text{iso}} :$	Diferença entre as entalpias de entrada e saída do volume de controle, para processo isoentrópico (kJ/kg)

η_{cald} :	Eficiência térmica das caldeiras da unidade (%)
$\eta_{\text{cald_ref}}$:	Eficiência térmica de caldeiras que produzem apenas vapor saturado (%)
η_{global} :	Eficiência global do sistema (%)
$\eta_{\text{term_ref}}$:	Eficiência térmica de uma planta de potência de referência (%)
η_{I} :	Eficiência baseada na primeira lei da termodinâmica (%)
η_{II} :	Eficiência baseada na segunda lei da termodinâmica (%)

Unidades utilizadas no Setor Sucroalcooleiro

t_c/h :	Tonelada de cana moída por hora
t_b/h :	Tonelada de bagaço por hora
t_v/h :	Tonelada de vapor por hora
kWh/t_c :	Quilo Watts hora por tonelada de cana moída
kgv/kW :	Quilo de vapor por quilo Watts
kgv/t_c :	Quilo de vapor por tonelada de cana moída
kgv/kgb :	Quilo de vapor por quilo de bagaço
kW/kgv :	Quilo Watts por quilo de vapor

ABREVIATÖES

ANA:	Agência Nacional de Águas
ANEEL:	Agência Nacional de Energia Elétrica
BGD:	Bagaço Disponível
BGU:	Bagaço Útil
BNDES:	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCEE:	Câmara Comercializadora de Energia Elétrica
CCVE:	Contratos de Compra e Venda de Energia
CECA	Consumo Específico da Caldeira
CEEE:	Consumo Específico Turbinas Geração Energia Elétrica
CEP:	Consumo Próprio de Energia Elétrica
CEPM:	Consumo Energia Preparo e Moagem
CEPT:	Consumo Próprio Total
CER:	<i>Certified Emissions Reduction</i>
CESP:	Companhia Energética de São Paulo
CET1:	Consumo Específico Primeira Tomada
CET2:	Consumo Específico Segunda Tomada
CETCON:	Consumo Específico Condensação
CGCE:	Câmara de Gestão da Crise Energética

CNMOH:	Cana Moída Por Hora
COPERSUCAR:	Cooperativa Privada dos Produtores de Cana de Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo
CPFL:	Companhia Paulista de Força e Luz
CTPM:	Consumo Específico Turbinas Preparo e Moagem
CVP:	Consumo de Vapor de Processo
EES:	<i>Engineering Equation Solver</i>
EFEI:	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
ELETROBRAS:	Centrais Elétricas Brasileiras S.A.
EPCM:	Relação Energia Produzida por Cana Moída
ETA:	Estação de Tratamento de Água
EV:	Energia Disponibilizada para Venda
EVCM:	Relação Energia Vendida por Cana Moída
FBBG:	Fibra do Bagaço
FBCN:	Fibra da Cana
FGV:	Fundação Getúlio Vargas
FUE:	Fator de Utilização de Energia
GECON:	Geração de Energia Elétrica na Condensação
GET1:	Geração de Energia Elétrica na 1ª Tomada
GET2:	Geração de Energia Elétrica na 2ª Tomada
GETO:	Geração de energia Elétrica Total
HAA:	Entalpia da Água de Alimentação

HACON:	Entalpia da Água Condensada
HARE:	Entalpia da Água de Reposição
HPA:	Entalpia Vapor de Alta Pressão
HPB:	Entalpia Vapor de Baixa Pressão
HPM:	Entalpia Vapor de Média Pressão
IAA:	Instituto do Açúcar e Alcool
IGP:	Índice de Geração de Potência
IGPM:	Índice Geral de Preços de Mercado
IPE:	Índice de Poupança de Energia
LI:	Licença Prévia de Instalação
MAA:	Vazão da água de Alimentação
MACON:	Vazão da Água Condensada
MAE:	Mercado Atacadista de Energia
MARE:	Vazão da Água de Reposição
MCT:	Ministério de Ciência e Tecnologia
MDL:	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME:	Ministério de Minas e Energia
MVDE:	Vapor no Desaerador
MVEE:	Vapor Utilizado Geração de Energia Elétrica
MVBP:	Vapor Total Consumido no Processo
MVG:	Vapor Gerado

MVMP:	Vapor Total na Linha de média Pressão
MVT:	Vapor de Entrada na Turbina
MVT1:	Vapor Utilizado na 1ª Tomada
MVT2:	Vapor Utilizado na 2ª Tomada
MVTCON:	Vapor Utilizado na Condensação
MVRE:	Vapor Redutora Média para Baixa Pressão
MVPM:	Vapor Utilizado no Preparo e Moagem
ONS:	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCF:	<i>Prototype Carbon Fund</i>
PCI:	Poder Calorífico Inferior
PCI _{bag} :	Poder Calorífico Inferior do Bagaço
PCH's:	Pequenas Centrais Hidrelétricas
PCS:	Poder Calorífico Superior
PPM:	Potência Preparo e Moagem
PPT:	Programa Prioritário de Termoeletricidade
PROÁLCOOL:	Programa Nacional do Alcool
PROINFA:	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Geração de Energia
PVA:	Pressão Vapor de Alta
PVB:	Pressão Vapor de Baixa
PVM:	Pressão Vapor de Média
RCO:	Retorno de Condensado

RP:	Regime Permanente
RPC:	Relação entre a Potência Total Produzida e a Energia Térmica Utilizada no Processo
SIN:	Sistema Interligado Nacional
SBG:	Sobra de Bagaço
TAA:	Temperatura da Água de Alimentação
TACO:	Temperatura da Água Condensada no Processo
TARE:	Temperatura da Água de Reposição da Caldeira
TJLP:	Taxa de Juros de Longo Prazo
TVA:	Temperatura Vapor de Alta Pressão
TVB:	Temperatura Vapor de Baixa Pressão
TVM:	Temperatura Vapor de Média Pressão
UDOP:	União das Destilarias do Oeste Paulista
UNICA:	União da Agroindústria Canavieira de São Paulo
VC:	Volume de controle



SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivos e Estrutura do Trabalho	1
1.2.	Estado da Arte.....	2
2.	Histórico do Setor Sucroalcooleiro.....	9
2.1.	A História da Cana-de-açúcar	9
2.2.	Álcool: História de um combustível sustentável.....	17
2.3.	Subprodutos da cana se tornaram fonte de receita	25
3.	Cogeração.....	28
3.1.	Biomassa.....	28
3.2.	Cogeração no Setor Sucroalcooleiro	29
3.3.	Conceitos Termodinâmicos	34
3.4.	Rendimento da Cogeração.....	45
3.5.	Comercialização de Energia.....	48
3.6.	Bioeletricidade – Importância do Setor sucroalcooleiro	54
3.7.	Balanco Energético Nacional.....	58
4.	Projeto de uma Unidade Termelétrica a Biomassa – Estudo de Caso	62
4.1.	Descrição do Projeto	62
4.2.	Sistema Atual da Usina	63
4.3.	1ª Fase do Projeto	64
4.4.	2ª Fase do Projeto	66
4.5.	Inovação Tecnológica.....	67



5. Estudo do Balanço Térmico Simplificado de uma Unidade

Termelétrica a Biomassa. 69

- 5.1. Variáveis do Balanço Térmico70
- 5.2. Metodologia de Cálculo73
- 5.3. Caso 0174
- 5.4. Caso 0279
- 5.5. Caso 0387
- 5.6. Caso 0491

6. Resultados 94

- 6.1. Apresentação dos Resultados94
- 6.2. Análise dos Resultados102

7. Conclusão 105

8. Referências Bibliográficas..... 109

9. Apêndices 116

- 9.1. Dados de Produção da Destilaria Pioneiros S/A116
- 9.2. Glossário de Termos Técnicos120

1. Introdução

1.1. Objetivos e Estrutura do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo analisar diferentes configurações de sistemas cogeneradores do setor sucroalcooleiro, avaliando índices técnicos e econômicos, relacionados às características específicas de uma central termelétrica e sua interface com seu produto principal, a fabricação de açúcar e álcool. É relacionado também a uma planta sucroalcooleira do oeste paulista, localizada no município de Sud Mennucci, Estado de São Paulo, que além da fabricação do açúcar e do álcool passou, a partir de 2002, a investir na cogeração de energia e, conseqüentemente, sofreu algumas modificações na sua planta para atender esse objetivo.

No Capítulo 1 é apresentado um retrospecto de trabalhos realizados sobre cogeração de energia elétrica dentro do setor sucroalcooleiro, além de ser enfatizadas qual a proposta e estrutura do presente trabalho.

No Capítulo 2 é feito um levantamento histórico do setor sucroalcooleiro, desde a origem da cana de açúcar na Oceania até sua disseminação no continente americano, no Brasil e no oeste paulista, região na qual se encontra a Usina estudada.

No Capítulo 3 são abordados aspectos gerais sobre cogeração de energia, levando-se em conta a sua evolução dentro do setor sucroalcooleiro, bem como seu potencial de geração de energia. Complementarmente, são apresentados alguns conceitos técnicos necessários para o entendimento deste trabalho e de maneira geral o funcionamento do modelo energético nacional.

No Capítulo 4, todo o histórico da evolução de uma Usina de açúcar e álcool é apresentado, bem como o projeto de cogeração proposto para esta planta.

No Capítulo 5, é detalhada a metodologia da análise realizada descrevendo todas suas variáveis, também são apresentados todos os casos estudados descritos através de fluxogramas das plantas e de tabelas mostrando os dados considerados para os cálculos. Nesta descrição, também são fornecidas informações técnicas de operação de plantas de vapor em usinas sucroalcooleiras.

No Capítulo 6, são fornecidos os resultados de maneira comparativa, enfocando as vantagens técnicas e econômicas de cada um dos casos. Nesse capítulo, ainda, são feitas algumas considerações sobre os resultados obtidos.

Para finalizar, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões dessa dissertação, bem como sugestões para estudos futuros.

1.2. Estado da Arte

Existem diversos livros clássicos sobre análise de sistemas e cogeração de energia, entre eles podemos citar: Orlando (1991), Bejan et al. (1996), Horlock (1997), Khartchenko (1998) e Balestieri (2002), que servem como base para qualquer tipo de estudo específico.

Nos últimos anos, têm surgido diversos trabalhos relacionados à análise energética, e termoeconômica de sistemas aplicados às usinas de açúcar e álcool e verifica-se que a produção nesta área continua intensa, o que demonstra a preocupação dos pesquisadores com o tema. A seguir serão apresentados alguns trabalhos que serviram como referência para o desenvolvimento desta dissertação.

Walter (1994) tratou da cogeração e da produção independente de eletricidade, como formas de geração descentralizada de energia elétrica e, em especial, da viabilidade e das perspectivas dessas tecnologias junto ao setor sucroalcooleiro no Brasil, levando-se em conta a expansão da agroindústria canavieira. Foram analisadas várias alternativas de geração elétrica em larga escala e determinadas as principais características técnicas de cada sistema,

tais como a capacidade de geração, a produção de energia elétrica, a disponibilidade de excedentes e a demanda de biomassa. Esses resultados permitiram identificar o potencial das tecnologias de maior viabilidade técnica e econômica, a partir da consideração de cenários alternativos de crescimento da produção de cana no estado de São Paulo e da identificação das usinas mais adequadas para esses empreendimentos.

Barreda Del Campo & Llagostera (1996) avaliaram três configurações de sistemas de cogeração em usinas de açúcar, visando à produção de excedentes de energia elétrica passíveis de comercialização. Foi estudada a influência dos parâmetros do vapor, da eficiência das caldeiras e, para as configurações de melhor desempenho, da dependência da geração de eletricidade em função da demanda de vapor de processo. Foi efetuada uma análise exergética das alternativas mais significativas e, finalmente, uma avaliação econômica das configurações que se apresentaram mais promissoras.

Coelho et al. (1997) realizaram uma análise termoeconômica do processo de cogeração usina de açúcar e álcool paulista. Os custos exergéticos do processo de geração de vapor e eletricidade foram calculados para várias configurações, a partir de estimativas de excedentes de eletricidade e dos investimentos correspondentes. Foram aplicados os métodos de igualdade, extração e trabalho como subproduto, para a partição dos custos. Entre as configurações avaliadas, destaca-se uma que consistiu na simples troca de equipamentos, mantendo-se os mesmos níveis de pressão nas caldeiras e turbinas de contrapressão, com pequeno investimento em técnicas relativas ao uso racional de energia, visando apenas atingir a auto-suficiência energética. Uma outra configuração estudada consistiu no aumento dos níveis de pressão e a realização de investimentos adicionais no uso racional de energia, incluindo a eletrificação das moendas. Por fim, foi analisada uma configuração na qual foram realizados grandes investimentos, através da substituição da turbina de contrapressão por uma de extração-condensação, produzindo, neste caso, significativo excedente de eletricidade.

Barreda Del Campo et al. (1998) estudaram o sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira que fornece excedentes de energia para a rede elétrica. Foram calculados, além das propriedades termodinâmicas dos diferentes fluxos do sistema, os balanços de massa, energia e exergia. Além disso, eles realizaram uma comparação das eficiências de primeira e segunda lei, mostrando a utilidade desta última na avaliação de um sistema real, e como elemento importante para decisão de melhorias das plantas térmicas, ao evidenciar os equipamentos de maiores irreversibilidades e, conseqüentemente, a perda de oportunidades de geração de energia elétrica.

Carpio et al. (1999) apresentaram critérios de avaliação termodinâmica para sistemas de cogeração em usinas de açúcar, analisando dois sistemas de cogeração, um com turbina de contrapressão operando a 2,1 MPa e 300 °C e outro com turbina de extração-condensação operando a 8,0 MPa e 450 °C. Foi analisada também a possibilidade de utilização de combustíveis auxiliares para o período da entre safra, usando palha de cana, eucalipto e gás natural, além disso, foi determinado o custo de geração de eletricidade para cada caso. Os autores concluíram que o sistema com turbina de condensação e com duas extrações apresenta eficiência de 66,0 % contra 42,0 % do sistema de contrapressão, além de ter uma taxa de economia da energia do combustível de quase sete vezes a taxa apresentada pela outra configuração. Como alternativas de geração fora da safra, o gás natural foi o combustível que apresentou o menor custo seguido pela palha de cana, se considerado custos de colheita e transporte inferiores a R\$ 25,00 por tonelada.

Coelho (1999) propôs e discutiu mecanismos para viabilizar um programa amplo de venda de excedentes de eletricidade a partir da biomassa das usinas de açúcar e álcool do Estado de São Paulo. Além disso, foi incluída uma avaliação termoeconômica de uma planta real (Companhia Energética Santa Elisa, Sertãozinho – SP) e foram propostas modificações na legislação e na regulamentação em vigor e, também, estudos visando à inclusão dos custos ambientais e taxação de carbono no planejamento integrado do setor elétrico brasileiro.



Vieira & Pellegrini (1999) apresentaram um estudo de caso onde foi analisada a repotenciação de usinas de açúcar e álcool de médio porte, localizadas na região sudeste do país. Para tanto, foi considerada uma unidade padrão característica do setor que processa 10 mil toneladas de cana por dia e foi utilizado um modelo matemático denominado Modelo de Despacho Hidrotérmico, comumente usado como balizador no processo decisório da expansão de empreendimentos para oferta de energia elétrica. Foi constatado que as usinas sucroalcooleiras, embora apresentem um regime sazonal de operação, são empreendimentos bastante interessantes do ponto de vista da expansão do sistema elétrico brasileiro.

Sánchez Prieto & Nebra (2001) fizeram uma análise de custo exergético do sistema de cogeração de uma usina açucareira que tem toda sua demanda de potência e energia térmica satisfeita pelo próprio sistema. Neste trabalho, eles incluíram a determinação das irreversibilidades e das eficiências da segunda lei da termodinâmica, salientando a importância destas eficiências para as decisões sobre possíveis alterações do sistema, tanto para melhoria na planta térmica, como no sentido de atender os requisitos necessários estabelecidos pela ANEEL para a qualificação de centrais cogeneradoras para a venda de energia.

Sánchez Prieto et al. (2001) também apresentaram uma outra análise de custo exergético do sistema de cogeração aplicado na Usina Cruz Alta, localizada na cidade de Olímpia (SP). Porém, neste estudo foi enfatizada uma metodologia para a determinação experimental da eficiência do sistema, permitindo a determinação do consumo de bagaço de cana da caldeira. Além disso, cada equipamento foi tratado separadamente de forma que os balanços de massa, energia e exergia foram feitos para cada componente do sistema térmico.

Higa & Bannwart (2002) realizaram algumas simulações e análises térmicas de uma planta produtora de açúcar e álcool, visando otimizar a produção de excedente de energia elétrica e encontrar a melhor forma de recuperação de calor e integração térmica do processo. Foram consideradas diferentes tecnologias de cogeração e de arranjos de evaporadores de

múltiplos efeitos. Os resultados obtidos demonstraram que diferentes configurações requerem também diferentes medidas e estabelecem algumas prioridades, que podem ser realizadas em diversos níveis de investimentos econômicos. Além das diferenças na integração da usina no sistema de cogeração para a economia de bagaço, ou para o aumento da geração de energia elétrica excedente, foi possível concluir que as medidas para alcançar esses objetivos devem ser priorizadas de acordo com o consumo de vapor de processo e a integração de evaporadores de múltiplos efeitos.

Lobo et al. (2002) analisaram os processos de extração de duas empresas sucroalcooleiras que usam turbinas de contrapressão para fornecer trabalho, sendo o vapor de contrapressão utilizado como energia térmica de processo. Uma das empresas emprega grandes turbo geradores de múltiplos estágios, que operam com entrada de vapor a 3,0 MPa e 330 °C, para cogear energia elétrica para motores elétricos que acionam as moendas, picadores e desfibradores. Já na outra empresa, o acionamento das máquinas é realizado diretamente por pequenas turbinas de simples estágio operando com vapor a 2,0 MPa e 290 °C. Verificou-se que a empresa que utiliza energia elétrica cogorada, com turbinas maiores para acionar as máquinas, chega a economizar 65 % de bagaço gasto para moer uma tonelada de cana quando comparada com as empresas que utilizam várias turbinas menores (menos eficientes). Os autores concluíram que, com o uso mais racional do bagaço gerando vapor em temperaturas e pressões maiores, obtém-se uma grande economia de bagaço, que tanto pode ser comercializado in natura, ou ser usado para cogeração de excedentes de eletricidade.

Jaguaribe et al. (2002) realizaram um estudo termodinâmico e avaliaram as condições técnicas das instalações a serem implantadas em um sistema de cogeração de energia na Destilaria Japungu Agroindustrial S.A., localizada em Santa Rita (PB). A ampliação proposta não tem o objetivo apenas de tornar a destilaria auto suficiente em termos de energia, mas também tornar possível exportar 33.616 MW · h durante a safra e 3.600 MW · h na entre safra. Foram considerados todos os custos envolvidos e os resultados mostraram que de imediato o negócio pode não ser atrativo, mas se houver uma elevação do

preço de venda da eletricidade, o novo sistema de cogeração com venda de energia seria mais rentável.

Brighenti (2003) apresentou e analisou os diversos requisitos necessários para que haja uma integração confiável e segura dos sistemas de geração a partir de biomassa (especificamente cogeração com bagaço de cana) ao sistema elétrico de potência. Foi considerado um estudo de uma usina de açúcar e álcool do Estado de São Paulo (Usina Santa Adélia), que recentemente ampliou sua geração própria, passando a comercializar sua eletricidade excedente com a CPFL. Foram levantadas e analisadas as barreiras técnicas, legislativas, econômicas e ambientais, que em conjunto determinam a integração do cogrador, sendo dada ênfase especial à parte técnica da interligação, buscando analisar o impacto que a inserção dos produtores independentes pode causar no sistema elétrico e o que precisaria ser feito para a interligação com a concessionária.

3 Sánchez Prieto (2003) realizou uma detalhada análise energética e exergética, visando determinar as eficiências de primeira e segunda lei da termodinâmica para os principais equipamentos de duas plantas de usinas sucroalcooleiras, bem como o consumo de combustível envolvido, além de alguns índices de desempenho típicos de sistemas de cogeração. O objetivo fundamental da avaliação foi determinar os custos dos principais fluxos do sistema, considerando os custos como se fosse uma instalação nova, com taxa de juros de 15 % ao ano e um período de amortização de 15 anos. Foi avaliada a variação do custo de bagaço e sua influência nos custos dos fluxos da planta e dada ênfase na potência elétrica e nos índices de desempenho.

Jaguaribe et al. (2004) discutiram um caso real de investimento na ampliação do sistema de cogeração de energia em uma indústria sucroalcooleira paraibana (Japungu Agroindustrial S.A.), considerando o preço sazonal do bagaço, os custos de geração de energia, levando-se em conta um período de 10 anos. Com o novo parque de cogeração a indústria se tornou auto suficiente em energia, dispondo de 21.240 MW·h para comercialização, com uma potência média de exportação de 4.000 kW. Todavia, após a análise

econômica efetuada, verificou-se que a melhor opção seria manter a planta na forma original e vender o bagaço a R\$ 26,00 por tonelada.



2. Histórico do Setor Sucroalcooleiro

Para compreender melhor a evolução dos sistemas cogeneradores estudados é necessário conhecer um pouco do histórico do setor sucroalcooleiro, sua evolução técnica e econômica, identificando as causas históricas que influenciaram para caracterização deste setor.

Para isto, foram utilizados trechos do texto de Machado (2003) "Brasil, a Doce Terra – História do setor", que retrata toda a história da evolução da cana-de-açúcar no Brasil e no mundo, e outras informações fornecidas pela União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA) e Usinas e Destilarias do Oeste Paulista (DOP).

2.1. A História da Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é, talvez, o único produto de origem agrícola destinado à alimentação que ao longo dos séculos foi alvo de disputas e conquistas, mobilizando homens e nações. A planta que dá origem ao produto encontrou lugar ideal no Brasil. Durante o Império, o país dependeu basicamente do cultivo da cana e da exportação do açúcar. Calcula-se que naquele período da história, a exportação do açúcar rendeu ao Brasil cinco vezes mais que as divisas proporcionadas por todos os outros produtos agrícolas destinados ao mercado externo.

Foi na Nova Guiné que o homem teve o primeiro contato com a cana-de-açúcar. De lá, a planta foi para a Índia. No "Atharvaveda", o livro dos Vedas, há um trecho curioso: "Esta planta brotou do mel; com mel a arrancamos; nasceu a doçura... Eu te enlaço com uma grinalda de cana-de-açúcar, para que me não sejas esquivar, para que te enamores de mim, para que não me sejas infiel". A palavra "açúcar" é derivada de "shakkar" ou açúcar em sânscrito, antiga língua da Índia.



Desconhecida no Ocidente, a cana-de-açúcar foi observada por alguns generais de Alexandre, o Grande, em 327 a.C e mais tarde, no século XI, durante as Cruzadas. Os árabes introduziram seu cultivo no Egito no século X e pelo Mar Mediterrâneo, em Chipre, na Sicília e na Espanha. Credita-se aos egípcios o desenvolvimento do processo de clarificação do caldo da cana e um açúcar de alta qualidade para a época.

O açúcar era consumido por reis e nobres na Europa, que a adquiriam de mercadores monopolistas, que mantinham relações comerciais com o Oriente, a fonte de abastecimento do produto. Pelo fato de ser fonte de energia para o organismo, os médicos forneciam açúcar em grãos para a recuperação ou alívio dos moribundos. No início do século XIV, há registros de comercialização de açúcar por quantias que hoje seriam equivalentes R\$ 200,00/kg. Por isso, quantidades de açúcar eram registradas em testamento por reis e nobres (Machado, 2003).

A Europa rumava para uma nova fase histórica, o Renascimento, com a ascensão do comércio, entre outras atividades. O comércio era feito por vias marítimas, pois os senhores feudais cobravam altos tributos pelos comboios que passavam pelas suas terras ou, simplesmente, incentivavam o saque de mercadorias. Portugal, por sua posição geográfica, era passagem obrigatória para as naus carregadas de mercadorias. Isso estimulou a introdução da cana-de-açúcar na Ilha da Madeira (Portugal), que foi o laboratório para a cultura de cana e de produção de açúcar que mais tarde se expandiria com a descoberta da América.

Cristóvão Colombo, genro de um grande produtor de açúcar na Ilha Madeira, introduziu o plantio da cana na América, em sua segunda viagem ao continente, em 1493, onde hoje é a República Dominicana. Quando os espanhóis descobriram o ouro e a prata das civilizações Asteca e Inca, no início do século XVI, o cultivo da cana e a produção de açúcar foram esquecidos.

Oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que em 1532 trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São



Vicente. Lá, ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar. Mas foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram.

Depois de várias dificuldades, após 50 anos, o Brasil passou a monopolizar a produção mundial açúcar. Portugal e Holanda, que comercializavam o produto, tinham uma elevada lucratividade. A Europa enriquecida pelo ouro e prata do Novo Mundo passou a ser grande consumidora de açúcar. As regiões produtoras, especialmente as cidades de Salvador e Olinda prosperaram rapidamente. As refinarias se multiplicavam na Europa, a ponto de Portugal proibir novas centrais de refino em 1559 devido ao grande consumo de lenha e insumos para a clarificação do caldo (clara de ovos, sangue de boi, ossos e gordura de galinha).

No ano de 1578 Portugal foi anexado pela Espanha. O rei espanhol, Felipe II, católico fervoroso, se opunha duramente à Holanda e Inglaterra, países protestantes. O comércio da Holanda entrou em colapso e em 1630 os holandeses invadiram o Brasil permanecendo em Pernambuco até 1654, quando foram expulsos. Para diminuir a dependência do açúcar brasileiro, os holandeses iniciaram a produção açucareira no Caribe e mais tarde os próprios ingleses e franceses fizeram o mesmo em suas colônias, acabando com o monopólio do açúcar brasileiro.

A descoberta do ouro no final do século XVII nas Minas Gerais retirou do açúcar o primeiro lugar na geração de riquezas, cuja produção se retraiu até o final do século XIX. Mesmo assim, no período do Brasil Império de (1500-1822) a renda obtida pelo comércio do açúcar atingiu quase duas vezes a do ouro e quase cinco vezes a de todos os outros produtos agrícolas juntos, tais como café, algodão, madeiras, etc.

A partir do início do século XVIII a produção nas ilhas do Caribe e nas Antilhas cresceu e o Brasil perdeu posições na produção mundial de açúcar. Inglaterra e França disputavam em suas colônias os primeiros lugares na produção. A Inglaterra já era uma grande potência naval. Os holandeses



perderam pontos estratégicos no comércio de açúcar. O Haiti, colônia francesa no Caribe, era o maior produtor mundial.

As 13 colônias americanas, que mais tarde deram origem aos EUA, lutavam com dificuldade, apesar de um comércio crescente com as colônias produtoras de açúcar no Caribe e nas Antilhas. Em contrapartida compravam melaço, matéria-prima para o rum, que forneciam à marinha inglesa. Esse comércio era ignorado pelos ingleses e concorreu para o fortalecimento econômico das colônias americanas. Estes fatores foram decisivos não só para a independência das 13 colônias, mas também para o surgimento da grande nação da América do Norte.

Os ingleses tomaram Cuba dos espanhóis em 1760, dobraram o número de escravos e fez da ilha um dos maiores produtores mundiais de açúcar. Em 1791, uma revolução de escravos no Haiti aniquilou completamente sua produção de açúcar e os franceses expulsos foram para a Louisiana, dando início à indústria açucareira norte-americana. O Brasil não estava no centro dos acontecimentos, mas continuava entre os cinco maiores produtores.

No início do século XIX, Napoleão dominava a Europa. Seus inimigos, os ingleses, promoveram o bloqueio continental em 1806, graças ao seu maior poder naval. Impedido de receber o açúcar de suas colônias ou de outros lugares além-mar, Napoleão incentivou a produção de açúcar a partir da beterraba, graças à técnica desenvolvida por Andrés Marggraf, químico prussiano, em 1747.

Assim, finalmente, a Europa não dependeria mais da importação de açúcar de outros continentes. Por outro lado, em plena revolução industrial, o uso de novas máquinas, técnicas e equipamentos possibilitaram às novas indústrias tanto de beterraba, como de cana, um novo patamar tecnológico de produção e eficiência, impossível de ser atingido pelos engenhos tradicionais.

Aliado a esses fatores, o fim da escravidão sepultava definitivamente o modelo de produção de quatro séculos. Enquanto as modernas fábricas se multiplicavam e novas regiões produtoras surgiam, como a África do Sul, Ilhas Maurício e Reunião, Austrália e em colônias inglesas, francesas ou

holandesas, no Brasil os engenhos tradicionais persistiam, ainda que agonizantes. Somente na metade do século XIX é que medidas para reverter essa situação começaram a ser tomadas.

O imperador do Brasil, D. Pedro II, era um entusiasta das novas tecnologias e em 1857 foi elaborado um programa de modernização da produção de açúcar. Assim surgiram os Engenhos Centrais, que deveriam somente moer a cana e processar o açúcar, ficando o cultivo por conta dos fornecedores. Nessa época, Cuba liderava a produção mundial de açúcar de cana com 25% do total e o açúcar de beterraba produzido na Europa e EUA significavam 36% da produção mundial. O Brasil contribuía com apenas 5% de um total de 2.640.000 toneladas em 1874 (Machado, 2003).

Foram aprovados 87 Engenhos Centrais, mas só 12 foram implantados. O primeiro deles, Quissamã, na região de Campos, entrou em operação em 1877 e está em atividade até hoje. Mas a maioria não teve a mesma sorte. O desconhecimento dos novos equipamentos, a falta de interesse dos fornecedores, que preferiam produzir aguardente ou mesmo açúcar pelos velhos métodos, e outras dificuldades contribuíram para a derrocada dos Engenhos Centrais.

Os próprios fornecedores dos equipamentos acabaram por adquiri-los e montar suas indústrias de processamento de açúcar. A maioria das novas indústrias estava no Nordeste e em São Paulo e passaram a serem chamadas de "usinas de açúcar". Apesar da novidade, o açúcar derivado da cana não fazia frente ao de beterraba (em 1900 ultrapassava mais de 50% da produção mundial).

A 1ª Grande Guerra, iniciada em 1914, devastou a indústria de açúcar européia. Esse fato provocou um aumento do preço do produto no mercado mundial e incentivou a construção de novas usinas no Brasil, notadamente em São Paulo, onde muitos fazendeiros de café desejavam diversificar seu perfil de produção.

No final do século XIX, o Brasil vivia a euforia do café (70% da produção mundial estavam aqui). Após a abolição da escravidão, o governo brasileiro

incentivou a vinda de europeus para suprir a mão-de-obra necessária às fazendas de café, no interior paulista. Os imigrantes, de maioria italiana, adquiriram terra e grande parte optou pela produção de aguardente a partir da cana. Inúmeros engenhos se concentraram nas regiões de Campinas, Itu, Moji-Guaçu e Piracicaba. Mais ao norte do estado, nas vizinhanças de Ribeirão Preto, novos engenhos também se formaram.

Na virada do século, com terras menos adequadas ao café, Piracicaba, cuja região possuía três dos maiores Engenhos Centrais do estado e usinas de porte, rapidamente se tornou o maior centro produtor de açúcar de São Paulo. A partir da década de 10, impulsionados pelo crescimento da economia paulista, os engenhos de aguardente foram rapidamente se transformando em usinas de açúcar, dando origem aos grupos produtores mais tradicionais do estado na atualidade.

Foi nessa época, 1910, que Pedro Morganti, os irmãos Carbone e outros pequenos refinadores formaram a Cia. União dos Refinadores, uma das primeiras refinarias de grande porte do Brasil. Em 1920, um imigrante italiano com experiência em usinas de açúcar, fundou em Piracicaba uma oficina mecânica que logo depois se transformaria na primeira fábrica de equipamentos para a produção de açúcar no Brasil. Esse pioneiro era Mario Dedini.

Essa expansão da produção também ocorria no Nordeste, concentrada em Pernambuco e Alagoas. As usinas nordestinas eram responsáveis por toda a exportação brasileira e ainda complementavam a demanda dos estados do sul. A produção do Nordeste somada à de Campos, no norte fluminense, e a rápida expansão das usinas paulistas acenavam para um risco eminente: a superprodução. Para controlar a produção surgiu o IAA (Instituto do Açúcar e Alcool), criado pelo governo Vargas em 1933. O IAA adotou o regime de cotas, que atribuía a cada usina uma quantidade de cana a ser moída, a produção de açúcar e também a de álcool. A aquisição de novos equipamentos ou a modificação dos existentes também precisavam de autorização do IAA.

Por ocasião da 2ª Guerra Mundial, com o risco representado pelos submarinos alemães à navegação na costa brasileira, as usinas paulistas reivindicaram o aumento da produção para que não houvesse o desabastecimento dos Estados do sul. A solicitação foi aceita e nos dez anos subseqüentes os paulistas multiplicaram por quase seis vezes sua produção. No início da década de 50, São Paulo ultrapassou a produção do Nordeste, quebrando uma hegemonia de mais de 400 anos.

Desde a 2ª Guerra Mundial, os esforços da indústria açucareira brasileira se concentraram na multiplicação da capacidade produtiva. As constantes alterações na cotação do açúcar no mercado internacional e os equipamentos obsoletos forçaram uma mudança de atitude para a manutenção da rentabilidade. Coube à Copersucar - cooperativa formada em 1959 por mais de uma centena de produtores paulistas para a defesa de seus preços de comercialização - a iniciativa de buscar novas tecnologias para o setor. A indústria açucareira da Austrália e a África do Sul representavam o modelo de modernidade desejada. Do país africano vieram vários equipamentos modernos.

Na agricultura, a busca por novas variedades de cana mais produtivas e mais resistentes às pragas e doenças, iniciada em 1926, por ocasião da infestação dos canaviais pelo mosaico, foi também intensificada e teve início o controle biológico de pragas. Entidades como Copersucar, o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) e o IAA-Planalçucar foram responsáveis por esses avanços. Esse período de renovação culminou com a elevação dos preços do açúcar no mercado internacional que atingiram a marca histórica de mais de US\$ 1000.00 a tonelada.

Com os recursos decorrentes desse aumento de preço foi criado pelo IAA o Funproçucar que financiou em 1973 a modernização das indústrias e a maioria das usinas foi totalmente remodelada. Esses fatos foram de importância fundamental para o próprio Brasil enfrentar as crises do petróleo que se seguiram a partir de 1973, através do Proálcool. Esse programa de incentivo à produção e uso do álcool como combustível em substituição à gasolina, criado em 1975, alavancou o desenvolvimento de novas regiões

produtoras como o Paraná, Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Em menos de cinco anos a produção de pouco mais de 300 milhões de litros ultrapassou a cifra de 11 bilhões de litros, caracterizando o Proálcool como o maior programa de energia renovável já estabelecido em termos mundiais, economizando mais de US\$ 30 bilhões em divisas (Machado, 2003).

No final da década de 70, apareceram os adoçantes sintéticos, com amplas campanhas publicitárias, para concorrer com o açúcar. Paralelamente nos EUA, o principal mercado consumidor de açúcar, desenvolveu-se a produção de xaropes de frutose, obtidos a partir do milho, para uso industrial, substituindo o açúcar em alimentos e refrigerantes. No início da década de 80, o xarope de frutose ocupou mais de 50% do mercado que originalmente era do açúcar. Nos dias de hoje, praticamente 70% do milho produzido nos EUA, que também é o maior produtor mundial desse cereal, é destinado à produção de xarope de frutose e álcool combustível, elevando os EUA à condição de segundo maior produtor mundial de álcool (7 bilhões de litros). Esses novos produtos, suas campanhas e o pequeno incremento na demanda mundial derrubaram o preço do açúcar a patamares poucas vezes igualado na história recente.

As usinas brasileiras se beneficiaram porque possuíam o álcool como salvaguarda. Apesar das dificuldades, da globalização, da rápida mudança de paradigmas a que está submetida, a indústria açucareira brasileira continua em expansão. Sua produção no final do milênio chegou a 300.000.000 de toneladas de cana moída/ano em pouco mais de 300 unidades produtoras; 17 milhões de toneladas de açúcar e 13 bilhões de litros de álcool. A procura por diferenciação e produtos com maior valor agregado é constante. Novos sistemas de administração e participação no mercado são rapidamente incorporados. O setor não mais se acomoda à resignação do passado e busca novas alternativas, como a co-geração de energia elétrica.



2.2. Álcool: História de um combustível sustentável

O Programa Brasileiro do Álcool Combustível tem mais de 20 anos e demonstrou três vantagens evidentes em relação ao uso de derivados do petróleo. A primeira está ligada ao desenvolvimento tecnológico e à estratégia de abastecimento; a segunda relaciona-se com o desempenho da economia e o nível do emprego; a terceira é de ordem ambiental. Graças a esse programa, o Brasil conquistou uma tecnologia, única no mundo, para a utilização em larga escala de um combustível renovável que independe do mercado internacional do petróleo. Vastas regiões do país ganharam vida nova, oferecendo oportunidade de trabalho a centenas de milhares de pessoas. Para produzir a mesma quantidade de energia, o álcool emprega 152 vezes mais pessoas do que a indústria do petróleo. Para um investimento total de US\$ 11 bilhões, desde a sua criação, o programa obteve para o país, via substituição de importações, uma economia de divisas de US\$ 27 bilhões. Hoje, o Brasil dispõe de um "combustível verde", renovável e neutro em relação ao efeito estufa, que reduz em 50% a emissão de monóxido de carbono dos motores de veículos e que promoveu a substituição total do chumbo tetraetila que era misturado à gasolina. Essas três vantagens constituem a lógica do Programa Brasileiro de Álcool Combustível, são reconhecidas até pelos seus inimigos e tendem a se tornar cada vez mais evidentes à medida que crescem as preocupações mundiais com o desemprego, com o meio ambiente e com o aumento da dependência mundial de petróleo extraído em áreas instáveis como o Oriente Médio.

O programa nasceu em 1975 como solução original brasileira para enfrentar o primeiro choque do petróleo, ocorrido dois anos antes. As consequências haviam sido especialmente graves para o país, que àquela época importava praticamente 80% do petróleo consumido. Num único ano, de 1973 para 1974, as despesas com a importação de combustível saltaram de US\$ 600 milhões para mais de US\$ 2 bilhões. Esse gigantesco estrago na balança de pagamentos evidenciou as vulnerabilidades estratégicas do Brasil, que poderia "parar" se os fornecedores assim o decidissem. Para enfrentar essa situação dramática, o Governo Federal idealizou três programas: a

substituição do diesel, do óleo combustível e da gasolina por outras fontes internas de energia. E investiu também muitos recursos na prospecção de petróleo. O álcool de cana-de-açúcar logo se impôs como alternativa ideal à gasolina. Para viabilizá-la, o governo lançou uma gigantesca operação de financiamento, contando também com apoio do Banco Mundial, o que possibilitou o aumento das áreas plantadas com cana-de-açúcar, a construção de novas usinas e o desenvolvimento de indústrias de caldeiraria, além da ampliação das já existentes.

Uma vez disponível, o "combustível verde" foi aproveitado de duas formas. De início, cuidou-se, sobretudo de misturá-lo à gasolina sob forma de álcool anidro. Liderando esse processo de mistura de dosagens crescentes, a gasolina distribuída na cidade de São Paulo passou de uma percentagem de mistura de 20%, em 1977, para 22%, em 1980 e foi adotada em todo o país. No início dos anos 80, surgiram os motores que dispensavam totalmente a gasolina, utilizando unicamente álcool hidratado. Nos primeiros anos, eram simples adaptações cujo desempenho muitas vezes deixava a desejar. Foi preciso esperar 1979 e o segundo choque do petróleo para que as montadoras colocassem no mercado os modelos especialmente fabricados para funcionar a álcool. O êxito superou todas as previsões. Em 1984, os carros a álcool constituíam 94,4% da produção das montadoras, ou seja, 19 de cada 20 carros que saíam das linhas de montagem. Havia uma política definida que remunerava adequadamente o produtor de álcool e mantinha uma relação diferenciada entre os preços do álcool e da gasolina. O ano de 1985 marcou o fim de uma etapa. Depois disso, a participação dos carros a álcool na produção anual despencou: 88,4% em 1988, 61% em 1989, 19,9% em 1990 e apenas 0,3%, em 1996. Em contrapartida, desde 1991 existe uma lei federal que obriga a adição de 22% de álcool anidro à gasolina.

Vários fatores contribuíram para prejudicar o programa. Refletir sobre eles é uma forma de superar futuras dificuldades e uma contribuição brasileira a programas semelhantes que despontam hoje em todo o mundo. O consumidor acostumara-se a encontrar o álcool a um preço muito inferior ao da gasolina - até 40% em alguns casos. Mas com a queda acentuada dos preços internacionais do petróleo, o governo já não conseguia bancar esse diferencial

que foi se estreitando com o tempo até se reduzir pela metade. Na hora de encher o tanque, ter um carro a álcool não representava mais uma grande vantagem. Houve também, em 1989, um pequeno desabastecimento em áreas localizadas que, embora passageiro, minou a confiança de muitos motoristas na perenidade do programa. Em caso de desabastecimento prolongado, eles temiam não poder usar seus carros. E como se verificou na época, uma eventual conversão dos motores, do álcool para gasolina, era problemática. Outro fator negativo surgiu em julho de 1990, quando o governo resolveu diminuir os impostos dos carros populares. Era uma maneira de estimular a produção da indústria automobilística, estacionada em 700 mil veículos por ano, depois de já ter ultrapassado a marca de 1,1 milhão de unidades na década anterior. A operação de expansão da produção automobilística foi um grande êxito, pois os carros populares somaram 50% dos 1,4 milhão de automóveis vendidos em 1994. Mas por razões técnicas só foram produzidos carros populares movidos à gasolina. Como exigência básica para entrar na categoria popular, a compressão dos motores deveria ser reduzida para o limite de um litro. Essa redução, que já não é simples nos motores a gasolina, seria ainda muito mais problemática numa eventual versão a álcool. Assim, a partir de 1994, a frota nacional passou a ter uma quantidade de veículos cada vez maiores de carros movidos à gasolina. É preciso lembrar também que desde 1986, por meio de políticas voltadas para o controle da inflação, os preços das tarifas públicas, sempre congeladas e os juros elevados, influíram negativamente na capacidade de oferta de álcool pelo produtor, uma vez que seus preços são administrados pelo governo.

Como todos esses fatores negativos são conjunturais, nada impede que nos próximos anos o número de carros a álcool volte a crescer. Apesar da produção reduzida nos últimos anos, 4,3 milhões de carros a álcool continuam rodando pelas ruas e estradas brasileiras. E o consumidor, ao contrário do que muitos supõem, vê de maneira favorável à volta ao mercado de carros novos movidos a álcool. Não há qualquer risco de desabastecimento. A produção de álcool, que evoluiu de 500 milhões de litros para 3,4 bilhões de litros com a implantação do programa e deu um salto para 12 bilhões de litros, por ano, no início da década dos 80 (mantendo-se assim nos últimos anos), poderia

alcançar até 16 bilhões de litros anuais sem aumento da capacidade instalada. A velocidade da volta do carro a álcool ao mercado brasileiro de carros novos ainda é matéria controvertida e sujeita a decisões do Governo Federal. Os especialistas sugerem que esses modelos tenham uma participação ao redor de 15% do mercado. O que ninguém discute é a permanência do álcool anidro misturado à gasolina na proporção de 22%, já consolidada em lei federal. Uma gasolina reformulada, testada e aprovada em larga escala. Neste caso, o "combustível verde" cumpriu integralmente seu papel de melhoria do meio ambiente, de reserva estratégica e de desenvolvimento de novas técnicas (UDOP, 2004).

O estabelecimento do Programa Brasileiro do Álcool Combustível em 1975 tinha como pressuposto a possibilidade técnica de se aumentar a produção de álcool para atender às novas necessidades de combustível, sem prejuízo da fabricação de açúcar, produto essencial à economia brasileira. E também a preços condizentes com os parâmetros do mercado, gerados por melhor tecnologia e maior produtividade. O desafio foi inteiramente vencido, pois o esforço tecnológico desenvolvido para o álcool beneficiou também a produção do açúcar brasileiro, que se tornou competitivo no mercado mundial. O avanço mostrou-se especialmente notável em São Paulo, onde os custos de produção são atualmente os menores do mundo. Como a produção do álcool e do açúcar não apresenta diferença na fase agrícola e tem acentuada semelhança na fase industrial, os avanços tecnológicos beneficiaram igualmente os dois produtos. Os ganhos de produtividade têm sido constantes. Segundo a Fundação Getúlio Vargas, uma conceituada instituição brasileira dedicada a pesquisas e estudos econômicos, a queda dos custos de produção do álcool na região Centro-Sul desde o início do programa foram em média de 3,2% ao ano. No Nordeste, ficaram em torno de 1,9% por ano. Na base desses resultados estão os esforços desenvolvidos pelo próprio Governo Federal, com a criação do Programa Nacional do Melhoramento da cana-de-açúcar (Planalsucar), em 1981 e pelo Centro de Tecnologia Copersucar (CTC), instalado na cidade paulista de Piracicaba. Voltado desde sua fundação, em 1979, para a pesquisa de técnicas, processos e métodos ligados à cultura da cana e à produção de açúcar e álcool, o CTC aplica US\$ 25 milhões por ano

em pesquisas, sendo US\$ 16 milhões provenientes de contribuições diretas das 36 maiores usinas paulistas e US\$ 9 milhões da venda de tecnologia e de royalties. Esforços de pesquisa semelhantes foram desenvolvidos por universidades estaduais e federais brasileiras. Além da melhor tecnologia de cultivo, as pesquisas levaram ao desenvolvimento das variedades da cana-de-açúcar utilizadas na região Centro-Sul. Elas têm sido responsáveis por um crescimento da produtividade dos canaviais entre 15% e 20% nos últimos anos. Atualmente, os pesquisadores paulistas concentram esforços no campo da biologia molecular, com o objetivo de acelerar o processo de seleção de variedades de cana-de-açúcar mais eficientes.

As usinas estão extraindo cada vez mais açúcar da cana-de-açúcar processada. O índice de extração de açúcar, que era de 89%, alcança hoje 97%. Paralelamente, disseminou-se a técnica de queima de bagaço para produção de energia, tornando 95% das usinas do estado de São Paulo auto-suficientes em eletricidade. Parte dessa energia já é inclusive direcionada para a rede elétrica estadual. Dentro de dez anos, com a incorporação de nova tecnologia já disponível, as usinas paulistas poderão fornecer até 3.000 MW de energia, um terço de todo o adicional que São Paulo irá necessitar. A venda de energia não será um mero subproduto, mas um terceiro grande negócio de dimensões comparáveis aos do açúcar e do álcool. A outra grande vertente tecnológica criada pelo programa refere-se à melhoria do desempenho dos motores a álcool. Os estudos permanentes mostraram que, além de vários ajustes, algumas peças importantes teriam de ser redimensionadas para trabalhar no regime de compressão mais elevada exigido pelo motor a álcool. Ainda assim persistiram alguns problemas menores. Durante vários anos, os consumidores queixavam-se de dificuldades nas partidas a frio, da maior corrosão de algumas peças e de eventuais impurezas no combustível. Mas todos esses defeitos foram corrigidos com o tempo e hoje os motores a álcool desenvolvidos no Brasil tem excelentes desempenhos comparativos, chegando mesmo a superar as versões a gasolina. Um passo decisivo foi dado nos últimos anos com o desenvolvimento da injeção eletrônica para carros a álcool, que eliminou os problemas apresentados pelo velho carburador.



Em que medida essa evolução favorável influiu na imagem que os consumidores brasileiros fazem do carro a álcool? Em 1995, a Associação das Indústrias de Açúcar e Alcool do Estado de São Paulo encomendou uma pesquisa ao Instituto Gallup de Opinião Pública. Foram ouvidas 1.084 pessoas na capital paulista e em 34 cidades do estado, sendo 552 automobilistas particulares, 323 taxistas e 209 mecânicos. Na eventual compra de um automóvel novo, 23,7% declararam preferir modelo a álcool e 58,3% a gasolina, sendo que os 18% restantes não tinham preferência. Esses números contrariam a afirmação corrente segundo a qual "o mercado não quer carro a álcool". A respeito da política do álcool em geral, 72% discordam que é melhor importar petróleo do que aumentar a produção de álcool e 74,9% concordam com maior estímulo à fabricação de carros a álcool. Para 71,1% é bom ter financiamento e redução de impostos para carros usados a álcool. O álcool é estrategicamente mais importante para o Brasil do que a gasolina, segundo 81,7% dos entrevistados. E ainda: 43,5% de todos os entrevistados acham que o carro a álcool gera mais empregos no país que os carros a gasolina; 66,3% acreditam que ele é mais importante para a economia do país e 75,9% acham que o carro a gasolina polui mais. Observa-se, assim, uma notável coincidência entre a opinião dos consumidores sobre as vantagens do álcool e as conclusões dos estudos especializados a partir de dados econômicos, sociais e ambientais (UDOP, 2004).

Nos 20 anos de existência do programa foram investidos US\$ 11,73 bilhões na produção do "combustível verde", a maior parte dos quais como capital de risco dos empresários. Dessa parceria entre a vontade política do Estado e a eficiência da iniciativa privada, o resultado que primeiro se destaca é a economia de divisas. Considerando-se a gasolina que deixou de ser importada nesse período, o país já havia economizado mais de US\$ 27 bilhões em dezembro de 1994. Igualmente importante, no entanto, foi o estabelecimento de um gigantesco "agribusiness" canavieiro, cuja prosperidade se tornou fundamental para a economia brasileira e para a melhoria das condições sociais no campo. Isso é verdadeiro para os estados produtores do Nordeste, mas também para os do Centro-Sul e especialmente São Paulo, onde se origina 65% da produção nacional de álcool. São Paulo também

produz 56% do total de açúcar brasileiro. Ali estão 150 agroindústrias e 11 mil agricultores (das 380 unidades industriais e cerca de 60 mil produtores rurais envolvidos com o setor no Brasil), ocupando 2,3 milhões de hectares ou 13,3% da área cultivada. Na safra 1996/97 o faturamento do setor sucroalcooleiro paulista está estimado em US\$ 5 bilhões. As cifras se elevam ainda mais se, em vez do faturamento, utilizarmos o conceito de "agribusiness" que engloba todas as operações necessárias ao ciclo de produção. A região Centro-Sul soma um movimento de cerca de US\$ 6 bilhões, sendo 7% relacionados à produção agrícola; 13,5% à produção industrial; e 26% referentes à arrecadação de impostos, sem considerar a utilização do bagaço (UDOP, 2004).

São os números de empregos, entretanto, que exprimem a importância social do setor. Uma das características notáveis da atividade relacionada à produção do açúcar e do álcool está na sua capacidade de absorção de mão-de-obra. O investimento por emprego é de apenas US\$ 11 mil contra US\$ 91 mil na indústria automobilística ou US\$ 22 mil na química e petroquímica. Em todo o país, a indústria canavieira emprega diretamente um milhão de pessoas, das quais 400 mil apenas em São Paulo. E o que é excepcional em áreas rurais: 95% desses trabalhadores paulistas possuem carteira assinada, com todos os direitos da legislação trabalhista, representando 40% do emprego rural. Se contarmos também os empregos indiretos, chegaremos a 1,2 milhão, apenas em São Paulo. A maior parte desse contingente teria grandes dificuldades de emprego em outras atividades face à realidade de sua formação profissional. O setor sucroalcooleiro é ainda o único na economia brasileira regido por legislação específica que direciona uma porcentagem do valor da produção para ser aplicada em assistência social aos seus trabalhadores. Dificilmente se poderia aquilatar o valor social desses empregos. Mas é evidente que ao fixar o homem no campo eles ajudam a conter o fluxo migratório para as grandes cidades brasileiras. A indústria da cana-de-açúcar apresenta assim vantagens sociais que, mesmo se ignoradas nos demonstrativos puramente contábeis, são essenciais quando se procura estabelecer comparações entre o preço do álcool e o da gasolina (UDOP, 2004).

Nos invernos passados, os níveis de poluição medidos na cidade de São Paulo se agravaram de tal maneira que novamente foram tomadas medidas restritivas para a circulação de veículos. Principais culpados: os motores dos automóveis que, segundo a agência ambiental do estado, são responsáveis pela emissão de 90% do monóxido de carbono que contamina o ar da cidade. Além de causar a multiplicação de doenças respiratórias, a poluição dos automóveis é responsável por grande parte de transtornos ecológicos, como o aumento da intensidade do efeito estufa. Atualmente, o Brasil consome cerca de 540 mil barris/dia de combustível do ciclo Otto (gasolina e álcool). O álcool representa 50% do total, o que permite avaliar a contribuição desse combustível na redução da poluição dos grandes centros urbanos. Sob esse ponto de vista ambiental, são pacificamente reconhecidas às vantagens do álcool, seja quando empregado isoladamente sob a forma de álcool hidratado, seja quando misturado à gasolina sob forma de álcool anidro. Em ambos os casos apresentam imensa vantagem de reduzir a emissão de monóxido de carbono e de dispensar o emprego do chumbo tetraetila como aditivo, um dos elementos mais tóxico no ar das grandes cidades. Graças ao álcool, o Brasil não contribui para o aumento do efeito estufa e foi o primeiro país no mundo a se livrar do chumbo tetraetila. Além dessa vantagem, o álcool combustível propicia redução na emissão de poluentes primários e também redução considerável nas chamadas emissões poluidoras reativas. O mais surpreendente, no entanto, é verificar um saldo final positivo na produção de álcool. A ação do cultivo de cana-de-açúcar chega a absorver o equivalente a quase um quinto da emissão total de carbono resultante da queima de combustíveis fósseis no Brasil, ou seja, uma redução de 39 milhões de toneladas de CO₂ por ano. A poluição provocada pelas usinas diminuiu drasticamente desde que se passou a aproveitar o bagaço da cana como combustível, o vinhoto e a torta de filtro como fertilizante, evoluindo ambos da categoria de resíduos à de valiosos insumos. Em termos gerais, portanto, o álcool gera uma energia cada vez mais "limpa", característica invejável e cada vez mais atrativa num mundo onde cresce a preocupação com o total de poluentes emitidos. Há mais de 20 anos, a primeira Conferência Mundial sobre Meio Ambiente patrocinada pela ONU determinou como condição da boa convivência internacional o estabelecimento de uma relação mais equilibrada



do homem com o meio ambiente. Desde então, a procura desse equilíbrio tornou-se uma tendência irreversível em todo o Planeta. Alguns países já criaram impostos sobre a emissão de CO₂. Uma série de mecanismos permitirá que as quantias assim arrecadadas sejam investidas em projetos que contribuam para diminuir o total de gás emitido. O álcool, pela sua contribuição positiva à questão ambiental, poderá ser beneficiado por mecanismos semelhantes.

A utilização em larga escala do álcool combustível no Brasil nasceu como um Programa do Governo, dentro de uma estratégia para se buscar uma maior independência diante do petróleo importado. Para isso, o governo instituiu parceria com o setor privado e nesses moldes o programa se desenvolveu, tornando-se um sucesso social, ambiental e tecnológico. Com o álcool, o Brasil teve ótimas razões para respirar aliviado. Primeira: auto-suficiência em combustíveis. Segunda: o ar ficou menos poluído. Terceira: a geração de milhares de empregos. A crise momentânea de competitividade do álcool, face aos baixos preços internacionais do petróleo, pode ser contornada para que não se jogue fora um patrimônio da sociedade e que certamente ainda trará muitos dividendos ao país. Especialmente porque os preços relativos dos energéticos devem refletir não apenas os seus custos privados de produção mas também todos os custos e benefícios sociais e ambientais envolvidos em sua produção e uso. A experiência do Programa Brasileiro do Álcool Combustível é um dos principais modelos de desenvolvimento sustentável no Brasil e com certeza é a maior contribuição mundial em combustíveis líquidos a partir da biomassa. E hoje, vários países do mundo estão atentos ao filão de negócios e às vantagens ambientais representados pela biomassa energética, do qual o álcool representa a fatia mais testada e já aprovada como substituto limpo e renovável da energia derivada do petróleo.

2.3. Subprodutos da cana se tornaram fonte de receita

Os subprodutos da cana ganham a atenção do mercado e chegam até mesmo a ameaçar a importância dos produtos principais, o açúcar e o álcool. A

energia cogenerada a partir da queima do bagaço de cana é vista como alternativa à ameaça de desabastecimento e atrai o interesse de distribuidores internacionais. Já os resíduos de produção - como a vinhaça e a torta de filtro - têm sido cada vez mais utilizados como fertilizantes com bons resultados para a agricultura.

As vantagens nutricionais da vinhaça e da torta de filtro são conhecidas há várias décadas e algumas unidades de produção já os utilizam desde a década de 70, mas o uso destes subprodutos aumentou sensivelmente em 1999, quando houve a mudança cambial e os adubos químicos encareceram. Segundo o pesquisador Aílto Antonio Casagrande, professor da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista (Unesp) de Jaboticabal, as usinas buscam agora racionalizar o uso e melhorar o aproveitamento dos subprodutos para reduzir a utilização de adubos químicos. O professor afirma que o Brasil é o país mais desenvolvido na utilização dos subprodutos da cana na lavoura.

A vinhaça é um resíduo do processo de destilação, fonte rica em potássio e que também tem cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes. Cada litro de álcool fabricado gera outros 13 litros de vinhaça com diferentes teores de potássio de acordo com a origem. O produto originário do melaço, resíduo da fabricação do açúcar, possui uma concentração de quatro a oito vezes maior do que a gerada na fabricação de álcool. Casagrande explica que o produto era inicialmente despejado nos rios, poluindo os cursos d'água. Apesar do valor nutricional do produto ser conhecido desde a década de 50, uma das primeiras unidades a utilizar a vinhaça na adubação foi a Usina da Pedra, de Serrana, em 1974 (UDOP, 2004).

Na mesma época, começou a ser utilizada a torta de filtro, mistura de bagaço moído e lodo da decantação. Hoje, o modo de aplicação do produto é testado de diferentes formas nas unidades de produção, desde a aplicação da área total até nas entrelinhas ou nos sulcos de plantio. Casagrande ressalta que a torta de filtro é um adubo orgânico que proporciona resultados espetaculares. O produto é rico em fósforo, além de ser fonte de cálcio, magnésio, enxofre e micronutrientes. "Além dos benefícios à agricultura, a

grande vantagem da utilização desses resíduos é retornar ao solo o que a planta extraiu", explica o professor da Unesp.

Pesquisas em usinas da região de Ribeirão Preto apontam que as diferentes técnicas de substituição de adubos químicos proporcionam uma economia média de US\$ 60 por hectare. Além da redução nos custos de plantio, o aproveitamento dos resíduos foi responsável por reduzir a poluição ambiental, já que os produtos eram anteriormente despejados nos rios. A utilização de vinhaça e torta de filtro foi um dos fatores responsáveis por colocar a Companhia Energética Santa Elisa em situação de destaque na pesquisa realizada pelo economista cubano Manuel Valdés Borrero em sua tese de doutorado na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O trabalho analisou impactos ambientais em três usinas - além da Santa Elisa, foram analisadas a São José Rio das Pedras, de Piracicaba, e a Ester, de Cosmópolis - entre os anos de 1987 e 1997. O objetivo do trabalho foi criar uma metodologia para analisar os impactos.



3. Cogeração

3.1. Biomassa

Através da fotossíntese, as plantas capturam energia do sol e transformam em energia química. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são usadas para produzir energias usando este processo são chamadas de biomassa.

Os combustíveis mais comuns da biomassa são os resíduos agrícolas, madeira e plantas como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia. O lixo municipal pode ser convertido em combustível para o transporte, indústrias e mesmo residências.

Os recursos renováveis representam cerca de 20% do suprimento total de energia no mundo, sendo 14% proveniente de biomassa e 6% de fonte hídrica. No Brasil, a proporção da energia total consumida é cerca de 35% de origem hídrica e 25% de origem em biomassa, significando que os recursos renováveis suprem algo em torno de 2/3 dos requisitos energéticos do País (ÚNICA, 2004).

Em condições favoráveis a biomassa pode contribuir de maneira significativa para com a produção de energia elétrica. É estimado que com a recuperação de um terço dos resíduos disponíveis seria possível o atendimento de 10% do consumo elétrico mundial e que com um programa de plantio de 100 milhões de hectares de culturas especialmente para esta atividade seria possível atender 30% do consumo.

A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também outros países. Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa.



No Brasil cerca de 30% das necessidades energéticas são supridas pela biomassa sob a forma de:

- Lenha para queima direta nas padarias e cerâmicas.
- Carvão vegetal para redução de ferro gusa em fornos siderúrgicos e combustível alternativo nas fábricas de cimento do norte e do nordeste.
- No sul do país queimam carvão mineral, álcool etílico ou álcool metílico para fins carburantes e para indústria química.
- O bagaço de cana e outros resíduos combustíveis são utilizados para geração de vapor para produzir eletricidade, como nas usinas de açúcar e álcool, que não necessitam de outro combustível, pelo contrário ainda sobra bagaço para indústria de celulose.

3.2. Cogeração no Setor Sucroalcooleiro

Entre os subprodutos da cana, o que tem recebido maior atenção nos últimos anos é o bagaço, principalmente devido à sua utilização como fonte de energia. As usinas são auto-suficientes na geração de energia e muitas têm feito investimentos para fornecer o excedente para comercializadoras de energia.

O processo de cogeração corresponde à geração simultânea de energia térmica e mecânica, a partir de uma mesma fonte primária de energia. A energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho (como por exemplo, o acionamento de moendas numa usina de açúcar e álcool) ou transformada em energia elétrica através de gerador de eletricidade. O combustível utilizado na cogeração pode ser petróleo, gás natural, carvão ou biomassa.

O uso do bagaço da cana como fonte de energia faz parte da história do setor. No entanto, a busca pelo aproveitamento dessa fonte faz parte da



história recente. Nos anos 70, as caldeiras queimavam bagaço com uma eficiência da ordem de 68% 70%, com baixa pressão e baixo aproveitamento térmico. Na época, a energia elétrica era subsidiada pelo governo, e o seu preço baixo permitia a sua compra para as usinas, mas não havia qualquer incentivo para a geração de energia, nem legislação que desse respaldo à atividade.

Esse quadro foi mudando nas últimas décadas e, em meados dos anos 90, o setor já era auto-suficiente devido a cogeração, com algumas usinas possuindo equipamento de alta pressão, com maior aproveitamento térmico. Afinal, cada tonelada de cana tem potencial energético equivalente a 1,2 barril de petróleo e produz 280 kg de bagaço.

Esse ganho de eficiência ocorreu em boa hora, uma vez que, em 2001, o abastecimento de eletricidade corria risco de colapso, após dois anos de seca reduzirem os reservatórios das usinas hidrelétricas. Assim, as usinas do Centro-Sul - que vai do Paraná ao Mato Grosso - puderam dar sua contribuição, uma vez que o fornecimento de energia excedente coincide com o período da seca na região.

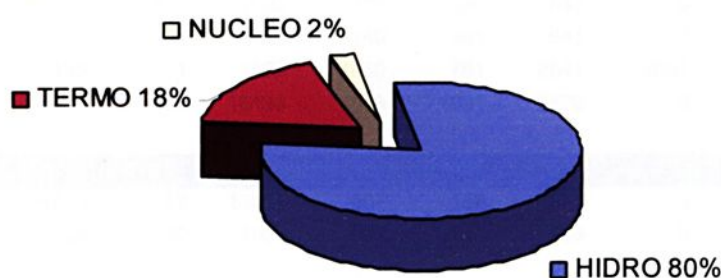
No Estado de São Paulo, o setor sucroalcooleiro gera para consumo próprio entre 1.200 e 1.500 megawatts (MW), cerca de 40 usinas produzem excedentes de 158 MW e a luz que vem da cana já ajuda a iluminar diversas cidades. O potencial de geração de energia da agroindústria canavieira está em torno de 12 mil MW a potência total instalada no Brasil é de 86.505MW. Em 2002, em função de novos projetos, mais 300 MW devem ser adicionados e em curto prazo o setor poderá contribuir com 4 mil MW adicionais (ÚNICA, 2004).

Tabela III.1 – Dados Potência Instalada Biomassa

Combustível	Quantidade	Potência (kW)	%
Resíduos de Madeira	13	80.352	2,98
Bagaço de Cana de Açúcar	188	1.844.394	68,42
Casca de Arroz	3	14.400	0,53
Licor Negro	12	756.710	28,07
Biogás	1	30	-
Total	217	2.695.886	100,00

Fonte: Apresentação MME – UNICA 16/04/2004

Atualmente no Brasil temos uma matriz elétrica extremamente hidráulica onde cerca de 80% da capacidade instalada é composta por hidrelétricas e somente 18% deste potencial é térmico, dentro dessa fatia de geração térmica somente 2,3% é obtida através da cana-de-açúcar que representa quase 70% de toda a geração realizada pela Biomassa como mostra a Tabela III.01 e a Figura III.01.

Capacidade Instalada de Geração Elétrica do Brasil**Figura III.01 – Potência Instalada no Brasil por Fonte**

Abaixo temos a distribuição da potência instalada no País por estado e fonte, pode-se notar que o estado de São Paulo apresenta a maior potência instalada em termelétricas APE (Autoprodutor) confirmando seu grande potencial energético com combustíveis renováveis.

Tabela III.02 – Instalações Energéticas

CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA (MW)										
ESTADOS	HIDRO			TERMO			NUCLEO		TOTAL	
	SP	APE	TOTAL	SP	APE	TOTAL	SP	APE	TOTAL	
BRASIL	66586	1206	67792	11693	5013	16705	2007	80286	6218	86505
NORTE	6729	39	6768	2243	156	2399	0	8972	195	9167
Rondônia	238	10	248	663	0	663	0	901	10	911
Acre	0	0	0	200	0	200	0	200	0	200
Amazonas	253	29	282	1024	24	1048	0	1277	53	1330
Roraima	5	0	5	139	0	139	0	144	0	144
Para	5196	0	5196	73	132	205	0	5269	132	5401
Amapá	68	0	68	143	0	143	0	211	0	211
Tocantins	969	0	969	1	0	1	0	970	0	970
NORDESTE	10280	26	10306	2546	639	3185	0	12827	665	13491
Maranhão	113	0	113	1	17	18	0	114	17	130
Piauí	113	0	113	52	0	52	0	165	0	165
Ceara	4	0	4	1028	18	1046	0	1032	18	1050
Rio G.do Norte	0	0	0	141	7	148	0	141	7	148
Paraíba	4	0	4	18	37	55	0	22	37	59
Pernambuco	750	5	755	252	18	270	0	1002	23	1025
Alagoas	3712	0	3712	215	70	285	0	3927	70	3997
Sergipe	1500	0	1500	93	5	98	0	1593	5	1598
Bahia	4085	21	4106	746	466	1212	0	4831	487	5319
SUDESTE	22170	854	23025	3090	3612	6702	2007	27268	4466	31734
Minas Gerais	11130	373	11502	522	420	942	0	11652	792	12444
Espírito Santo	165	25	190	140	501	641	0	305	526	831
Rio de Janeiro	1139	1	1139	1880	761	2641	2007	5026	761	5787
São Paulo	9737	456	10193	548	1931	2479	0	10286	2386	12672
SUL	18662	154	18816	2885	430	3315	0	21548	583	22131
Paraná	14506	97	14603	507	158	665	0	15013	255	15268
Santa Catarina	1526	30	1556	858	111	969	0	2384	140	2524
Rio G.do Sul	2631	27	2657	1520	161	1681	0	4151	188	4339
C. OESTE	8744	133	8878	927	177	1104	0	9671	310	9981
Mato G.do Sul	2539	0	2539	210	10	219	0	2749	10	2759
Mato Grosso	1175	130	1305	604	76	680	0	1779	207	1986
Goiás	5004	3	5007	103	91	194	0	5107	94	5201
D. F.	26	0	26	10	0	10	0	36	0	36

Fonte: Ministério de Minas e Energia – Dados: 2004.

SP – Serviço Público APE – Autoprodutor

Na Figura III.02 podemos ver mais claramente a contribuição energética do setor sucroalcooleiro, destacando novamente a região Sudeste.

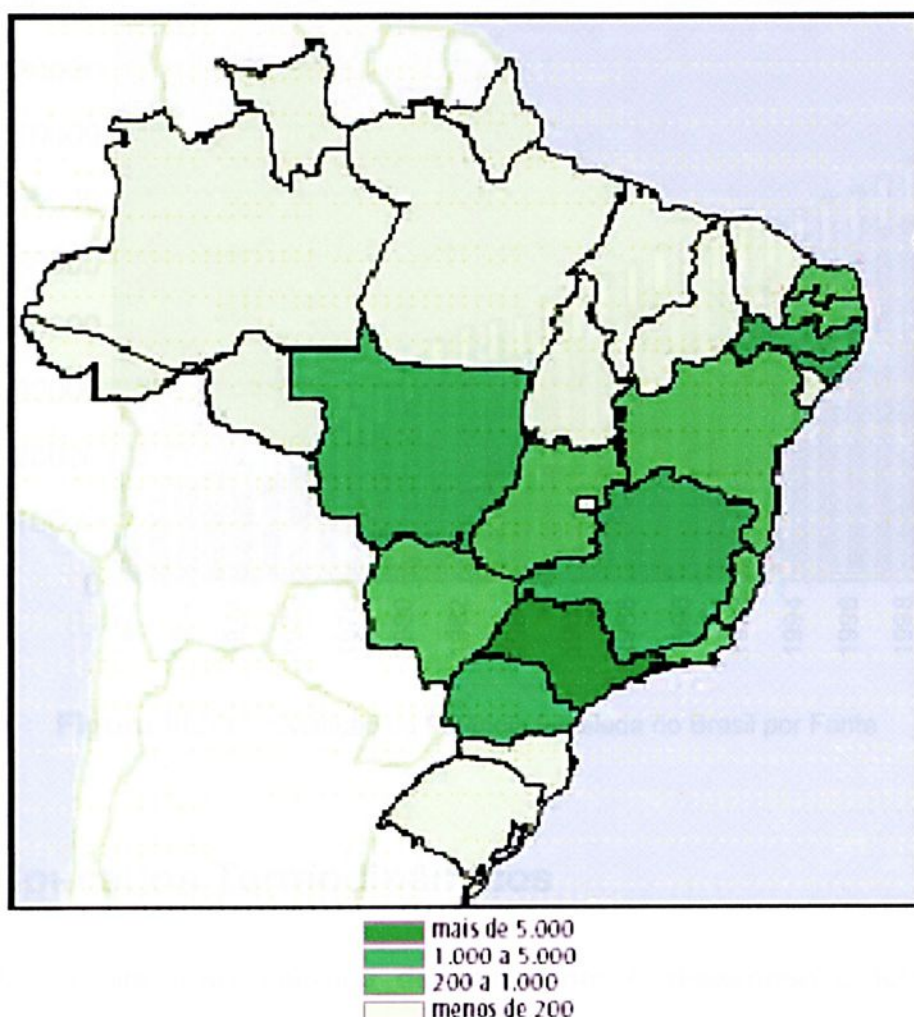


Figura III.02 – Potencial de Geração de Energia por Região GWh/ano (Fonte: Apresentação MME – UNICA 16/04/2004)

A Figura III.03 mostra a evolução da potência instalada no País de 1970 até 2002. Esta evolução apresenta um crescimento médio de 6,6% a.a. chegando a atingir picos de 18%. Nota-se que este índice se mantém praticamente constante para as fontes hídricas e térmicas.

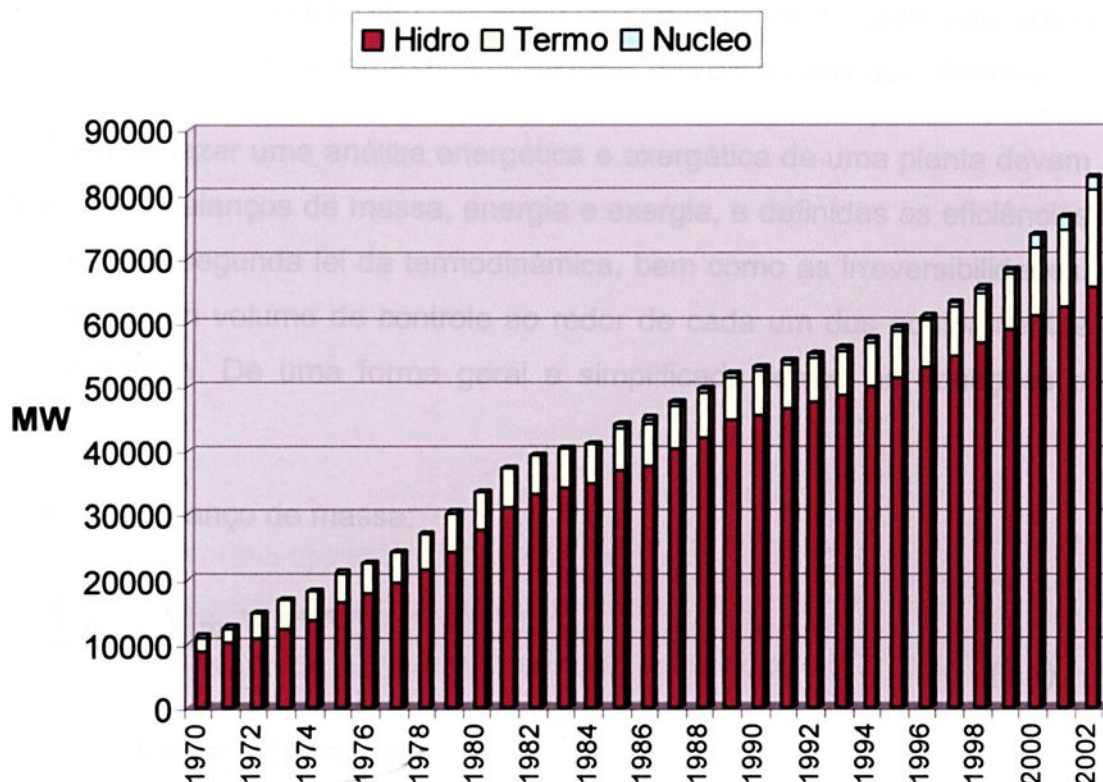


Figura III.03 – Evolução da Potência Instalada no Brasil por Fonte

3.3. Conceitos Termodinâmicos

A maneira mais clássica de determinar o desempenho térmico de sistemas é através da utilização da primeira lei da termodinâmica (Horlock, 1997). Tal análise permite definir, sob o ponto de vista da energia, qual é o desempenho de cada equipamento, assim como o desempenho global do sistema.

Apesar de muito difundida, esta metodologia tem suas limitações, pois não contabiliza a qualidade da energia, ou seja, não se preocupa com as irreversibilidades inerentes de todos os processos. Para que se possa considerar este aspecto é necessário o uso conjunto da segunda lei da termodinâmica, através de uma análise exergética (Kotas, 1995). Esta forma de avaliação não substitui as avaliações feitas na base da eficiência energética, mas sim as complementa, permitindo o cálculo tanto do valor termodinâmico de

um fluxo, em termos do trabalho mecânico que poderia ser extraído dele, como das ineficiências e perdas termodinâmicas reais dos processos dos sistemas.

Para se fazer uma análise energética e exergética de uma planta devem ser realizados balanços de massa, energia e exergia, e definidas as eficiências pela primeira e segunda lei da termodinâmica, bem como as irreversibilidades, considerando um volume de controle ao redor de cada um dos equipamentos que a compõem. De uma forma geral e simplificada temos as equações a seguir:

- Balanço de massa:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m}_s - \sum_{i=1}^n \dot{m}_e = 0 \quad (3.1)$$

- Balanço de energia:

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e h_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s h_s = 0 \quad (3.2)$$

- Balanço de exergia:

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left(1 - \frac{T_0}{T_i} \right) - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_e ex_e - \sum_{i=1}^n \dot{m}_s ex_s = \dot{I}_{vc} \quad (3.3)$$

Onde:

- $\dot{m}_e$ - Fluxo de massa que entra no volume de controle (kg/s);
- $\dot{m}_s$ - Fluxo de massa que sai do volume de controle (kg/s);
- h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);
- h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);
- ex_e - Exergia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);
- ex_s - Exergia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);
- T_i - Temperatura superficial do volume de controle (K);
- T_s - Temperatura do fluido no estado de referência (K);
- $\dot{I}_{vc}$ - Taxa de irreversibilidade no volume de controle (kW);
- $\dot{Q}_{vc}$ - Fluxo de calor no volume de controle (kW);

$\dot{W}_{vc}$ - Potência referente ao volume de controle (kW).

As exergias específicas na entrada e saída de cada equipamento são calculadas, respectivamente, por:

$$ex_e = (h - h_o)_e - T_o(s - s_o)_e \quad (3.4)$$

$$ex_s = (h - h_o)_s - T_o(s - s_o)_s \quad (3.5)$$

Onde:

- h - Entalpia específica do vapor (kJ/kg);
- s - Entropia específica do vapor (kJ/kg · K);
- h_o - Entalpia da água para o estado de referência (104,86 kJ/kg);
- s_o - Entropia da água para o estado de referência (0,367 kJ/kg · K).

As eficiências pela primeira e segunda lei da termodinâmica são calculadas para cada equipamento, através de um conjunto de equações termodinâmicas clássicas, conforme segue abaixo.

- Eficiência pela primeira lei da termodinâmica (η):

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{m} \Delta h_{iso}} \quad (3.6)$$

- Eficiência pela segunda lei da termodinâmica (ψ):

$$\psi = \frac{\Delta h_{real}}{ex_e - ex_s} \quad (3.7)$$

Onde:

- Δh_{iso} - Diferença entre as entalpias de entrada e saída do equipamento, para processo isentrópico (kJ/kg);
- Δh_{real} - Diferença entre as entalpias de entrada e saída do equipamento (kJ/kg);
- $\dot{m}$ - Fluxo de massa (líquido ou vapor) no equipamento (kg/s).

No caso específico das caldeiras, as eficiências de primeira e segunda leis são calculadas respectivamente pelas seguintes equações:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} h_{\text{vapor}} - \dot{m}_{\text{água}} h_{\text{água}}}{\dot{m}_{\text{bag}} \text{PCI}_{\text{bag}}} \quad (3.8)$$

$$\Psi = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} \text{ex}_{\text{vapor}} - \dot{m}_{\text{água}} \text{ex}_{\text{água}}}{\dot{m}_{\text{bag}} \text{ex}_{\text{bag}}} \quad (3.9)$$

Onde:

h_{vapor} - Entalpia específica de vapor superaquecido na saída da caldeira (kJ/kg);

$h_{\text{água}}$ - Entalpia específica da água na entrada da caldeira (kJ/kg);

ex_{vapor} - Exergia específica de vapor superaquecido na saída da caldeira (kJ/kg);

$\text{ex}_{\text{água}}$ - Exergia específica da água na entrada da caldeira (kJ/kg);

$\text{ex}_{\text{bagaço}}$ - Exergia específica do bagaço da cana (kJ/kg);

$\dot{m}_{\text{vapor}}$ - Fluxo de massa de vapor superaquecido na saída da caldeira (kg/s);

$\dot{m}_{\text{água}}$ - Fluxo de massa de água na entrada da caldeira (kg/s);

$\dot{m}_{\text{bag}}$ - Fluxo de massa de bagaço consumido na caldeira (kg/s).

Para o cálculo da exergia específica do bagaço da cana é utilizada a equação apresentada por Szargut (1988), que leva em conta a correlação entre a exergia química e o poder calorífico inferior do combustível, considerando a relação entre as frações em massa de oxigênio e carbono, a composição elementar do combustível, e o conteúdo de cinza e de umidade, conforme segue:

$$\text{ex}_{\text{bag}} = \beta (\text{PCI}_{\text{bag}} + L_{\text{água}} Z_{\text{água}}) + \text{ex}_{\text{água}} Z_{\text{água}} \quad (3.10)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,2160(Z_{H_2}/Z_C) - 0,2499(Z_{O_2}/Z_C)[1 + 0,7884(Z_{H_2}/Z_C)] - 0,0450(Z_{N_2}/Z_C)}{1 - 0,3035(Z_{O_2}/Z_C)} \quad (3.11)$$

Onde:

β - Função das frações de massa dos componentes químicos do bagaço (%);

Z_i - Fração em massa dos diferentes elementos químicos (%);

$Z_{\text{água}}$ - Fração em massa de água no bagaço úmido (%);

PCI_{bag} - Poder Calorífico Inferior do bagaço (7.736 kJ/kg);

$L_{\text{água}}$ - Entalpia de vaporização da água (2.442 kJ/kg);

$ex_{\text{água}}$ - Exergia química da água líquida (50 kJ/kg).

Para avaliação dos processos são considerados diferentes critérios de desempenho globais do sistema baseados na primeira lei da termodinâmica (Horlock, 1997), tais como: eficácias térmicas e mecânicas, e o consumo específico de vapor e bagaço, sendo que os mais freqüentemente utilizados serão descritos a seguir.

- Fator de Utilização de Energia (FUE)

Representa a eficiência de primeira lei do sistema como um todo, sendo dado por:

$$FUE = \frac{\dot{W}_{\text{total}} + \dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{m}_{\text{bag}} PCI_{\text{bag}}} \quad (3.12)$$

- Índice de Poupança de Energia (IPE)

Refere-se à economia de energia de combustível obtida por sistemas de cogeração em comparação a plantas convencionais que produzem separadamente energia elétrica e térmica e é definido como:

$$IPE = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{bag}} PCI_{\text{bag}}}{\dot{W}_{\text{total}}/\eta_{\text{term_ref}} + \dot{Q}_{\text{útil}}/\eta_{\text{cald_ref}}} \quad (3.13)$$

- Índice de Geração de Potência (IGP)

Este parâmetro é definido com base no consumo de combustível destinado à produção de potência, através da seguinte equação:

$$IGP = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{m}_{bag} PCI_{bag} - \dot{Q}_{util} / \eta_{cald}} \quad (3.14)$$

- Razão Potência-Calor (RPC)

Representa a relação entre a potência total produzida e o calor utilizado no processo, sendo:

$$RPC = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{util}} \quad (3.15)$$

Onde:

$\dot{W}_{total}$ - Potência total (mecânica e elétrica) (kW);

$\dot{Q}_{util}$ - Potência térmica útil do sistema (evaporação e destilação) (kW);

η_{term_ref} - Eficiência térmica de uma planta de potência de referência (adotado 40%);

η_{cald_ref} - Eficiência térmica de caldeiras que produzem apenas vapor saturado (adotado 77%);

η_{cald} - Eficiência térmica das caldeiras da unidade.

A partir do cálculo destes parâmetros é possível identificar as vantagens/desvantagens de um sistema de cogeração em relação a outro.

A) Sistemas de Cogeração

No setor sucroalcooleiro o principal sistema de cogeração é aquele que emprega turbinas a vapor como máquinas térmicas e que aparece vinculado a três configurações fundamentais: turbinas de contrapressão, combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação que empregam o fluxo excedente e turbinas de extração-condensação. A condensação de uma parte

do vapor de escape, ou de uma extração de vapor de uma turbina de extração-condensação, garante as necessidades de energia térmica do sistema.

A Figura III.04 apresenta um esquema de processo trabalhando em regime de cogeração que emprega turbinas de contrapressão (Fiomari, 2004).

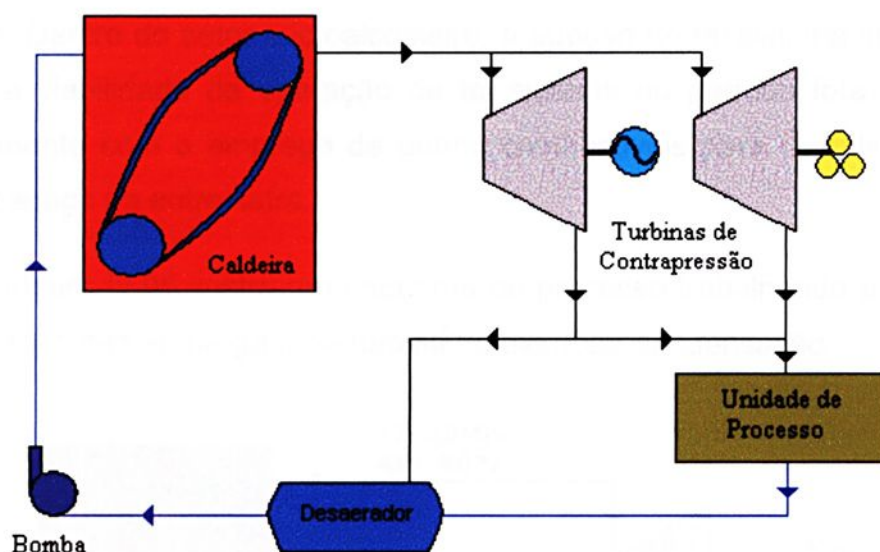


Figura III.04 – Diagrama de um sistema de cogeração com turbinas a vapor de contrapressão.

Às vezes uma mesma indústria precisa de vapor a distintos níveis de pressão, o que pode estar unido à necessidade de estabilizar o fornecimento da energia elétrica às concessionárias. Segundo Sánchez Prieto (2003), a solução adequada pode ser a combinação de turbinas a vapor de contrapressão com turbinas de condensação, estrutura que permite uma maior flexibilidade às entregas de energia elétrica e energia térmica para processo, ainda que o custo de duas turbinas seja maior do que o custo de uma, aliado ao fato da complexidade do ponto de vista operativo.

Quando o objetivo principal visa adequar a instalação para produção e venda de energia excedente, o uso de turbinas de extração-condensação é mais viável. Além de altos índices de desempenho, tais máquinas de condensação com extração regulada se justificam também pela sua capacidade de satisfazer a relação energia térmica e elétrica que pode variar em uma ampla faixa.

Este sistema, com maior capacidade de produção elétrica, possui normalmente turbinas de extração dupla, sendo a primeira, no nível de pressão em que o vapor é requerido pelas turbinas de acionamento mecânico, e a segunda, na pressão em que o vapor é consumido no processo produtivo. Comumente, o vapor de escape das turbinas de acionamento mecânico soma-se ao fluxo da segunda extração, visando satisfazer a demanda de vapor do processo. Dentro do setor sucroalcooleiro, a adoção de tal sistema implica em analisar a viabilidade de operação de tal sistema no período fora da safra, conjuntamente com o emprego de outros combustíveis para complementar a falta de bagaço na entre safra.

A Figura III.05 ilustra um esquema de processo trabalhando em regime de cogeração que emprega uma turbina de extração-condensação.

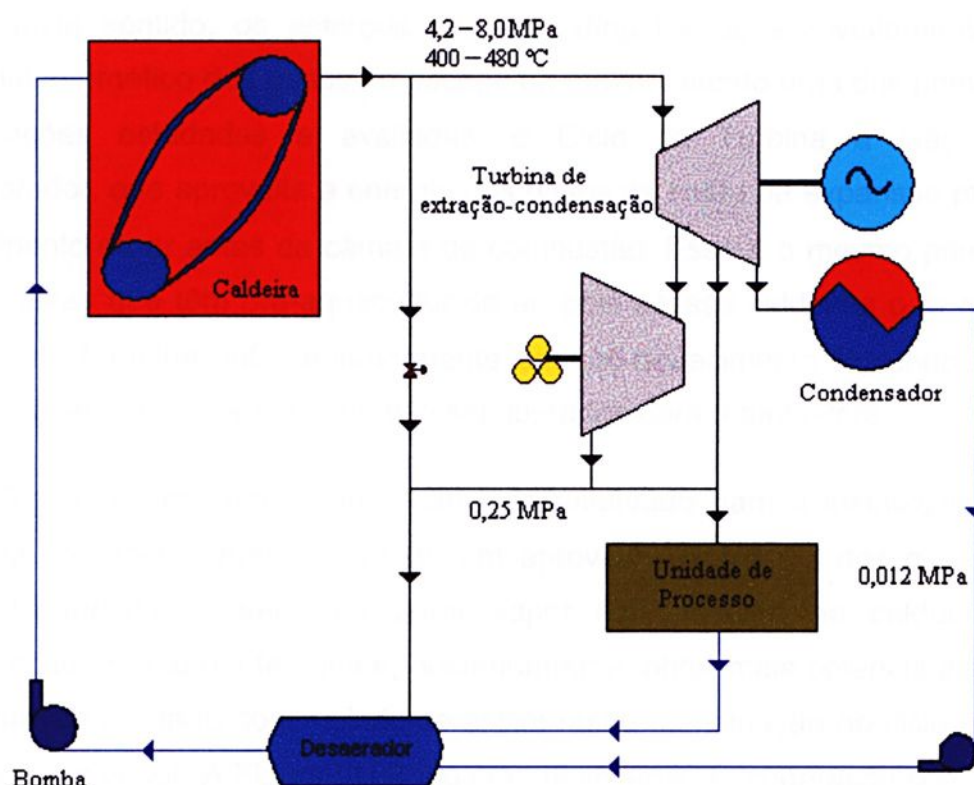


Figura III.05 –Diagrama de um sistema de cogeração com turbina a vapor de extração-condensação.

Por outro lado, turbinas a gás têm sido usadas nas áreas industrial e aeronáutica como elementos geradores de energia elétrica e/ou acionamento mecânico, assim como propulsores de aeronaves. A evolução tecnológica de

seus componentes implicou numa grande contribuição ao incremento da sua eficiência, que junto da disponibilidade crescente de gás natural a preços competitivos tem favorecido a implantação de sistemas de cogeração com turbinas a gás.

Os gases de escape carregam entre 60 e 80 % da energia primária que entra na turbina e constituem, de fato, a fonte de energia térmica fundamental nestes sistemas. Assim, as temperaturas relativamente altas (400 a 600 °C), o elevado conteúdo de oxigênio nos gases de saída (13 a 18 %), decorrente do excesso de ar usado na combustão e os baixos teores de gases poluentes com o emprego de gás natural como combustível, constituem o ponto de partida de algumas modificações feitas no ciclo padrão, visando acréscimos nos valores da eficiência térmica e/ou trabalho líquido (Sánchez Prieto, 2003).

Neste sentido, os esforços têm sido dirigidos ao aproveitamento do potencial energético dos gases de escape da turbina, sendo uma das primeiras modificações estudadas e avaliadas, o Ciclo de Turbina a Gás com Regenerador, que aproveita a energia dos gases na saída da expansão para o aquecimento do ar antes da câmara de combustão. Esse é o mesmo princípio das caldeiras que têm pré-aquecedor de ar, pois nessas caldeiras o ar que é injetado na fornalha sofre anteriormente um pré-aquecimento trocando calor com os gases de combustão que vão ser liberados para a atmosfera.

O termo “ciclo combinado” tem sido reservado para a instalação cuja essência de funcionamento consiste em aproveitar a energia dos gases de saída da turbina a gás para gerar vapor sob pressão na caldeira de recuperação de energia térmica e, posteriormente, obter mais potência elétrica numa turbina a vapor, constituindo-se assim numa combinação do ciclo a gás com o ciclo a vapor. A Figura III.06 mostra um sistema de cogeração com ciclo combinado.



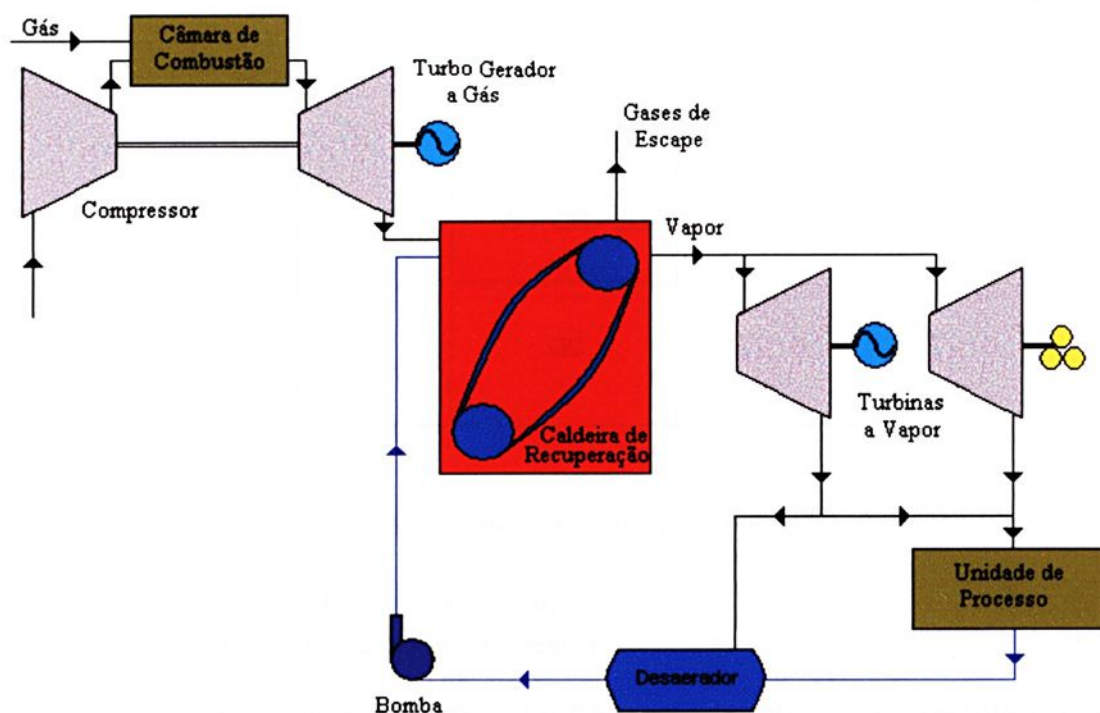


Figura III.06 – Diagrama de um sistema de cogeração com ciclo combinado de gás e vapor.

Quando o caso tratado é sem queima adicional, a concepção da caldeira de recuperação é geralmente mais simples. Os parâmetros do vapor gerado são funções diretas da vazão e temperatura dos gases na saída da turbina a gás.

Os ciclos que utilizam a combinação de gás e vapor podem sofrer algumas variantes. Uma delas é quando parte do vapor produzido na caldeira de recuperação é injetada na câmara de combustão da turbina a gás, facilitando as condições para criar uma mistura apropriada para obtenção de um efeito mais apreciável na redução das emissões de NO_x .

B) O ciclo de Carnot

Um ciclo ideal em que as transferências de calor para o fluido de trabalho se dão isotermicamente e, os processos de fornecimento de trabalho para o fluido se dão de forma adiabática reversível, (isentropicamente).

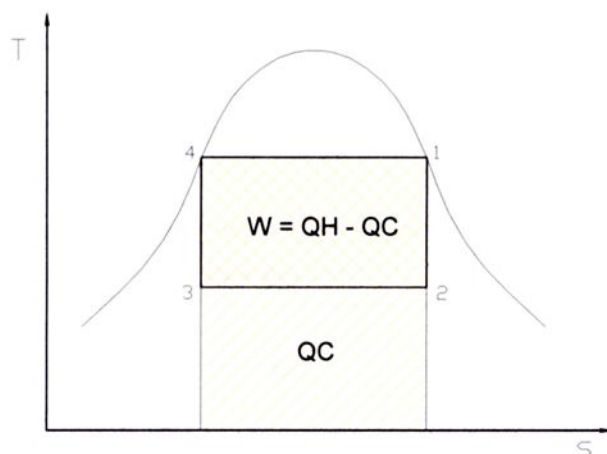


Figura III.07 – Ciclo de Carnot

- W - Energia Mecânica Gerada;
 Q - Energia Vapor de Processo;

Neste diagrama, a área sob um processo reversível representa o calor fornecido ao mesmo. As áreas indicadas representam as parcelas de energia consumida no processo e exportável. Observemos também que a energia exportável neste caso é exatamente o poder calorífico do bagaço multiplicado pela eficiência da caldeira, o que ilustra a enorme vantagem da cogeração.

C) O ciclo de Rankine

O ciclo de Rankine é um ciclo reversível ideal, mais próximo dos ciclos reais, que difere do ciclo de Carnot apenas no processo de transferência de calor ao fluido de trabalho, que possui uma parte não isotérmica. Pode ser visto como uma combinação de vários ciclos de Carnot.

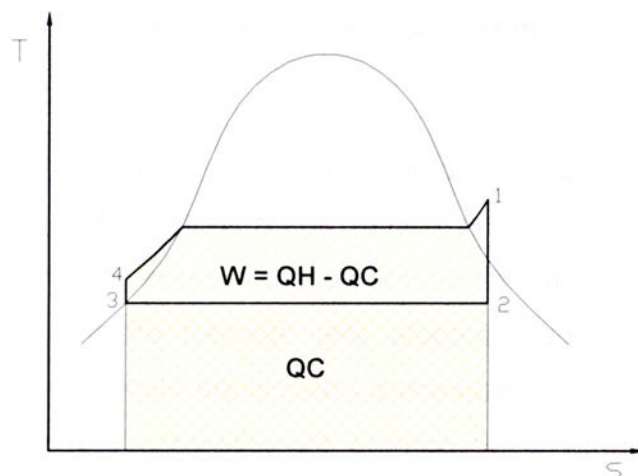


Figura III.07 – Ciclo de Rankine

3.4. Rendimento da Cogeração

O presente item tem por objetivo determinar critérios para calcular as quantidades de combustíveis correspondentes à eletricidade gerada nos processos de cogeração. Como já citado anteriormente entende-se por cogeração o aproveitamento combinado de vapor para geração de eletricidade, para força motriz e para aquecimento, ou seja, o vapor superaquecido em caldeiras passa por uma turbina acoplada a um gerador, gerando energia elétrica, e em seguida, o vapor resultante (vapor saturado) segue no processo industrial atendendo a outros usos motrizes e de calor, como por exemplo, em atividades de secagem, centrifugação, moagem, destilação, higienização, etc.

A cogeração se dá principalmente em autoprodutores industriais e produtores independentes de energia, já que estes, em geral, necessitam de eletricidade, força motriz e calor, entretanto, existem alguns países (com alto índice de geração termoeletrica) onde a cogeração é Pública, sendo o vapor saturado canalizado para uso nas cidades (comumente chamado de calor distrital).

Em geral, nos processos de geração mencionados, os dados de consumo de combustíveis e da respectiva eletricidade gerada são conhecidos,

sendo possível construir os balanços elétricos, com as entradas, saídas e perdas de transformação.

No caso da cogeração, apesar de ser um processo térmico a vapor, como o vapor após o turbogerador é aproveitado no processo industrial, há que se determinar a parcela de combustível queimado na caldeira que efetivamente gerou eletricidade. A outra parcela será alocada como consumo final da respectiva indústria. O cálculo equivocado destas parcelas pode comprometer, por exemplo, o consumo específico de energia de um determinado produto industrial, já que o consumo final pode estar subestimado ou sobreestimado.

A partir de dados reais, bem como a partir de uma configuração típica do fluxo de vapor de usinas de açúcar, propõem-se a seguir uma metodologia para o tratamento do assunto.

É importante ressaltar que esta metodologia é simplificada e apresenta resultados aproximados, conforme explicado na nota técnica da ANEEL (Patusco, 1993). A idéia básica da metodologia reside em se determinar o consumo adicional de combustível na cadeia, necessário para aumentar a pressão e superaquecer o vapor e, conseqüentemente, gerar eletricidade. Assim, o combustível resultante seria efetivamente aquele que a indústria necessitaria para produzir vapor saturado, caso toda eletricidade fosse comprada da rede de distribuição.

Os dados reais a serem coletados são:

p1	- pressão do vapor (superaquecido) antes da turbina
t1	- temperatura do vapor antes da turbina
p2	- pressão do vapor (saturado) após a turbina
t2	- temperatura do vapor após a turbina
C	- consumo de combustível na cadeia
E	- eletricidade produzida no gerador
y	- percentual de vapor que passa pelo turbogerador
n	- rendimento das caldeiras

Entrando com os dados de pressão e temperatura no diagrama de vapor é possível determinar as entalpias " h_1 " e " h_2 " do vapor, em kcal/kg, respectivamente, antes e depois da turbina.

A diferença das entalpias é que proporciona a geração de eletricidade. Assim esta diferença dividida pela entalpia antes da turbina dá um percentual que multiplicado por “y” (percentual de vapor que passa pelo turbogerador) e multiplicado por “C” (combustível total) permite chegar à parcela de combustível que efetivamente foi acrescida na caldeira para gerar eletricidade.

- Diferença de entalpias do vapor:

$$b = h_1 - h_2 \quad (3.16)$$

- % calorias de vapor para gerar eletricidade:

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad (3.17)$$

- Total de combustível acrescido na caldeira para gerar eletricidade:

$$d = C \times c \times y \quad (3.18)$$

Dividindo-se a eletricidade gerada “E” pelo combustível acrescido na caldeira obtém-se o rendimento de cogeração. É importante mencionar que segundo este critério o rendimento incorpora proporcionalmente as perdas na caldeira”.

- Rendimento na Cogeração:

$$n_c = \frac{E}{C \times c \times y} \quad (3.19)$$

Para se calcular apenas o rendimento do turbogerador (sem incluir as perdas na caldeira) Calcula-se o vapor em tonelada produzida na caldeira multiplicando o combustível total “C” pelo rendimento da caldeira “n” e dividindo o resultado pela entalpia do vapor antes da caldeira “h₁”.

$$n_T = \frac{C \times n}{h_1} \quad (3.20)$$

Multiplicando-se o total de vapor pelo percentual de vapor que passa pela turbina “y” e pela diferença de entalpias chega-se ao total de calorias utilizadas na geração de eletricidade”.

$$E_{ele} = \frac{C \times n}{h_1} \times y \times (h_1 - h_2) \quad (3.21)$$

Dividindo-se a eletricidade “E” pelo valor utilizado para geração determina-se o rendimento do turbogerador (sem incorporar as perdas na caldeira). Obviamente este rendimento vai ser maior na proporção direta do rendimento estimado para a caldeira”.

A Equação 3.18 determina a parcela de combustível que efetivamente vai para consumo final nos Balanços Energéticos e a Equação 3.22 determina a parcela de combustível que vai para o Centro de Transformação “Autoprodutores”.

$$C_p = C - (C \times c \times y) \quad (3.22)$$

3.5. Comercialização de Energia

A comercialização de energia é uma operação que teve início com o processo de privatização do setor de energia elétrica. Com a desregulamentação do setor, as empresas que se enquadraram nos requisitos especificados por lei passaram a ser denominadas Clientes Livres, podendo escolher o seu fornecedor de energia, considerando atributos como preços, produtos e qualidade dos serviços.

A) Regulamentação (Decreto 5.163/04)

O decreto 5.163/04 veio regulamentar a lei 10.848 de 2004 que inseriu algumas modificações no setor que permitirão a retomada dos investimentos na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O decreto detalha e especifica as providências necessárias para alcançar os objetivos abaixo propostos:



- Promover a modicidade tarifária;
- Garantir a segurança do suprimento; e
- Criar um marco regulatório estável.

Este decreto define dois ambientes de comercialização, Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL).

i) Ambiente de Contratação Regulada

É o ambiente no qual se realizam as operações de compra e venda de energia envolvendo as distribuidoras utilizando leilões para compra de energia elétrica, prevalecendo o critério de menor tarifa.

Os leilões deverão obedecer as seguintes formas de contratação:

- Leilões de energia proveniente de novos empreendimentos de geração;
- Leilões de compra de energia proveniente de empreendimentos existentes;
- Leilões de ajuste (nos quais também é adquirida energia proveniente de empreendimentos existentes).

Os vencedores de cada leilão de energia do ACR deverão firmar contratos bilaterais com todas as distribuidoras – denominados “Contratos de Comercialização de Energia em Ambiente Regulado”, CCEAR, em proporção às respectivas declarações de necessidade. A única exceção é o leilão de ajuste, onde os contratos são específicos entre agente vendedor e agente de distribuição.

ii) Ambiente de Contratação Livre

A contratação no ACL dar-se-á mediante operações de compra e venda de energia elétrica envolvendo os agentes concessionários, permissionários e



autorizados de geração, comercializadores, importadores, exportadores de energia elétrica e consumidores livres.

As relações comerciais entre os agentes no ACL serão livremente pactuadas e regidas por contratos bilaterais de compra e venda de energia elétrica, onde estarão estabelecidos, entre outros, prazos e volumes.

A comercialização de energia elétrica pelos agentes vendedores sob controle federal, estadual e municipal poderá ser realizada das seguintes formas:

- leilões exclusivos para consumidores finais ou por estes promovidos;
- oferta pública para atendimento à expansão da demanda de consumidores existentes ou a novos consumidores; e
- leilões, chamadas ou ofertas públicas junto a agentes vendedores e exportadores;

O contrato de compra e venda de energia elétrica deverá ser celebrado com o respectivo agente vendedor, o contrato de uso do sistema de transmissão deverá ser celebrado com o ONS, e o de conexão com a concessionária de transmissão no ponto de acesso, na hipótese de as instalações do consumidor estarem conectadas à rede básica; e os contratos de uso e de conexão deverão ser celebrados com agente de distribuição, na hipótese de as instalações do consumidor estarem conectadas à rede de distribuição desse agente.

B) PROINFA

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) é um instrumento para a diversificação da matriz energética nacional, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento. O Programa, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), estabelece a contratação de 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN),



produzidos por fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), sendo 1.100 MW de cada fonte.

Criado em 26 de abril de 2002, pela Lei nº 10.438, o PROINFA foi revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003, que assegurou a participação de um maior número de estados no Programa, o incentivo à indústria nacional e a exclusão dos consumidores de baixa renda do pagamento do rateio da compra da nova energia.

Ainda nos termos dessa Lei, o MME é responsável pela edição e publicação deste Guia de Habilitação e dos valores econômicos correspondentes a cada fonte, por meio da Portaria MME nº 45, de 30 de março de 2004. Este Guia de Habilitação visa orientar os interessados em participar do PROINFA, informando e listando os documentos necessários à habilitação dos projetos, os quais deverão ser apresentados à ELETROBRÁS, que é a responsável pela realização da Chamada Pública (ELETROBRÁS, 2004).

No caso específico da biomassa da cana, a regulamentação do PROINFA deixou muito a desejar. Embora esta fosse seguramente o maior potencial gerador dentro do PROINFA, ela acabou ficando em segundo plano, uma vez que ficou com a menor remuneração entre as fontes, apenas R\$ 93,77 por MW · h, sendo que as Pequenas Centrais Elétricas receberão R\$ 117,02 por MW · h; a energia eólica, entre R\$ 180,18 a R\$ 204,35 por MW · h; a biomassa do biogás de aterro sanitário, R\$ 169,08 por MW · h; e a biomassa da madeira, R\$ 101,35 por MW · h (Jardim, 2004) (Valores Base Março/2004).

Todos esses valores são válidos durante os 20 anos de contrato com a ELETROBRÁS e serão corrigidos anualmente a partir da data base do contrato pelo Índice Geral de Preços de Mercado (IGPM) estabelecido pela Fundação Getúlio Vargas (FGV), de acordo com o Parágrafo Único, Artigo 2º da Portaria MME nº 45. No caso de extinção do IGPM, o Ministério de Minas e Energia indicará um novo índice para correção dos valores econômicos correspondentes às tecnologias específicas da fonte, conforme rege o Parágrafo Único, Artigo 3º da Portaria MME nº 45.

Diante das dificuldades para conseguir financiamento por parte dos órgãos governamentais, como o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), por exemplo, muitos empresários do setor sucroalcooleiro decidiram investir por conta própria na ampliação de excedente de energia para vender para rede pública, mas a remuneração oferecida pelo PROINFA serviu como um dos fatores para o desestímulo ao empreendedorismo.

Essa realidade foi vivida pela Usina estudada que, a partir de 2002, passou a investir na expansão de seu sistema de cogeração visando à comercialização de excedentes de energia elétrica com as concessionárias. O projeto foi iniciado com recursos próprios, mas não foi concluído totalmente em 2004, em função da empresa não ter conseguido captar recursos e de não ter sido habilitada e selecionada na primeira chamada do PROINFA. Esta Usina foi selecionada e contratada pelo PROINFA apenas na segunda chamada pública, assinado o contrato com a ELETROBRÁS no dia 28 de dezembro de 2004.

O PROINFA contará com o suporte do BNDES, que criou um programa de apoio a investimentos em fontes renováveis de energia elétrica. A linha de crédito prevê financiamento de até 80% do investimento, excluindo apenas bens e serviços importados e a aquisição de terrenos. Os investidores terão que garantir 20% do projeto com capital próprio. As condições do financiamento serão TJLP mais 2% de spread básico e até 1,5% de spread de risco ao ano, carência de seis meses após a entrada em operação comercial, amortização por doze anos e não-pagamento de juros durante a construção do empreendimento.

A TJLP foi instituída pela Medida Provisória nº 684, de 31/10/1994, publicada no Diário Oficial da União em 03/11/1994, sendo definida como o custo básico dos financiamentos concedidos pelo BNDES. Posteriores alterações ocorreram através das Medida Provisória nº 1.790, de 29/12/1998, e da Medida Provisória nº 1.921, de 30/09/1999, convertida na lei nº 10.183, de 12/02/2001. O valor da TJLP é fixado periodicamente pelo Banco Central do Brasil, de acordo com as normas do Conselho Monetário Nacional e publicado nos jornais de grande circulação no país.

A Eletrobrás, no contrato de compra de energia de longo prazo (PPAs), assegurará ao empreendedor uma receita mínima de 70% da energia contratada durante o período de financiamento e proteção integral quanto aos riscos de exposição do mercado de curto prazo. Os contratos terão duração de 20 anos e envolverão projetos selecionados que devem entrar em operação até dezembro de 2006.

Com a implantação do PROINFA, estima-se que serão gerados 150 mil empregos diretos e indiretos durante a construção e a operação dos empreendimentos. Os investimentos previstos do setor privado são da ordem de R\$ 8,6 bilhões. Uma das exigências da Lei nº 10.762 é a obrigatoriedade de um índice mínimo de nacionalização de 60% do custo total de construção dos projetos. O Brasil detém as tecnologias de produção de maquinário para uso em PCHs e usinas de biomassa e está avançando na tecnologia eólica, com duas fábricas instaladas, uma no sudeste e outra no nordeste.

Os critérios de regionalização, previstos na Lei nº 10.762, estabelecem um limite de contratação por Estado de 20% da potência total destinada às fontes eólica e biomassa e 15% para as PCHs, o que possibilita a todos os Estados que tenham vocação e projetos aprovados e licenciados a oportunidade de participarem do programa. A limitação, no entanto, é preliminar, já que, caso não venha a ser contratada a totalidade dos 1.100 MW destinados a cada tecnologia, o potencial não-contratado será distribuído entre os Estados que possuírem as licenças ambientais mais antigas. Para participarem do Programa, os empreendimentos terão de ter licença prévia de instalação.

Em relação ao abastecimento de energia elétrica do país, o PROINFA será um instrumento de complementaridade energética sazonal à energia hidráulica, responsável por mais de 90% da geração do país. Na região Nordeste, a energia eólica servirá como complemento ao abastecimento hidráulico, já que o período de chuvas é inverso ao de ventos. O mesmo ocorrerá com a biomassa nas regiões Sul e Sudeste, onde a colheita de safras propícias à geração de energia elétrica (cana-de-açúcar e arroz, por exemplo) ocorre em período diferente do chuvoso.

A produção de 3,3 mil MW a partir de fontes alternativas renováveis dobrará a participação na matriz de energia elétrica brasileira das fontes eólica, biomassa e PCH, que atualmente respondem por 3,1% do total produzido e, em 2006, podem chegar a 5,9%.

No Brasil, 41% da matriz energética é renovável, enquanto a média mundial é de 14% e nos países desenvolvidos, de apenas 6%, segundo dados do Balanço Energético Nacional - edição 2003. A entrada de novas fontes renováveis evitará a emissão de 2,5 milhões de toneladas de gás carbônico/ano, ampliando as possibilidades de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto. O Programa também permitirá maior inserção do pequeno produtor de energia elétrica, diversificando o número de agentes do setor.

3.6. Bioeletricidade – Importância do Setor sucroalcooleiro

A) Considerações Gerais

A utilização da biomassa da agroindústria canavieira, em grande escala, para a geração de eletricidade (BioEletricidade) é considerada como um exemplo único em todo o mundo. A capacidade de geração de energia que já é utilizada ultrapassa 2.600 MW. O Setor Sucroalcooleiro tem ainda elevado potencial de biomassa para a geração de energia elétrica podendo representar uma importante participação na Matriz Energética Nacional proporcionando ganhos econômicos, sociais e ambientais (crédito de carbono, renda e empregos) e prestígio político para o setor elétrico e o Governo brasileiro (UNICA, 2004).



B) Considerações sobre a Biomassa da Cana e a BioEletricidade

Os principais atributos característicos da cana-de-açúcar que devem ser valorizados são:

- Cana-de-açúcar: cultura permanente; expansão sustentada; 350 milhões ton/ano – safra 2003/2004; 500 milhões ton/ano nos próximos anos; Brasil maior produtor mundial.
- Sazonalidade: definida; previsibilidade da produção; lastro físico para produção de energia.
- Logística de produção: bem distribuída; regiões econômicas; centro de demanda de energia.
- BioEletricidade: produzida em moeda nacional; por empresas brasileiras; energia elétrica para auto consumo; excedentes para comercializar; competitividade para indústria canavieira; sinergia com açúcar e álcool; projetos de pequena escala; tecnologia nacional dominada e competitiva; licenciamento ambiental facilitado; curto prazo para implantação e operação; baixas incertezas de planejamento e de riscos empresariais; fonte energética complementar da hidroeletricidade; resultado do trabalho e não de um potencial da natureza.
- Investimentos: racionaliza investimentos de transmissão; reduz custos e perdas de distribuição; diferencial entre as “fontes alternativas”; produção na “entressafra da hidraulicidade”; agrega valor à hidroeletricidade; amplia reserva de capacidade do sistema nacional interligado (lastro físico); experiência comprovada com 500MW de potência excedente comercializada.
- Impacto econômico-social: forte valor histórico e social; importante gerador de mão de obra; novas oportunidades de empregos.

- Impacto Ambiental: agrega valor ambiental; importante gerador de créditos de carbono; reconhecimento internacional.

C) Ações para a Inserção da BioEletricidade

i) Reconhecimento dos direitos e valores da BioEletricidade.

A BioEletricidade é produzida e injetada diretamente nas redes de distribuição de energia elétrica nos pontos de conexão com os clientes finais. Essa característica possibilita evitar perdas elétricas intrínsecas da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Além desses méritos, a instalação de produção de BioEletricidade, por ser realizada no curto prazo, possibilita o ajuste da oferta e demanda num cenário de incertezas quanto ao crescimento do consumo.

A BioEletricidade também pode ser considerada como um importante instrumento para o novo modelo do setor elétrico aprovado pela lei nº 10.848, de 15/03/2004 e que estabelece a obrigatoriedade das Distribuidoras contratarem 100% da demanda identificada na sua área de concessão, num prazo de 5 anos.

O prazo de construção de uma central de BioEletricidade com biomassa de cana, é de 18 a 24 meses, e isto possibilita o ajuste de eventuais desacertos entre a oferta e demanda, anulando eventuais incertezas em relação ao crescimento da carga prevista pelas Distribuidoras.

Essa importância poderá ser observada no Estado de São Paulo que tem 60% do potencial de produção de BioEletricidade já conectada nos sistemas de Distribuição, principalmente, da CPFL e da Elektro e, no entanto, o Estado de São Paulo importa de outras regiões do país cerca de 56% da energia elétrica que a sua economia demanda e, no horizonte de 2020 essa importação poderá chegar a 75% de energia gerada, principalmente da região Amazônica.

Podemos considerar que, caso não seja atribuída prioridade estratégica para a BioEletricidade potencial existente no Estado de São Paulo, os custos

de energia da principal região econômica do país poderá ser muito afetado pelo custo do suprimento de energia através de longas linhas de transmissão (mais de 3.000 km) com reflexos na qualidade do fornecimento que poderá ser fortemente condicionada aos fatores técnicos e operacionais de linhas de transmissão a longa distância.

ii) Otimizar e ampliar oferta de energia assegurada das hidrelétricas existentes com a produção da BioEletricidade no período seco.

A BioEletricidade incluída na base do planejamento energético nacional - por sua característica de produção sazonal previsível e coincidente com o período seco (inverno para a cana de açúcar) do sistema elétrico nacional - terá condições de agregar valor à hidroeletricidade, através da ampliação do lastro físico de oferta, proporcionando melhor aproveitamento econômico das usinas hidrelétricas na medida em que poderão aumentar o volume da energia comercializada em contratos de longo prazo, com o aproveitamento da energia secundária (vertida nas usinas durante o verão) em energia firme para ser comercializada durante todo o ano, independentemente de hidrologia desfavorável.

Como benefícios desta natureza no setor hidroelétrico são tradicionalmente repartidos entre os Agentes geradores e os beneficiários indiretos, no caso as hidrelétricas e os consumidores, o aproveitamento da BioEletricidade potencial deverá ter o mesmo tratamento isonômico que já é praticado no setor elétrico para casos similares de alocação de riscos e de benefícios.

Podemos concluir que a BioEletricidade a partir da biomassa da cana, conforme citado anteriormente, possui atributos e características de "fonte estratégica renovável" - que, uma vez reconhecida, independerá de programas especiais ou de subsídios públicos para a sua definitiva viabilização no sistema interligado de energia elétrica.

3.7. Balanço Energético Nacional

A) Conceito

O Balanço Energético Nacional – BEN foi elaborado segundo metodologia que propõe uma estrutura energética, suficientemente geral, de forma a permitir a obtenção de adequada configuração das variáveis físicas próprias do setor energético (MME, 2004).

A matriz do balanço energético, síntese da metodologia, expressa o balanço das diversas etapas do processo energético: produção, transformação e consumo, conforme figura e conceituação apresentados a seguir.



Figura III.09 – Estrutura do Balanço Energético Nacional

Conforme se observa na figura, a estrutura geral do balanço é composta por quatro partes:

- Energia Primária
- Transformação
- Energia Secundária
- Consumo Final

i) Energia Primária

Produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como o petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica, etc.

ii) Energia Secundária

Produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação que têm como destino os diversos setores de consumo e eventualmente outro centro de transformação.

iii) Total Geral

Consolida todas as energias produzidas, transformadas e consumidas no país.

iv) Oferta

Quantidade de energia que se coloca à disposição para ser transformada e/ou para consumo final.

v) Transformação

O setor transformação agrupa todos os centros de transformação onde a energia que entra (primária e/ou secundária) se transforma em uma ou mais formas de energia secundária com suas correspondentes perdas na transformação.

Observações importantes sobre os sinais nos centros de Transformação:

- toda energia primária e/ou secundária que entra (como insumo) no centro de transformação tem sinal negativo.
- toda energia secundária produzida nos centros de transformação tem sinal positivo.

vi) Perdas

Perdas ocorridas durante as atividades de produção, transporte, distribuição e armazenamento de energia. como exemplos, podem se destacar:

perdas em gasodutos, oleodutos, linhas de transmissão de eletricidade, redes de distribuição elétrica. Não se incluem nesta linha as perdas nos centros de transformação.

vii) Consumo Final

Nesta parte se detalham os diferentes setores da atividade sócio-econômica do País, para onde convergem às energias primária e secundária, configurando o consumo final de energia.

B) A Influência do Setor Sucroalcooleiro

A cultura da cana de açúcar reúne condições altamente relevantes para se tornar a mais importante fonte de geração descentralizada no país.

Os números abaixo sobre o conteúdo energético de 1t de cana-de-açúcar evidenciam a importância da cultura canavieira para efeitos de seu emprego como fonte primária de produção de energia. Observe-se que o conteúdo energético da biomassa resultante da produção de açúcar e/ou do álcool alcança 1.110 mil kcal num total de 1.718 mil kcal (ou seja cerca de 65 % deste total) e que, entre os açúcares (608 mil kcal), está o etanol, combustível, hoje, usado veicularmente, seja adicionado à gasolina ou ao óleo diesel, seja utilizado isoladamente.

Tabela III.03 – Conteúdo Energético da Cana-de-açúcar

Subproduto	Quantidade (kg)	Conteúdo Energético (mil kcal)
Açúcares	153	608
Bagaço (50% de umidade)	276	598
Palha (15% de umidade)	165	512
TOTAL	-	1718

Uma tonelada de cana de açúcar possui mais energia que um barril de petróleo (1.386 mil kcal).

São obtidos a partir da cana esmagada para produção de açúcar e álcool. São considerados como produtos primários o caldo da cana, melaço, bagaço, pontas, folhas e olhaduras, e como produtos secundários o álcool anidro e hidratado. De cada tonelada de cana esmagada para produção de álcool são obtidos cerca de 730 kg de caldo de cana (não se considera a água utilizada na lavagem da cana). Quanto ao bagaço, é considerado apenas o de uso energético.



4. Projeto de uma Unidade Termelétrica a Biomassa – Estudo de Caso

4.1. Descrição do Projeto

Este projeto consiste na implantação de uma Unidade Termelétrica, localizada na Fazenda Santa Maria da Mata, Bairro Campestre, Zona Rural - no município de Sud Mennucci, estado de São Paulo. Esta unidade está inserida em um processo de cogeração a partir do bagaço de cana.

A concepção adotada para o projeto inclui a adequação total do Sistema de Geração de Vapor (nova caldeira com produção de vapor a 70 kgf/cm^2), bem como do Sistema de Conversão de Energia (implementação de novo turbogerador de maior eficiência; substituição de turbinas a vapor de baixa eficiência por motores elétricos mais eficientes).

O projeto de ampliação da capacidade geradora da UTE Pioneiros, será desenvolvido em duas fases seqüenciais:

- i) Na 1ª fase (safra de 2005 / 2006) será instalada uma caldeira de 150 tv/h, um turbo gerador de 32 MW acionado por turbina a vapor, casa de força, subestação elevatória, e linha de transmissão de 138 kV. As duas caldeiras e os três turbogeradores existentes permanecerão durante a safra 2005 / 2006 sendo desativados na safra 2006 / 2007.*
- ii) Na 2ª fase (safra 2006 / 2007) os acionamentos mecânicos do preparo de cana (picadores, desfibradores), e moagem (Ternos) serão substituídos por motores elétricos.*

O projeto de implantação da UTE é direcionado para a maximização da cogeração, não implicando em transformações no processo operacional de fabricação do açúcar e álcool.

A geração de energia elétrica será feita através de Ciclo Térmico de Rankine, ou Ciclo a Vapor, utilizando-se geradores de vapor (caldeiras), uma turbina de extração, contrapressão e condensação, condensadores e geradores elétricos.

4.2. Sistema Atual da Usina

Atualmente esta Usina gera vapor em duas caldeiras com capacidade total de geração de vapor de 116 tv/h, com pressão de 22 bar e 290 °C. A moagem atual é de 237 tc/h, o que produz 65 ton de bagaço por hora (fibra da cana média de 12,7%). A moenda é acionada por turbinas a vapor, de simples estágio, com baixa eficiência (consumo de 17,5 kg de vapor por kWh). O processo de moagem consome 14 kWh / tc, tendo assim uma potência de 2,85 MW destinada ao acionamento da moenda.

O processo atual de produção de açúcar e álcool consome 490 kg de vapor por tonelada de cana processada. O vapor de processo utilizado é vapor saturado com 130 °C e 2,5 bar.

O sistema de geração de energia elétrica opera com três turbogeradores a plena capacidade com potência total de 3,6 MW, acionados por turbinas de simples estágio, de baixa eficiência (consumo específico de 15 kg de vapor por kWh gerado). Conforme Figura IV.01.



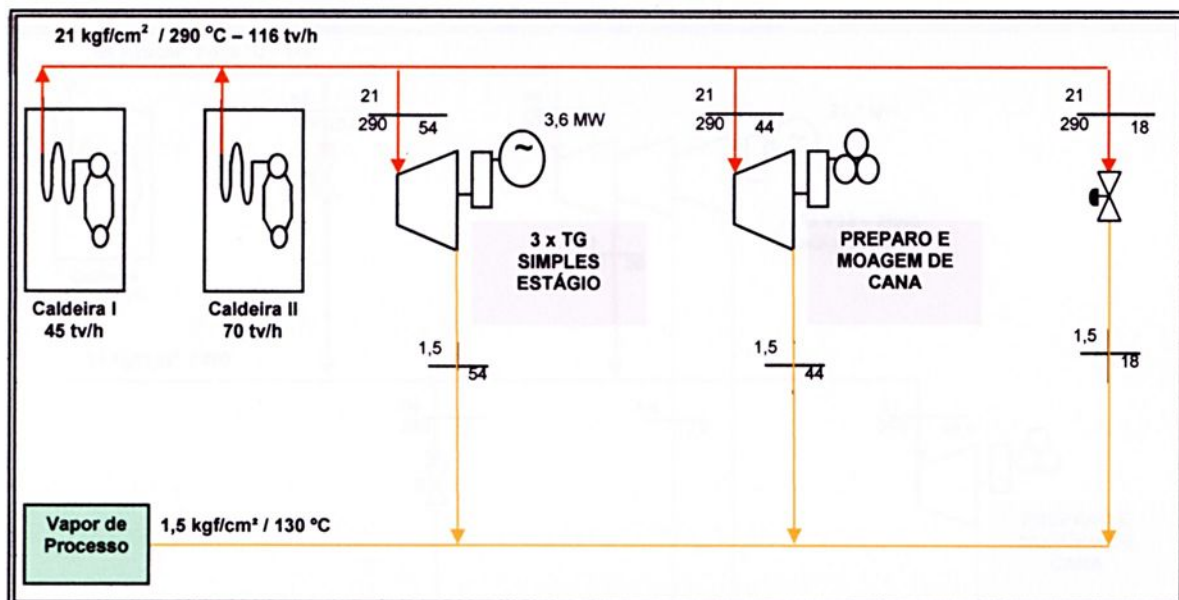


Figura IV.01 – Balanço Térmico Simplificado Atual

O sistema de alimentação de água das caldeiras é acionado por turbina a vapor, com potência requerida de 0,14 MW, de simples estágio, com baixa eficiência, sendo consumidos 18 kg de vapor por kWh.

A estratégia adotada neste projeto, para geração adicional de energia elétrica para comercialização, fundamenta-se em duas etapas distintas:

4.3. 1ª Fase do Projeto

Nesta fase do projeto será instalada uma caldeira para geração de vapor em 70 bar, de alta eficiência térmica (86,59%), que otimizará o uso do combustível aumentando a capacidade de geração de vapor por kg de bagaço (Figura IV.02).

A moagem será aumentada para 280 ton/h, disponibilizando um total de bagaço produzido de 76,8 ton/h. O consumo de vapor de processo será reduzido para 460 kg de vapor / ton de cana para isto o processo de destilação será feito com vapor vegetal, gerado no novo pré-evaporador a ser instalado.

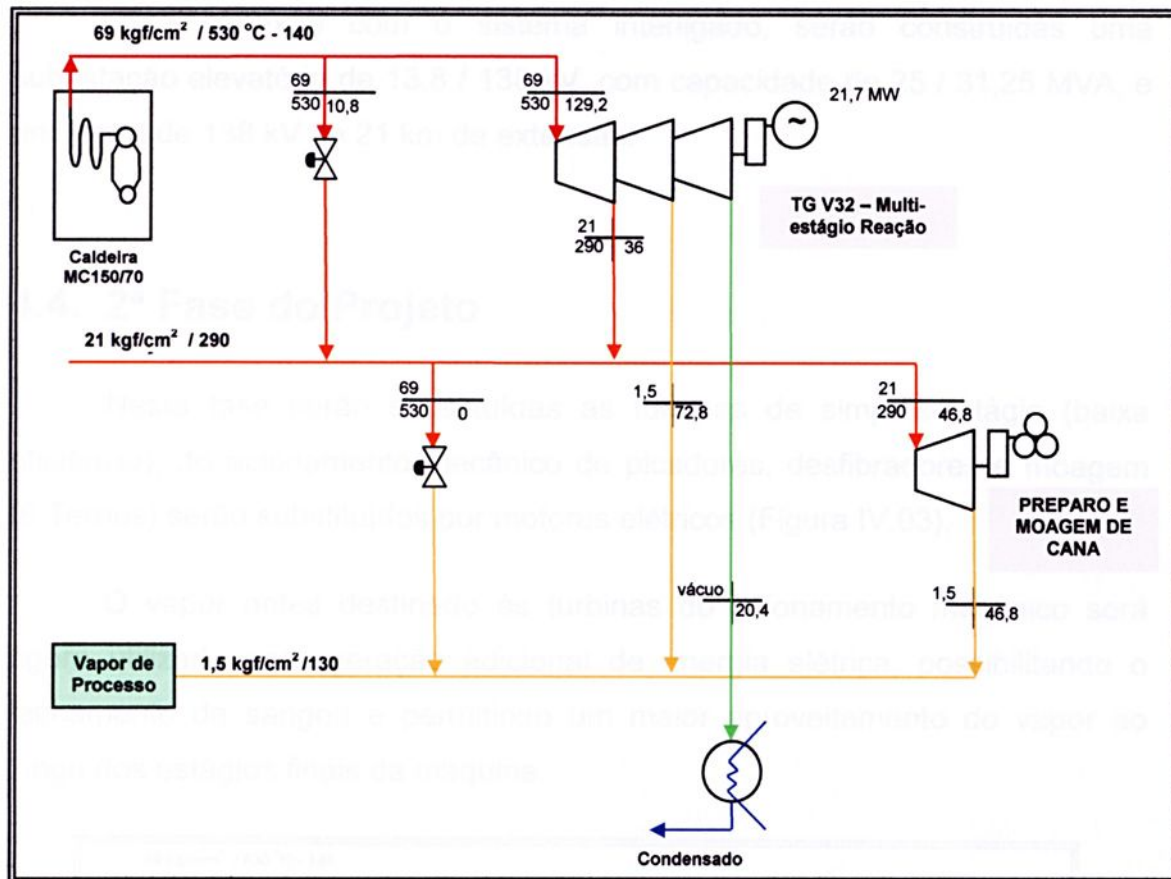


Figura IV.02 – Balanço Térmico Simplificado 1ª Fase

Deste total de bagaço, serão destinados cerca de 90%, ou seja, 68,6 ton/h para geração de vapor. O restante será destinado para outras finalidades e utilização em paradas eventuais.

Será implantada também uma turbina multi-estágio de condensação a reação, com sangria (Vapor 22 bar – acionamento moagem e preparo de cana) e extração controlada (Vapor 2,5 bar – processo) para acionamento de um gerador de 40 MVA (32 MW). O potencial de geração médio será de 17,3 MW, sendo 4,6 MW para uso próprio e 12,7 MW para comercialização.

Os três turbogeradores existentes (3,6 MW) permanecerão nesta fase como reserva, o que totalizará uma potência instalada de 35,6 MW. Desta forma o fator de uso médio da instalação será de $(17,3 \text{ MW} / 35,6 \text{ MW}) \times 100 = 48,6\%$. O fator de disponibilidade da central está estimado em 95%.

Para obter esta otimização no consumo de vapor de processo serão realizadas as seguintes melhorias:

- i) Substituição do atual sistema de desidratação de álcool anidro, o ciclo hexano, pelo sistema monoetilenoglicol.*
- ii) Na fábrica de açúcar, será ampliado o sistema de evaporação de triplo efeito para quádruplo efeito economizando assim 8 t de vapor p/ hora.*
- iii) Na fábrica de açúcar será adotado o sistema de sangria de vapor nos múltiplos efeitos, para o aquecimento indireto do caldo a ser processado, substituindo o vapor de processo de 2,5 bar.*

Com a redução do consumo de vapor de processo haverá uma maior disponibilidade de bagaço e, portanto um maior potencial de geração de energia elétrica. O potencial de geração média será de 31,7 MW, sendo 8,1 MW para uso próprio e 23,6 MW para comercialização.

Nesta fase os três turbogeradores de 1,2 MW ainda permanecerão como reserva, totalizando a mesma potência instalada da fase anterior. Desta forma o fator de uso médio da instalação será de $(31,7 \text{ MW} / 35,6 \text{ MW}) \times 100 = 89,0\%$. O fator de disponibilidade da central está estimado em 95%.

4.5. Inovação Tecnológica

O Projeto idealizado pela Empresa é um projeto diferenciado com relação à eficiência quando comparado com outros já implantados no Setor Sucroalcooleiro.

Todo o vapor gerado pela caldeira (86,59% de eficiência térmica) será consumido por uma turbina de multi-estágio com consumo específico na condensação de 3,2 kgv/kWh e 5,2kgv/kWh na extração, chegando a um

consumo específico total (condensação + extração), na fase final do projeto, de 4,4 kgv/kWh.

Para que essas metas sejam atingidas é necessária à aquisição de uma turbina com muita tecnologia agregada (Figura IV.04), esta turbina é projetada com o conceito de palhetamento de reação, o qual propicia um alto rendimento, resultando em um ganho extra de excedente de energia, permitindo desta forma uma receita maior para a Usina através venda de energia.

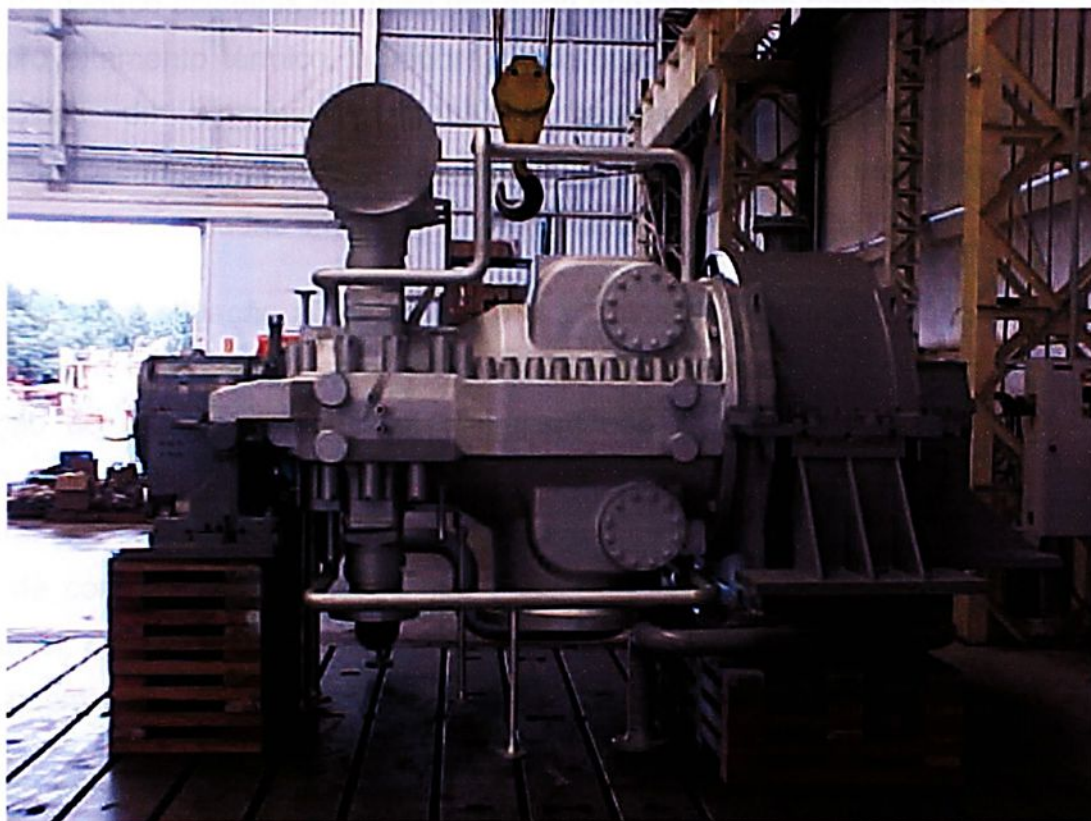


Figura IV.04 – Turbina VE32

5. Estudo do Balanço Térmico Simplificado de uma Unidade Termelétrica a Biomassa.

Neste capítulo será abordado quatro balanços térmicos distintos, com equipamentos, eficiências e concepções diferentes. Iniciaremos as simulações analisando uma instalação típica do setor sucroalcooleiro que utiliza para queima do bagaço caldeiras de baixa eficiência operando com baixa pressão e baixo aproveitamento térmico, o vapor gerado por estas caldeiras é utilizado em turbinas de simples estágio com baixíssima eficiência térmica transformando energia térmica em energia mecânica para o acionamento de moendas ou transformadas em energia elétrica através de um gerador.

Uma outra situação a ser simulada é a instalação de uma caldeira de alta pressão e temperatura com eficiência térmica elevada, possibilitando a otimização do uso do combustível e aumentando assim a capacidade de geração de vapor por quantidade de bagaço. Será substituído também o turbogerador de simples estágio de baixa eficiência por uma turbina multi-estágio de condensação a reação que possui baixo consumo específico de combustível, possibilitando assim uma maior geração de energia elétrica para a mesma quantidade de combustível.

Na terceira etapa serão substituídas as turbinas do acionamento mecânico de picadores, desfibradores e moagem por motores elétricos de alta eficiência e desta forma o vapor antes destinado às turbinas será agora utilizado ao longo dos estágios da turbina multi-estágio, possibilitando um maior aproveitamento deste vapor.

Por fim será abordado o que algumas melhorias no consumo de vapor de processo causam na geração de energia elétrica, tendo em vista que toda economia deste vapor pode maximizar a condensação do turbogerador e conseqüentemente otimizar a geração de energia elétrica da Unidade Termelétrica.



Para realização deste estudo foi elaborado um simulador que utiliza alguns dados de processo para o cálculo da quantidade de energia exportada pela Central Termelétrica, também são disponibilizados os valores do rendimento elétrico global, consumo próprio, potência do preparo de cana e moagem, vazões de água e vapor, entalpias, etc...

Toda análise realizada terá como premissa a moagem de 01 tonelada de cana moída, desta forma será possível à realização de conclusões mais genéricas para plantas do porte estudado (1.350.000 toneladas de cana moída por ano), sendo necessário somente à multiplicação da quantidade de cana moída no período desejado para obtenção de toda a produção de energia (Elétrica e térmica) neste período.

5.1. Variáveis do Balanço Térmico

Para a análise dos balanços simulados é necessário sabermos os dados de entrada do simulador e as variáveis calculadas. Todo termo aqui utilizado pode ser mais bem interpretado e entendido no glossário de termos técnicos ou na literatura referenciada.

A) Variáveis de Projeto (Entrada)

Neste item são enfatizados os dados que servem de condição inicial para os cálculos dos balanços térmicos, vale lembrar que estes parâmetros variam ao longo dos anos e mesmo ao longo de uma safra, podendo desta forma, serem simuladas condições mais ou menos otimistas. Inicialmente este estudo trabalhará com valores médios ao longo das safras.

Segue abaixo as variáveis de projeto

- i) *Cana Moída Por Hora (tc/h) – CNMOH*
- ii) *Fibra da Cana (%) – FBCN*
- iii) *Fibra do Bagaço (%) – FBBG*



- iv) *PCI do Bagaço (kJ/kg) – PCI*
- v) *Potência Preparo e Moagem (kWh/tc) – PPM*
- vi) *Consumo Específico Turbinas Preparo e Moagem (Kgv/kW) - CTPM*
- vii) *Eficiência Caldeira (%) – η_{cald}*
- viii) *Consumo Específico Turbinas Geração Energia Elétrica (kgv/kW) – CEEE*
- ix) *Consumo Específico Primeira Tomada (kgv/kW) – CET1*
- x) *Consumo Específico Segunda Tomada (kgv/kW) – CET2*
- xi) *Consumo Específico Condensação (kgv/kW) – CETCON*
- xii) *Consumo de Vapor de Processo (kgv/tc) – CVP*
- xiii) *Sobra de Bagaço (%) – SBG*
- xiv) *Consumo Próprio de Energia Elétrica (kWh/tconc) – CEP*
- xv) *Temperatura da Água Condensada no Processo (°C) – TACO*
- xvi) *Temperatura da Água de Reposição da Caldeira (°C) – TARE*
- xvii) *Temperatura da Água de Alimentação (°C) – TAA*
- xviii) *Retorno de Condensado (%) – RCO*
- xix) *Pressão Vapor de Alta (kgf/cm²) – PVA*
- xx) *Pressão Vapor de Média (kgf/cm²) – PVM*
- xxi) *Pressão Vapor de Baixa (kgf/cm²) - PVB*
- xxii) *Temperatura Vapor de Alta Pressão (°C) – TVA*
- xxiii) *Temperatura Vapor de Média Pressão (°C) – TVM*
- xxiv) *Temperatura Vapor de Baixa Pressão (°C) – TVB*



xxv) *Entalpia Vapor de Alta Pressão (kJ/kg) – HPA*

xxvi) *Entalpia Vapor de Média Pressão (kJ/kg) – HPM*

xxvii) *Entalpia Vapor de Baixa Pressão (kJ/kg) – HPB*

B) Variáveis Calculadas

Com base nos dados do item anterior é possível a obtenção dos seguintes dados:

i) *Entalpia da Água Condensada (kJ/kg) – HACON*

ii) *Entalpia da Água de Reposição (kJ/kg) – HARE*

iii) *Entalpia da Água de Alimentação (kJ/kg) – HAA*

iv) *Vazão da Água de Reposição (m³/h) – MARE*

v) *Vazão da Água Condensada (m³/h) – MACON*

vi) *Vazão da água de Alimentação (m³/h) – MAA*

vii) *Vapor no Des aerador (tv/h) – MVDE*

viii) *Bagaço Disponível (tb/h) – BGD*

ix) *Bagaço Útil (tb/h) – BGU*

x) *Consumo Específico da Caldeira (kgv/kgb) – CECA*

xi) *Vapor Gerado (tv/h) – MVG*

xii) *Vapor de Entrada na Turbina (tv/h) – MVT*

xiii) *Vapor Utilizado Geração de Energia Elétrica (tv/h) – MVEE*

xiv) *Vapor Utilizado na 1ª Tomada (tv/h) – MVT1*

xv) *Vapor Utilizado na 2ª Tomada (tv/h) – MVT2*

xvi) *Vapor Utilizado na Condensação (tv/h) – MVTCON*

- xvii) Vapor Redutora Média para Baixa Pressão (tv/h) – MVRE
- xviii) Vapor Utilizado no Preparo e Moagem (tv/h) – MVPM
- xix) Vapor Total na Linha de média Pressão (tv/h) – MVMP
- xx) Vapor Total Consumido no Processo (tv/h) – MVBP
- xxi) Geração de Energia Elétrica na Condensação (MW) – GECON
- xxii) Geração de Energia Elétrica na 1ª Tomada (MW) – GET1
- xxiii) Geração de Energia Elétrica na 2ª Tomada (MW) – GET2
- xxiv) Geração de energia Elétrica Total (MW) – GETO
- xxv) Rendimento Elétrico Global (kW/kgv) – η EG
- xxvi) Consumo Energia Preparo e Moagem (MW) – CEPM
- xxvii) Consumo Energia Caldeira e Periféricos (MW) – CECA
- xxviii) Consumo Próprio Total (MW) – CEPT
- xxix) Energia Disponibilizada para Venda (MW) – EV
- xxx) Relação Energia Vendida por Cana Moída (kWh/tc) – EVCM
- xxxi) Relação Energia Produzida por Cana Moída (kWh/tc) – EPCM

5.2. Metodologia de Cálculo

Os cálculos realizados pelo Simulador, que serão apresentados posteriormente, utilizam os conceitos termodinâmicos básicos apresentados no capítulo anterior, gerando energia elétrica através do ciclo de Rankine ou ciclo a Vapor.

Tendo em vista as dezenas de combinações dos dados de entrada tornou-se necessário à criação de algumas condições de contorno para

aproximar, o máximo possível, estes resultados de uma situação real, controlando, desta forma, a variação das quantidades de vapor ao longo de todo o processo (linha de alta, média e baixa pressão) e seus respectivos consumidores.

No caso específico da Unidade Termelétrica estudada, foi encontrada uma dificuldade adicional para rodar o balanço térmico, os dados nominais dos equipamentos, fazendo com que fosse necessária à criação de novas condições de contorno, como produção de vapor máxima, máximos valores de extrações da turbina, máximo e mínimo potencial de condensação para geração de energia elétrica, vazões máximas nas válvulas redutoras, entre outras. Nos itens a seguir serão detalhados os casos estudados neste trabalho.

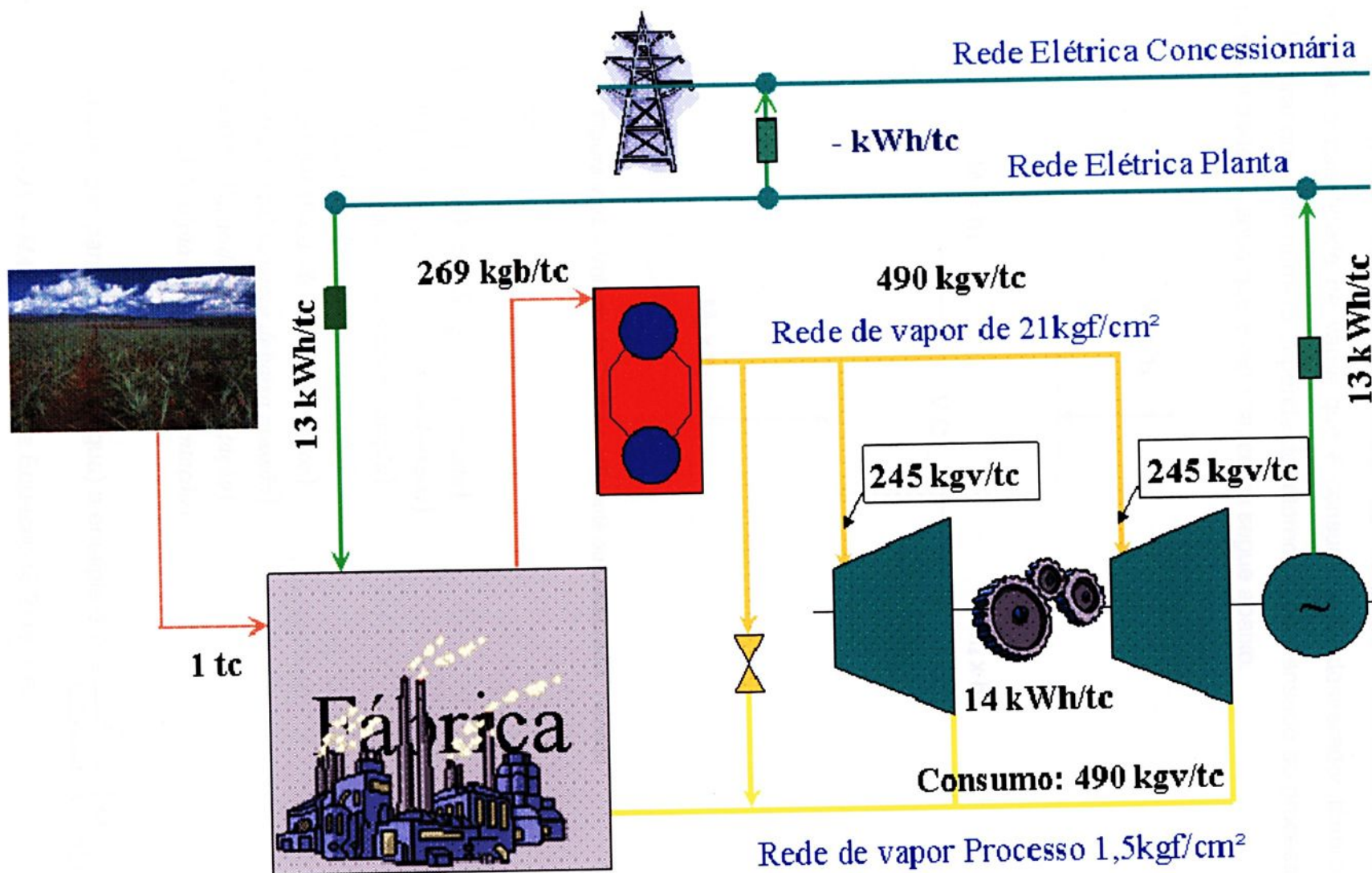
5.3. Caso 01

No Caso 01 será abordada uma instalação típica do setor sucroalcooleiro que utiliza para queima do bagaço caldeiras de baixa eficiência operando com baixa pressão e baixo aproveitamento térmico, o vapor gerado por estas caldeiras é utilizado em turbinas de simples estágio com baixíssima eficiência térmica transformando energia térmica em energia mecânica para o acionamento de moendas ou transformadas em energia elétrica através de um gerador.

A seguir temos o balanço térmico simplificado proposto para este caso.



Figura V.01 – Balanço Térmico Simplificado Caso 01



O simulador inicialmente calcula as variáveis necessárias para determinar a quantidade de vapor que é consumida no desaerador térmico, vale lembrar que este numero depende do retorno de condensado do processo e da quantidade de água que é repostada, como segue abaixo.

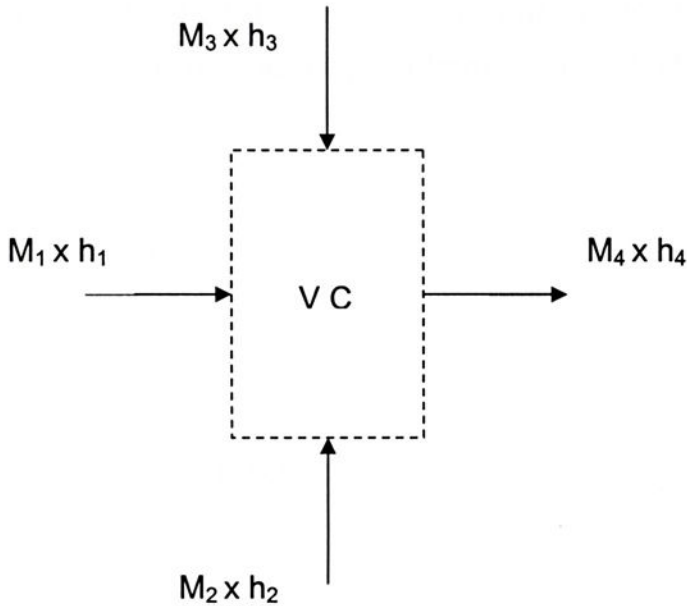


Figura V.02 – Volume de Controle referente ao Desaerador Térmico

Sendo;

$$\begin{aligned}
 M_1 &= \text{MACON} \text{ (Vazão de água condensada)} \\
 h_1 &= \text{HACON} \text{ (Entalpia da água condensada)} \\
 M_2 &= \text{MARE} \text{ (Vazão de água de reposição)} \\
 h_2 &= \text{HARE} \text{ (Entalpia da água reposição)} \\
 M_3 &= \text{MVDE} \text{ (Vazão de vapor desaerador)} \\
 h_3 &= \text{HPB} \text{ (Entalpia vapor de baixa pressão)} \\
 M_4 &= \text{MAA} \text{ (Vazão de água de alimentação)} \\
 h_4 &= \text{HAA} \text{ (Entalpia da água de alimentação)}
 \end{aligned}$$

Sabendo que para este fluido (água) a entalpia é $h = \frac{T}{0,238846} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$ e

que $\text{MAA} = \text{MACON} + \text{MARE} + \text{MVDE}$, da Equação (3.2) temos;

$$\text{MVDE} = \text{MARE} \times \left(\frac{\text{HAA} - \text{HARE}}{\text{HPB} - \text{HAA}} \right) + \text{MACON} \times \left(\frac{\text{HAA} - \text{HACON}}{\text{HPB} - \text{HAA}} \right)$$

O vapor aqui utilizado será somado ao valor necessário para processar a quantidade de cana moída resultando no valor total consumido no processo (*MVBP*).

Da Equação (3.1) são calculados os valores de bagaço disponível e útil, e posteriormente através da Equação (3.8) a geração de vapor da caldeira (desprezando-se as perdas nas purgas), conforme Figura V.03.

$$CNMOH \times FBCN = BGD \times FBBG$$

e

$$BGU = BGD \times (1 - SBG)$$

Sabendo que,

$$CECA = \eta_{cald} \times \frac{PCI}{(HPM - HAA)}$$

Desta forma,

$$MVG = CECA \times BGU$$

Onde,

<i>CNMOH</i> :	Cana Moída Por Hora (tc/h)
<i>FBCN</i> :	Fibra da Cana Moída (%)
<i>BGD</i> :	Bagaço Disponível (tb/h)
<i>FBBG</i> :	Fibra do Bagaço (%)
<i>BGU</i> :	Bagaço útil (%)
<i>SBG</i> :	Sobra de Bagaço (%)
<i>CECA</i> :	Consumo Específico da Caldeira (kgv/kgb)
<i>η_{cald}</i> :	Rendimento da Caldeira (%)
<i>PCI</i> :	Poder Calorífico do Bagaço (kJ/kg)
<i>HPM</i> :	Entalpia Vapor de Média Pressão (kJ/kg)
<i>HAA</i> :	Entalpia da Água de Alimentação (kJ/kg)
<i>MVG</i> :	Vapor Gerado (tv/h)

Vale lembrar que este cálculo é limitado pela quantidade de vapor consumido nas linhas de média e baixa pressão (condições de contorno).

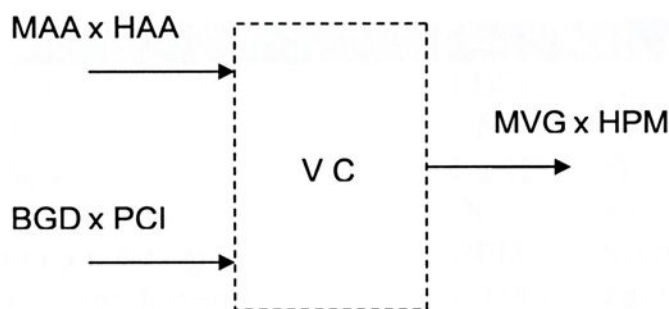


Figura V.03 – Volume de Controle referente à caldeira

Esta energia térmica será transformada em mecânica para acionamento do preparo de cana e moagem e para geração de energia elétrica. Estes valores podem ser obtidos da seguinte forma:

$$CEPM = CNMOH \times PPM$$

e

$$GETO = CNMOH \times CEP$$

Sendo,

CEPM: Consumo Preparo e Moagem (kW)

PPM: Potência Preparo e Moagem (kWh/tc)

GETO: Geração de Energia Total (kW)

CEP: Consumo de Energia do Processo (kWh/tc)

Caso o consumo de vapor total no processo seja maior que a quantidade de vapor consumida nas turbinas teremos esta diferença circulando pela válvula redutora rebaixando este vapor de 21kgf/cm² para 1,5kgf/cm².

Com estes valores é possível determinar a geração de energia elétrica, o consumo próprio e, conseqüentemente, o rendimento elétrico global mais a quantidade de energia produzida por tonelada de cana moída (note que neste caso não é disponibilizada energia para venda).

Abaixo segue os valores de entrada para este caso:

Tabela V.01 – Valores de Entrada do Simulador Caso 01

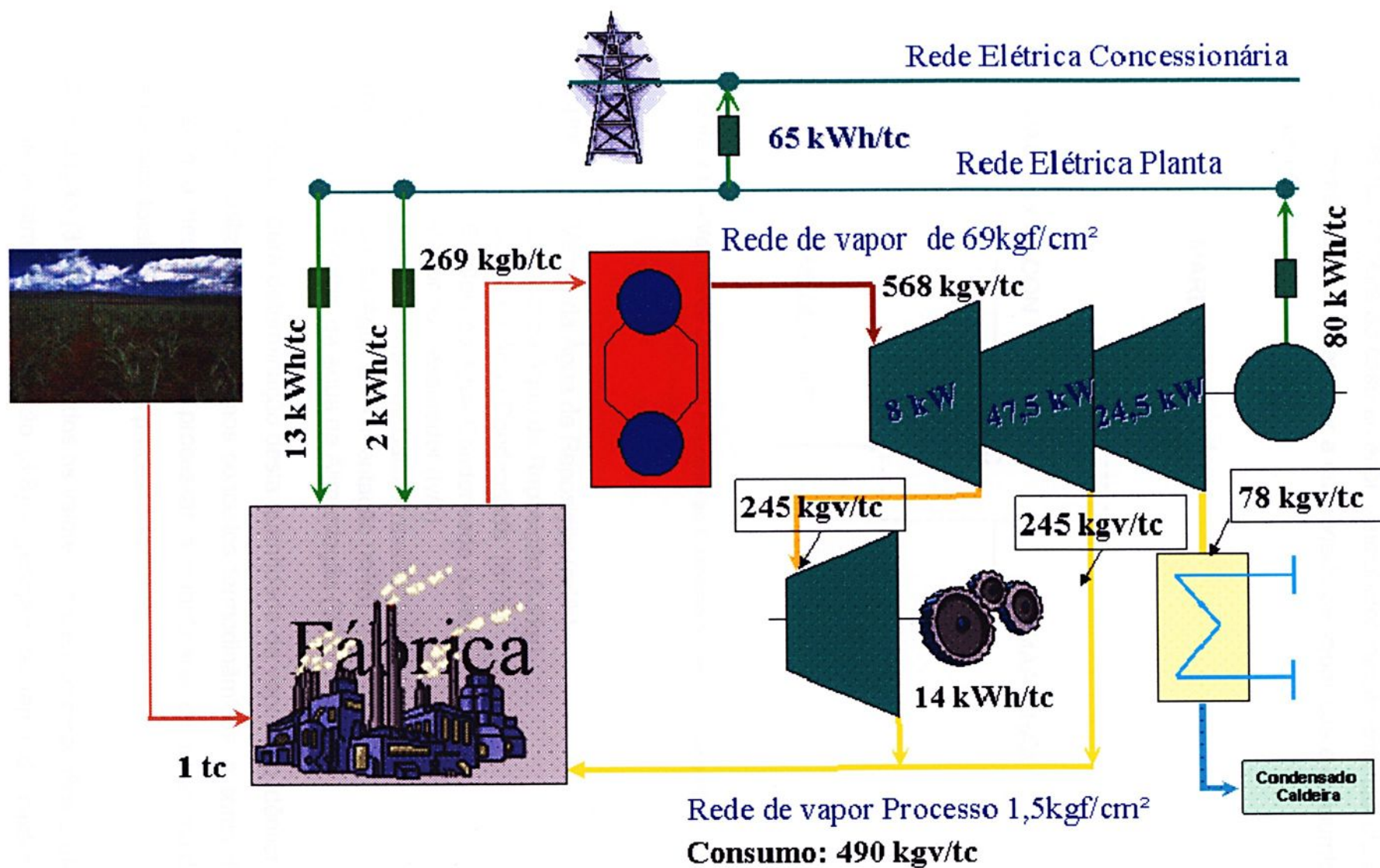
Variáveis Projeto:			1º Caso
Fibra da cana	FBCN	%	12,70
Moagem cana	CNMOH	tc/h	1,00
Fibra do Bagaço	FBBG	%	46,30
PCI Bagaço	PCI	kJ/kg	7.243
Potência Preparo e Moagem	PPM	kWh/tc	14,00
Rendimento Turbina Moenda	CTPM	kgv/kW	17,50
Eficiência Caldeira	ncald	%	65%
Rendimento Turbina Casa de Força	CEEE	kgv/kW	18,80
Vapor de Processo	CVP	kgv/tc	478,00
Sobra de Bagaço	SBG	%	2%
Consumo Próprio de energia	CEP	kWh/tc	13,00
Temperatura água condensador	TACO	°C	95
Temperatura água reposição cald.	TARE	°C	30
% Retorno de condensado	RCO	%	95%
Temperatura Vapor 21kgf/cm²	TVM	°C	330
Entalpia Vapor de 21kgf/cm²	HPM	kJ/kg	3.019
Entalpia Vapor de escape	HPB	kJ/kg	2.733
Pressão Vapor Caldeira	TVM	kgf/cm ²	21
Temperatura Vapor Caldeira	TVA	°C	330

5.4. Caso 02

Neste caso, conforme dito anteriormente, é considerada a instalação de uma caldeira de alta pressão com eficiência térmica elevada, possibilitando a otimização do uso do combustível. Será substituído também o turbogerador de simples estagio de baixa eficiência por uma turbina multi-estágio de condensação a reação que possui baixo consumo específico de combustível, possibilitando assim uma maior geração de energia elétrica para a mesma quantidade de combustível.

A seguir temos o balanço térmico simplificado proposto para este caso.

Figura V.04 – Balanço Térmico Simplificado Caso 02



Da mesma maneira do caso anterior o simulador inicialmente calcula as variáveis necessárias para determinar a quantidade de vapor que é consumida no desaerador térmico.

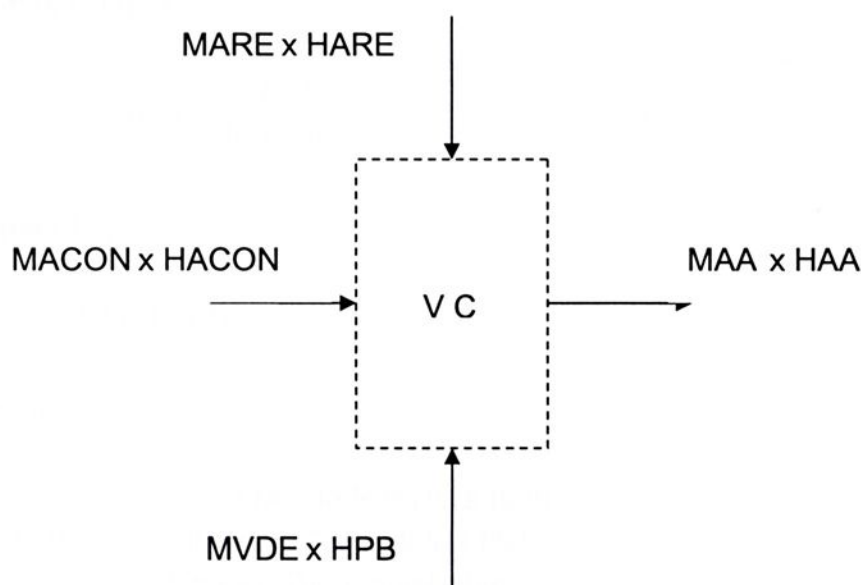


Figura V.05 – Volume de Controle referente ao Desaerador Térmico Caso 02

Sendo;

<i>MARE</i> :	Vazão da Água de Reposição (m^3/h)
<i>HARE</i> :	Entalpia da Água de Reposição (kJ/kg)
<i>MACON</i> :	Vazão da Água Condensada (m^3/h)
<i>HACON</i> :	Entalpia da Água Condensada (kJ/kg)
<i>MVDE</i> :	Vapor no Desaerador (tv/h)
<i>HPB</i> :	Entalpia Vapor de Baixa Pressão (kJ/kg)
<i>MAA</i> :	Vazão Água de Alimentação (m^3/h)
<i>HAA</i> :	Entalpia da Água de Alimentação (%)

Os Cálculos para determinação desta quantidade de vapor são idênticos ao caso anterior utilizando os mesmos conceitos termodinâmicos, a soma do resultado com o necessário para processar a quantidade de cana moída resultará no valor total consumido no processo (*MVBP*).

Da Equação (3.1) são calculados os valores de bagaço disponível e útil, e posteriormente através da Equação (3.8) a geração de vapor da caldeira (desprezando-se as perdas nas purgas), conforme Figura V.06.

$$CNMOH \times FBCN = BGD \times FBBG$$

e

$$BGU = BGD \times (1 - SBG)$$

Sabendo que,

$$CECA = \eta_{cald} \times \frac{PCI}{(HPA - HAA)}$$

Desta forma,

$$MVG = CECA \times BGU$$

Onde,

<i>CNMOH</i> :	Cana Moída Por Hora (tc/h)
<i>FBCN</i> :	Fibra da Cana Moída (%)
<i>BGD</i> :	Bagaço Disponível (tb/h)
<i>FBBG</i> :	Fibra do Bagaço (%)
<i>BGU</i> :	Bagaço útil (%)
<i>SBG</i> :	Sobra de Bagaço (%)
<i>CECA</i> :	Consumo Específico da Caldeira (kgv/kgb)
<i>η_{cald}</i> :	Rendimento da Caldeira (%)
<i>PCI</i> :	Poder Calorífico do Bagaço (kJ/kg)
<i>HPA</i> :	Entalpia Vapor de Alta Pressão (kJ/kg)
<i>HAA</i> :	Entalpia da Água de Alimentação (kJ/kg)
<i>MVG</i> :	Vapor Gerado (tv/h)

Vale lembrar que este cálculo é limitado pela quantidade de vapor consumido nas linhas de média e baixa pressão (condições de contorno).

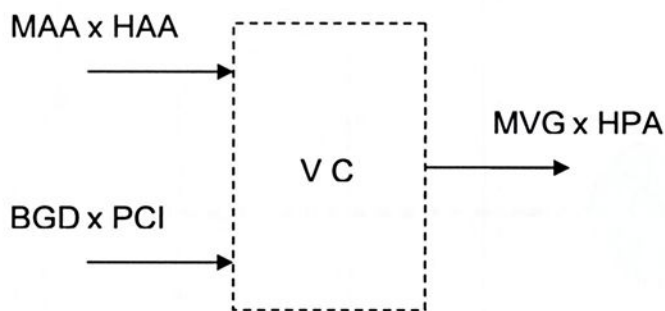


Figura V.06 – Volume de Controle referente à caldeira Caso 02

Neste caso, especificamente, todo o vapor gerador em alta pressão é consumido por um único ponto, na Turbina de extração-condensação. O vapor necessário para suprir o consumo da linha de média pressão será extraído da primeira sangria, já o necessário para o processo será extraído na segunda sangria, sendo que a diferença do vapor total de entrada pela soma das extrações nos dá a quantidade de vapor condensado.

Uma análise termodinâmica pode ser feita na máquina citada acima considerando três volumes de controle independentes, porém levando em consideração que a vazão mássica de vapor com determinada temperatura e pressão que sai de um V.C. entra no outro com as mesmas propriedades. Assim, é possível determinar os consumos específicos de vapor para cada V.C., ou seja, para cada parte da turbina. A soma das potências de cada V.C. deve ser igual à potência total se considerado um único V.C.

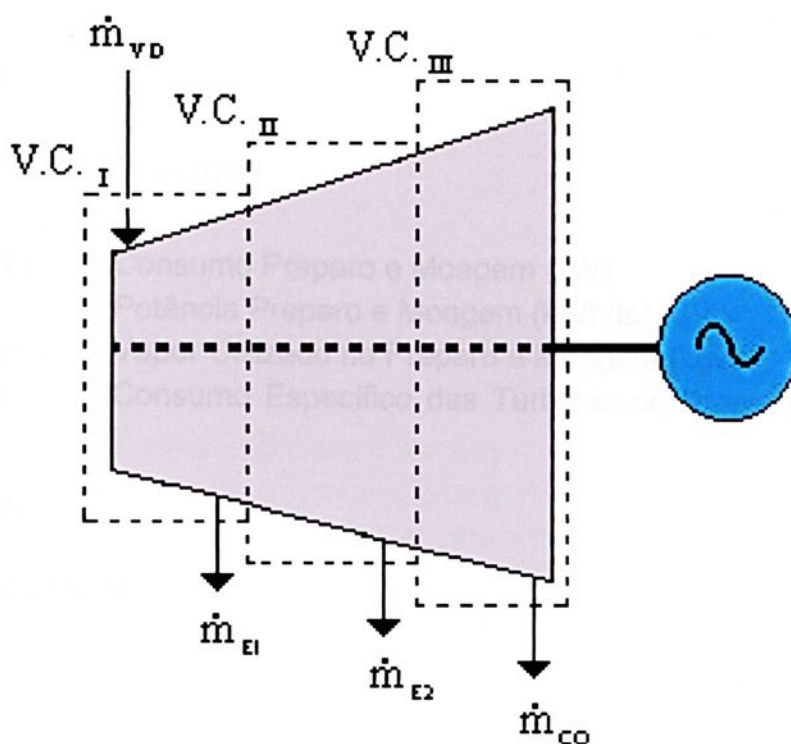


Figura V.07 – Desenho esquemático de uma turbina de extração-condensação considerando três volumes de controle independentes.

Aplicando a Equação (3.2) para os volumes de controle considerados na Figura V.07, tem-se as potências para cada V.C. dadas como segue:

$$\dot{W}_{V.C.I} = \dot{m}_{VD} \cdot (h_{VD} - h_{E1})$$

$$\dot{W}_{V.C.II} = (\dot{m}_{VD} - \dot{m}_{E1}) \cdot (h_{E1} - h_{E2})$$

$$\dot{W}_{V.C.III} = (\dot{m}_{VD} - \dot{m}_{E1} - \dot{m}_{E2}) \cdot (h_{E2} - h_{CO})$$

Conhecendo a quantidade de vapor de entrada e o trabalho realizado é possível determinarmos o consumo específico para cada volume de controle, sabendo desta forma a capacidade de geração de energia elétrica para diferentes valores de extrações e condensação.

O valor de cada extração é determinado pela necessidade de consumo da linha de média e baixa pressão, desta forma temos que na linha de média pressão a necessidade é determinada por,

$$CEPM = CNMOH \times PPM$$

então,

$$MVPM = CEPM \times CTPM$$

CEPM: Consumo Preparo e Moagem (kW)

PPM: Potência Preparo e Moagem (kWh/tc)

MVPM: Vapor Utilizado no Preparo e Moagem (kgv)

CTPM: Consumo Específico das Turbinas do Preparo e Moagem (kgv/kW)

Sendo,

$$MVPM = MVT1$$

Onde,

MVT1: Vazão de Vapor Primeira Tomada (tv/h)

Por sua vez o valor da quantidade de vapor que é extraído na segunda sangria é a diferença entre o valor total de vapor consumido no processo (MVBP), determinado anteriormente, e a quantidade extraída na primeira sangria, que rebaixará parte deste vapor consumido na linha de baixa pressão, como vemos a seguir;

$$MVT2 = MVBP - MVT1$$

Sendo,

MVT2: Vazão de Vapor Segunda Tomada (tv/h)

MVBP: Vazão de Vapor Consumido no Processo (tv/h)

Com esses dados o simulador pode calcular a quantidade de energia gerada em cada volume de controle (1 tomada, 2 tomada e condensação) e conseqüentemente o valor da geração total de energia elétrica.

Com a mudança da classe de pressão de operação da caldeira, conseqüentemente há um aumento do consumo de energia elétrica consumido pela mesma e seus periféricos (aumento das cargas envolvidas em função do

aumento de pressão e necessidade de implantação de novos sistemas auxiliares) e desta forma se torna necessário considerarmos este aumento no consumo de energia elétrica no processo.

Desta forma temos que,

$$CEPT = CNMOH \times CEP + CECA$$

Onde,

CEPT: Consumo Próprio Total (kW)

CEP: Consumo Próprio de Energia Elétrica (kWh/tc)

CECA: Consumo Energia Caldeira e Periféricos (kW)

Sabendo-se a geração total e o consumo total de energia elétrica, temos abaixo o montante de energia excedente e disponível para venda

$$EV = GETO - CEPT$$

Desta forma é possível determinarmos o rendimento elétrico global mais a quantidade de energia produzida e vendida por tonelada de cana moída.

É interessante observarmos que toda diferença de consumo entre o vapor total no processo, da linha de média pressão e da linha de alta pressão será equalizada via válvulas redutoras de pressão.

Abaixo segue os valores de entrada para este caso:



Tabela V.02 – Valores de Entrada do Simulador Caso 02

Variáveis Projeto:			2º Caso
Fibra da cana	FBCN	%	12,70
Moagem cana	CNMOH	tc/h	1,00
Fibra do Bagaço	FBBG	%	46,30
PCI Bagaço	PCI	kJ/kg	7.243
Potência Preparo e Moagem	PPM	kWh/tc	14,00
Rendimento Turbina Moenda	CTPM	kgv/kW	17,50
Eficiência Caldeira	ncald	%	89%
Rendimento Turbina 1ª Tomada	CET1	kgv/kW	30,00
Rendimento Turbina 2ª Tomada	CET2	kgv/kW	5,16
Rendimento Turbina Condensação	CETCON	kgv/kW	3,20
Vapor de Processo	CVP	kgv/tc	477
Sobra de Bagaço	SBG	%	2%
Consumo Próprio de energia	CEP	kWh/tc	13,00
Temperatura água condensador	TACO	°C	39,50
Temperatura água reposição cald.	TARE	°C	30,00
% Retorno de condensado	RCO	%	95%
Temperatura Vapor 21kgf/cm ²	TVM	°C	330
Entalpia Vapor de 21kgf/cm ²	HPM	kJ/kg	3.019
Entalpia Vapor de escape	HPB	kJ/kg	2.733
Entalpia Vapor alta pressão	HPA	kJ/kg	3.475
Pressão Vapor Caldeira	PVA	kgf/cm ²	70
Temperatura Vapor Caldeira	TVA	°C	530

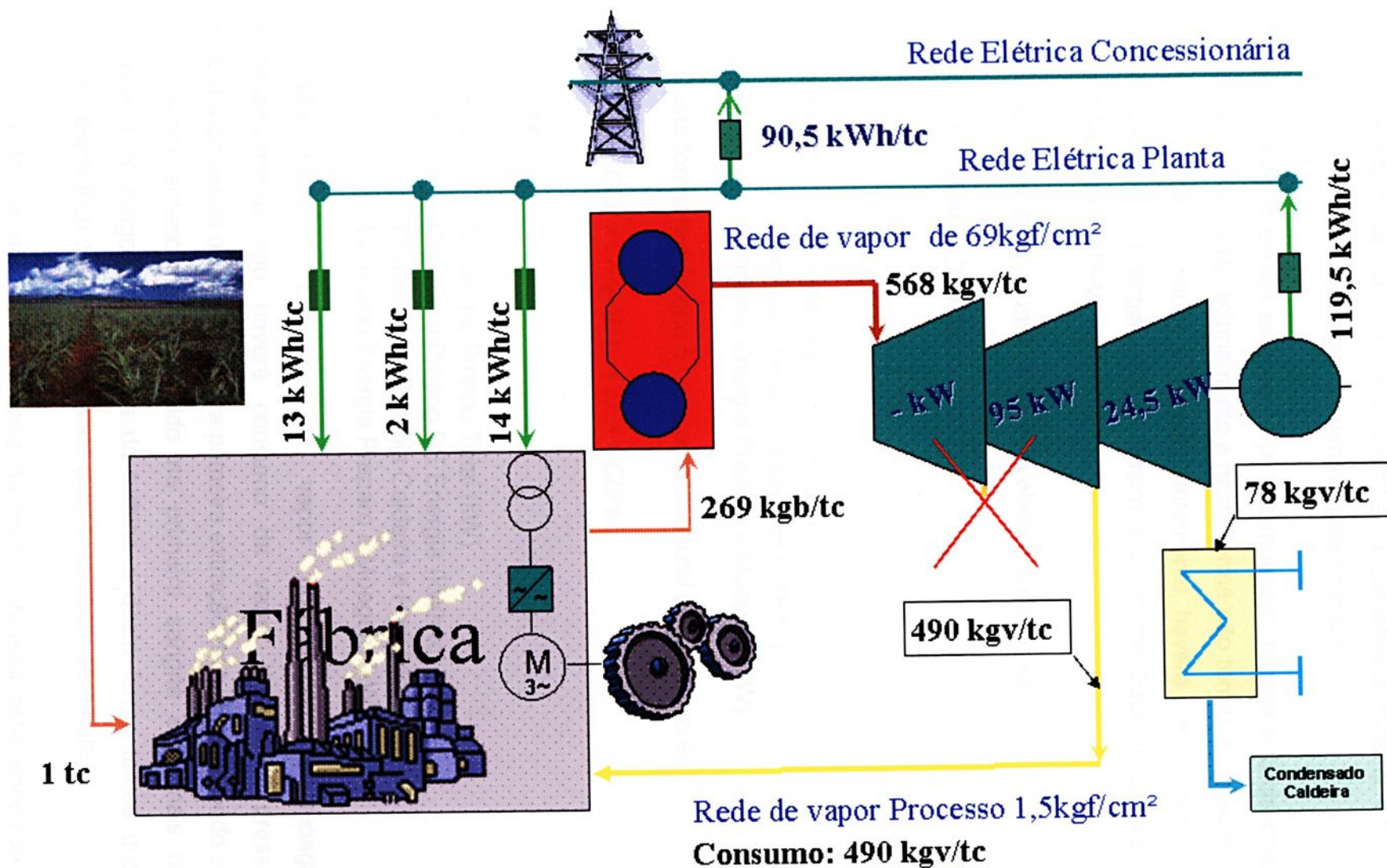
5.5. Caso 03

Numa terceira análise foram substituídas às turbinas do acionamento mecânico de picadores, desfibradores e moagem por motores elétricos de alta eficiência e desta forma o vapor antes destinado às turbinas será agora utilizado ao longo dos estágios da turbina multi-estágio, possibilitando um maior aproveitamento deste vapor.

É importante lembrar que a viabilidade técnica e econômica desta substituição dependerá do balanço térmico de cada unidade geradora bem como as limitações dos equipamentos ali instalados. Neste estudo poderá ser considerado também o nível de depreciação dos equipamentos a serem substituídos.

A seguir temos o balanço térmico simplificado proposto para este caso.

Figura V.08 – Balanço Térmico Simplificado Caso 03



A estrutura de calculo deste caso é exatamente a mesma do caso anterior, mudando somente algumas variáveis de entrada.

A primeira mudança esta no preparo e moagem, faz parte deste caso a retiradas das turbinas do acionamento e desta forma não teremos consumo de energia na forma de vapor e conseqüentemente haverá um aumento no consumo próprio de energia elétrica, assim o Consumo Específico Turbinas Preparo e Moagem (CTPM) será nulo.

O aumento do consumo de energia elétrica é dado por:

$$CEPM = PPM \times CNMOH$$

Onde,

CNMOH: Cana Moída Por Hora (tc/h)
PPM: Potencia Preparo e Moagem (kWh/tc).
CEPM: Consumo Energia Preparo e Moagem (kW)

Desta forma temos que o novo consumo total do processo é:

$$CEPT = (CEP \times CNMOH) + CECA + CEPM$$

Sendo,

CEPT: Consumo Próprio Total (kW)
CEP: Consumo Próprio DE Energia (kWh/tc)
CECA: Consumo de Energia Caldeira e Periféricos (kW).
CEPM: Consumo Energia Preparo e Moagem (kW)

Não havendo consumo de vapor no preparo e moagem conseqüentemente não haverá consumo de vapor de média pressão, possibilitando assim o fechamento da primeira extração da turbina fazendo com que o vapor anteriormente extraído na primeira sangria seja mais bem aproveitado ao longo dos estágios da turbina e desta forma temos que o Consumo específico da primeira tomada (CET1) também será nulo.

A existência de vapor na linha de média pressão esta vinculada às condições de processo, sendo possível que em alguns momentos as estações



de redução de vapor sejam acionadas para suprir um aumento de consumo de vapor na linha de baixa pressão.

Com essas informações pode-se determinar o aumento da geração de energia elétrica e sabendo o consumo próprio total temos o montante de energia disponibilizada para venda. Determina-se também o rendimento elétrico global mais a quantidade de energia produzida e vendida por tonelada de cana moída.

Abaixo segue os valores de entrada para este caso:

Tabela V.03 – Valores de Entrada do Simulador Caso 03

Variáveis Projeto:			3º Caso
Fibra da cana	FBCN	%	12,70
Moagem cana	CNMOH	tc/h	1,00
Fibra do Bagaço	FBBG	%	46,30
PCI Bagaço	PCI	kJ/kg	7.243
Potência Preparo e Moagem	PPM	kWh/tc	14,00
Rendimento Turbina Moenda	CTPM	kgv/kW	-
Eficiência Caldeira	ncald	%	88,51%
Rendimento Turbina 1ª Tomada	CET1	kgv/kW	-
Rendimento Turbina 2ª Tomada	CET2	kgv/kW	5,16
Rendimento Turbina Condensação	CETCON	kgv/kW	3,20
Vapor de Processo	CVP	kgv/tc	477
Sobra de Bagaço	SBG	%	2%
Consumo Próprio de energia	CEP	kWh/tc	13,00
Temperatura água condensador	TACO	°C	39,50
Temperatura água reposição cald.	TARE	°C	30,00
% Retorno de condensado	RCO	%	95%
Temperatura Vapor 21kgf/cm²	TVM	°C	330
Entalpia Vapor de 21kgf/cm²	HPM	kJ/kg	3.019
Entalpia Vapor de escape	HPB	kJ/kg	2.733
Entalpia Vapor alta pressão	HPA	kJ/kg	3.475
Pressão Vapor Caldeira	PVA	kgf/cm²	70
Temperatura Vapor Caldeira	TVA	°C	530

5.6. Caso 04

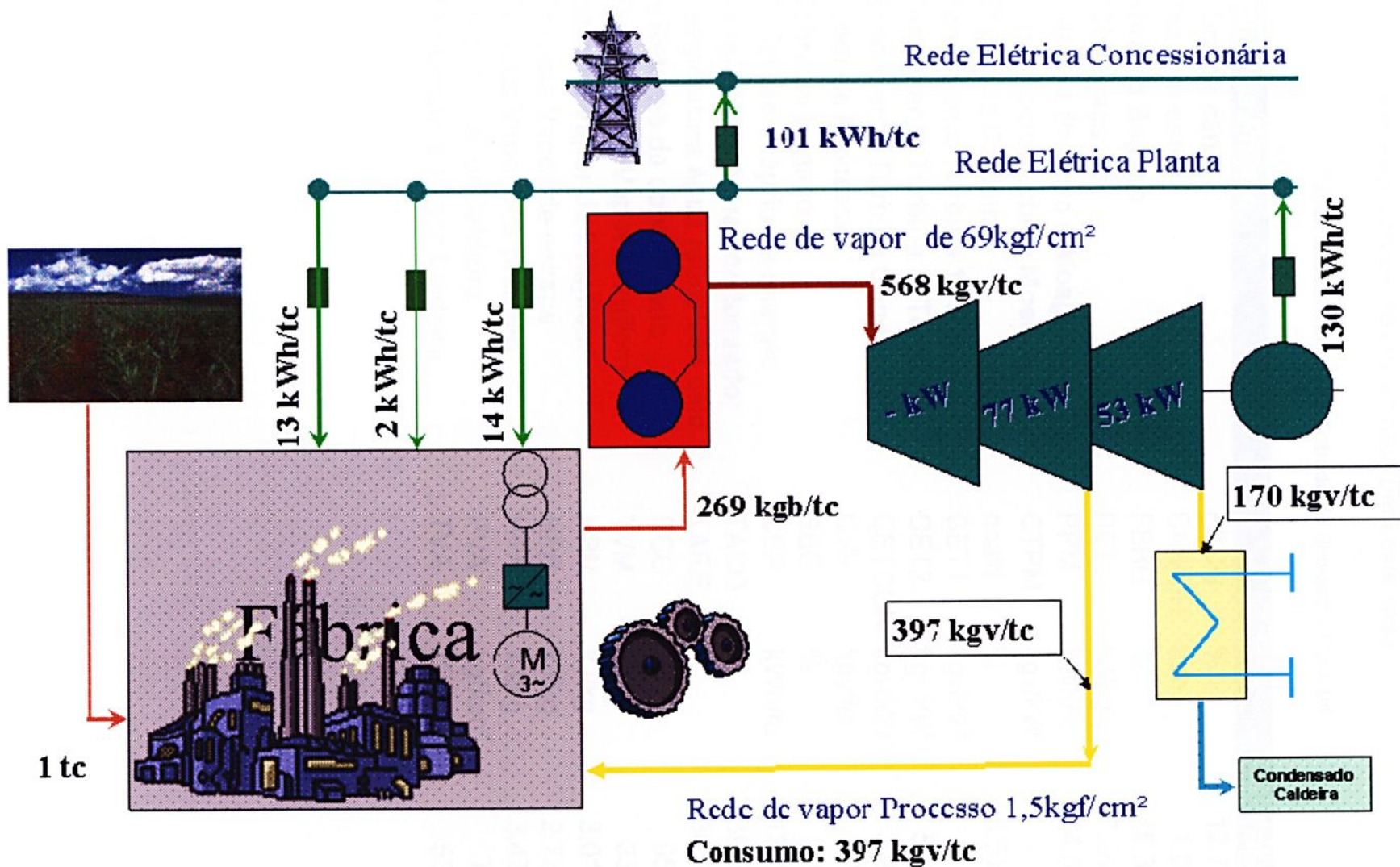
No caso anterior foi estudada a utilização do vapor utilizado na linha de média pressão para geração de energia elétrica, neste caso abordaremos uma outra otimização no consumo de vapor da termelétrica, agora na linha de baixa pressão. Serão realizadas algumas melhorias no consumo de vapor de processo causando uma maximização na geração de energia elétrica, tendo em vista que toda economia deste vapor pode maximizar a condensação do turbogerador (menor consumo específico) e conseqüentemente otimizar a geração de energia elétrica da Unidade Termelétrica.

As melhorias aqui citadas são realizadas dentro do processo de fabricação de açúcar e álcool e não serão detalhadas, bem como a análise de viabilidade técnica e econômica e seus impactos dentro deste processo.

Na figura V.09 temos o balanço térmico simplificado proposto para este caso. Da mesma forma que o Caso 03, este caso apresenta a mesma estrutura de cálculo do Caso 02, mudando somente algumas variáveis de entrada.

Temos nesse caso uma redução no valor do Consumo de Vapor de Processo (CVP), fazendo com que diminua a extração na segunda sangria e conseqüentemente aumente a quantidade de vapor condensado. A variação na quantidade de vapor condensado implica também numa mudança de temperatura desta água fazendo, conseqüentemente, que mude o cálculo da quantidade de vapor utilizado no desaerador, conforme mostrado no caso 02.

Figura V.09 – Balanço Térmico Simplificado Caso 04



Abaixo segue os valores de entrada para este caso:

Tabela V.04 – Valores de Entrada do Simulador Caso 04

Variáveis Projeto:			4º Caso
Fibra da cana	FBCN	%	12,70
Moagem cana	CNMOH	tc/h	1,00
Fibra do Bagaço	FBBG	%	46,30
PCI Bagaço	PCI	kJ/kg	7.243
Potência Preparo e Moagem	PPM	kWh/tc	14,00
Rendimento Turbina Moenda	CTPM	kgv/kW	-
Eficiência Caldeira	ncald	%	88,51%
Rendimento Turbina 1ª Tomada	CET1	kgv/kW	-
Rendimento Turbina 2ª Tomada	CET2	kgv/kW	5,16
Rendimento Turbina Condensação	CETCON	kgv/kW	3,20
Vapor de Processo	CVP	kgv/tc	376
Sobra de Bagaço	SBG	%	2%
Consumo Próprio de energia	CEP	kWh/tc	13,00
Temperatura água condensador	TACO	°C	39,50
Temperatura água reposição cald.	TARE	°C	30,00
% Retorno de condensado	RCO	%	95%
Temperatura Vapor 21kgf/cm²	TVM	°C	330
Entalpia Vapor de 21kgf/cm²	HPM	kJ/kg	3.019
Entalpia Vapor de escape	HPB	kJ/kg	2.733
Entalpia Vapor alta pressão	HPA	kJ/kg	3.475
Pressão Vapor Caldeira	PVA	kgf/cm²	70
Temperatura Vapor Caldeira	TVA	°C	530

6. Resultados

6.1. Apresentação dos Resultados

A seguir, temos os resultados dos casos apresentados anteriormente, é importante lembrarmos que toda a simulação foi realizada para uma tonelada de cana moída por hora, contudo pode-se realizar esta simulação para qualquer quantidade desejada.

Para o caso 01 podemos ressaltar que 01 tonelada de cana moída resulta em 269 quilos de bagaço útil (queimado na caldeira), ocasionando uma produção de vapor de 490 quilos. Temos como principais consumidores da linha de média pressão as turbinas do preparo e moagem e da casa de força, consumindo respectivamente 245 e 244 quilos de vapor, conforme Tabela VI.01.

O vapor utilizado na linha de média pressão mais o rebaixado pela redutora será consumido no processo, que por sua vez contempla o vapor utilizado no desaerador térmico juntamente com a quantidade utilizada para processar a cana-de-açúcar. Esta quantidade é de 490 quilos de vapor, conforme premissa do caso.

O vapor utilizado na casa de força resulta numa geração de energia elétrica de 13 kWh/tc que será utilizado no consumo interno da planta. Nota-se que neste caso somente é gerada a energia para atender a demanda interna, pois neste tipo de configuração não há exportação de energia elétrica.

Outros dados calculados são o rendimento elétrico global e a relação entre a energia gerada pela quantidade de cana moída, que respectivamente são 0,027 kW/kgv e 13 kWh/tc.

Tabela VI.01 – Resultados do Simulador Caso 01

Variáveis calculadas:			1º Caso
entalpia água condensada	HACON	kJ/kg	398
entalpia água de reposição	HARE	kJ/kg	126
entalpia água de alimentação 105oC	HAA	kJ/kg	440
Vazão água de reposição	MARE	m³/h	0,024
Vazão água condensada	MACON	m³/h	0,465
Vapor escape desaerador	MVDE	m³/h	0,012
Bagaço Disponível	BGD	tb/h	0,274
Bagaço útil	BGU	tb/h	0,269
Rendimento de Caldeira	CECA	kgv/kgb	1,825
Vapor Gerado	MVG	tv/h	0,490
Vapor Casa de Força	MVEE	tv/h	0,244
Vapor Redutora 21-->1,5	MVRE	tv/h	0,000
Consumo Vapor Linha 21	MVMP	tv/h	0,489
Vapor de Processo	CVP	tv/h	0,478
Vapor baixa total	MVBP	tv/h	0,490
Sobra de Bagaço	SBG	tb/h	0,000
Consumo Preparo e Moagem	CEPM	kWh/tc	14,00
Vapor Turbina Extração e Prep	MVPM	tv/h	0,245
Vapor Geração Energia Elétrica	MVEE	tv/h	0,244
Geração Energia Total	GETO	MW	0,013
Rendimento Elétrico Global	n EG	kW/kgv	0,027
Consumo próprio energia - processo	CVP	MW	0,013
Consumo próprio energia - moenda	CEPM	MW	-
Consumo Próprio total	CEPT	MW	0,013
Energia para venda	EV	MW	-
Energia produzida / ton cana	EVCM	kWh/tc	13,00
Energia para venda / ton cana	EPCM	kWh/tc	-

No caso 02, com a mudança do projeto, teremos a geração de vapor em alta pressão (70kgf/cm^2) e desta forma temos que a mesma tonelada de cana moída ainda resulta em 269 quilos de bagaço útil, ocasionando agora uma produção de vapor de 568 quilos.

Este vapor agora somente tem um destino, a turbina de alta eficiência térmica (Figura V.06). Temos ainda como consumidor da linha de média pressão as turbinas do preparo e moagem, sendo necessária a sangria de 245 quilos de vapor pela primeira extração. Conseqüentemente, em função do vapor total necessário no processo, teremos na segunda extração 245 quilos de vapor que somado ao vapor utilizado nas turbinas do preparo e moagem resultam na quantidade de vapor necessária para processar a cana e alimentar o desaerador térmico.

A diferença entre o vapor gerado e o utilizado na linha de baixa pressão é o vapor condensado na turbina de condensação, este valor é de 78 quilos de vapor.

Conforme visto anteriormente dividimos a turbina em três volumes de controle e com o consumo específico de cada "parte" desta turbina temos que a geração na condensação, primeira e segunda tomada são respectivamente, $24,3\text{kWh/tc}$, $8,2\text{kWh/tc}$ e $47,5\text{kWh/tc}$, totalizando $80,0\text{kWh/tc}$.

Com a mudança da caldeira tivemos também um acréscimo no consumo interno de energia, que neste caso totalizou $15,0\text{kWh/tc}$, desta forma a energia disponível para exportação é de $65,0\text{kWh/tc}$.

Neste caso já é possível notar, quando comparado com o caso anterior, a diferença entre os valores do rendimento elétrico global e a relação entre a energia gerada e vendida pela quantidade de cana moída, que respectivamente são $0,141\text{kW/kgv}$, 80kWh/tc e 65kWh/tc .



Tabela VI.02 – Resultados do Simulador Caso 02

Variáveis calculadas:			2º Caso
entalpia água condensada Turb.	HACON	kJ/kg	145
entalpia água de reposição	HARE	kJ/kg	126
entalpia água de alimentação 105oC	HAA	kJ/kg	440
Vazão água de reposição	MARE	m3/h	0,028
Vazão água condensada Turb.	MACON	m3/h	0,078
Vapor escape desaerador	MVDE	m3/h	0,014
Bagaço Disponível	BGD	tb/h	0,274
Bagaço útil	BGU	tb/h	0,269
Rendimento de Caldeira	CECA	kgv/kgb	2,112
Vapor Gerado	MVG	tv/h	0,568
Vapor Entrada Turbina	MVT	tv/h	0,568
Vapor 1ª Tomada	MVT1	tv/h	0,245
Vapor 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,245
Vapor Linha 21	MVMP	tv/h	0,245
Vapor de Processo	CVP	tv/h	0,476
Vapor baixa total	MVBP	tv/h	0,490
Vapor turbina condensação	MVTCON	tv/h	0,078
Consumo Preparo e Moagem	CEPM	kw	14,00
Vapor Turbina Extração e Prep	MVPM	tv/h	0,245
Vapor Geração - Condensação	MVTCON	tv/h	0,078
Vapor Geração - 1ª Tomada	MVT1	tv/h	0,245
Vapor Geração - 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,245
Geração Energia Condensação	GECON	MW	0,024
Geração Energia 1ª Tomada	GET1	MW	0,008
Geração Energia 2ª Tomada	GET2	MW	0,047
Geração Energia Total	GETO	MW	0,080
Rendimento Elétrico Global	n EG	kW/kgv	0,141
Consumo próprio energia - processo	CEP	MW	0,013
Consumo próprio energia - moenda	CEPM	MW	-
Consumo próprio energia - caldeira	CECA	MW	0,002
Consumo Próprio total	CEPT	MW	0,015
Energia para venda	EV	MW	0,065
Energia para venda / ton cana	EVCM	kWh/tc	65,19
Energia produzida / ton cana	EPCM	kWh/tc	79,95

No caso 03 não há nenhuma alteração na eficiência na utilização do combustível, mas sim na otimização do consumo de vapor de média pressão. Sendo assim, para uma tonelada de cana moída temos 269 quilos de bagaço útil, ocasionando a mesma produção de vapor de 568 quilos.

Este vapor não mais é extraído na primeira tomada e agora é aproveitado ao longo dos estágios da turbina. A extração na segunda tomada é agora de 490 quilos de vapor (necessário para alimentar o processo) e sua condensação permanece a mesma.

A utilização do vapor anteriormente extraído para a linha de média pressão causa um aumento de 39,2kW na geração de energia elétrica, sendo que, 24,3kW é gerado na condensação e 94,9kW é gerado na segunda extração, totalizando assim 119,2kW de geração total. Contudo a energia térmica anteriormente fornecida para o preparo e moagem deverá representar um acréscimo no consumo interno de energia elétrica de 14kW, totalizando assim cerca de 29kW utilizado em toda planta.

Desta forma, este caso apresenta aproximadamente uma energia para exportação de 90kW e um rendimento global de 0,21kW/kgv, conforme Tabela VI.03.



Tabela VI.03 – Resultados do Simulador Caso 03

Variáveis calculadas:			3º Caso
entalpia água condensada Turb.	HACON	kJ/kg	145
entalpia água de reposição	HARE	kJ/kg	126
entalpia água de alimentação 105oC	HAA	kJ/kg	440
Vazão água de reposição	MARE	m3/h	0,028
Vazão água condensada Turb.	MACON	m3/h	0,078
Vapor escape desaerador	MVDE	m3/h	0,014
Bagaço Disponível	BGD	tb/h	0,274
Bagaço útil	BGU	tb/h	0,269
Rendimento de Caldeira	CECA	kgv/kgb	2,112
Vapor Gerado	MVG	tv/h	0,568
Vapor Entrada Turbina	MVT	tv/h	0,568
Vapor 1ª Tomada	MVT1	tv/h	-
Vapor 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,490
Vapor Linha 21	MVMP	tv/h	-
Vapor de Processo	CVP	tv/h	0,476
Vapor baixa total	MVBP	tv/h	0,490
Vapor turbina condensação	MVTCON	tv/h	0,078
Consumo Preparo e Moagem	CEPM	kw	14,00
Vapor Turbina Extração e Prep	MVPM	tv/h	-
Vapor Geração - Condensação	MVTCON	tv/h	0,078
Vapor Geração - 1ª Tomada	MVT1	tv/h	-
Vapor Geração - 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,490
Geração Energia Condensação	GECON	MW	0,024
Geração Energia 1ª Tomada	GET1	MW	-
Geração Energia 2ª Tomada	GET2	MW	0,095
Geração Energia Total	GETO	MW	0,119
Rendimento Elétrico Global	n EG	kW/kgv	0,210
Consumo próprio energia - processo	CEP	MW	0,013
Consumo próprio energia - moenda	CEPM	MW	0,014
Consumo próprio energia - caldeira	CECA	MW	0,002
Consumo Próprio total	CEPT	MW	0,029
Energia para venda	EV	MW	0,091
Energia para venda / ton cana	EVCM	kWh/tc	90,51
Energia Produzida	EPCM	kWh/tc	119,27

No ultimo caso simulado não temos nenhuma alteração na termelétrica, e sim uma diminuição no consumo de vapor de baixa pressão na ordem de 100kgv/tc. Desta forma, há uma diminuição na quantidade de vapor extraído na segunda tomada (397kgv/h), e conseqüentemente, um aumento na quantidade de vapor condensado (170kgv/h).

Como vimos nos itens anteriores maximizamos a passagem de vapor por todos os estágios da turbina, tornando desta forma o processo de geração de energia elétrica mais eficiente. Este ganho de energia elétrica representa 11kW na geração total e como não houve aumento no consumo interno de energia ele é totalmente revertido para exportação.

Podemos ver na Tabela VI.04 que houve também aumento expressivo no valor do rendimento global (0,229kW/kgv).

Vale citar que a utilização de uma turbina de condensação flexibiliza o balanço térmico de uma usina de álcool e açúcar, cujas variações no consumo de vapor são constantes, fazendo com que habitualmente seja necessária à utilização de válvulas de alívio liberando assim o excedente de vapor para a atmosfera. Com a turbina de condensação toda variação no consumo de vapor no processo é assimilada pelo aumento ou diminuição da quantidade de vapor condensada, fazendo com que não haja necessidade da utilização das válvulas de alívio e conseqüentemente não seja jogada para atmosfera uma quantidade significativa de energia que neste caso será revertida em energia disponível para venda.



Tabela VI.04 – Resultados do Simulador Caso 04

Variáveis calculadas:			4º Caso
entalpia água condensada Turb.	HACON	kJ/kg	203
entalpia água de reposição	HARE	kJ/kg	126
entalpia água de alimentação 105oC	HAA	kJ/kg	440
Vazão água de reposição	MARE	m3/h	0,028
Vazão água condensada Turb.	MACON	m3/h	0,170
Vapor escape desaerador	MVDE	m3/h	0,021
Bagaço Disponível	BGD	tb/h	0,274
Bagaço útil	BGU	tb/h	0,269
Rendimento de Caldeira	CECA	kgv/kgb	2,112
Vapor Gerado	MVG	tv/h	0,568
Vapor Entrada Turbina	MVT	tv/h	0,568
Vapor 1ª Tomada	MVT1	tv/h	-
Vapor 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,397
Vapor Linha 21	MVMP	tv/h	-
Vapor de Processo	CVP	tv/h	0,376
Vapor baixa total	MVBP	tv/h	0,397
Vapor turbina condensação	MVTCON	tv/h	0,170
Consumo Preparo e Moagem	CEPM	kw	14,00
Vapor Turbina Extração e Prep	MVPM	tv/h	-
Vapor Geração - Condensação	MVTCON	tv/h	0,170
Vapor Geração - 1ª Tomada	MVT1	tv/h	-
Vapor Geração - 2ª Tomada	MVT2	tv/h	0,397
Geração Energia Condensação	GECON	MW	0,053
Geração Energia 1ª Tomada	GET1	MW	-
Geração Energia 2ª Tomada	GET2	MW	0,077
Geração Energia Total	GETO	MW	0,130
Rendimento Elétrico Global	n EG	kW/kgv	0,229
Consumo próprio energia - processo	CEP	MW	0,013
Consumo próprio energia - moenda	CEPM	MW	0,014
Consumo próprio energia - caldeira	CECA	MW	0,002
Consumo Próprio total	CEPT	MW	0,029
Energia para venda	EV	MW	0,101
Energia para venda / ton cana	EVCM	kWh/tc	101,48
Energia Produzida	EPCM	kWh/tc	130,24

6.2. Análise dos Resultados

Os resultados nos mostraram diferenças consideráveis nos casos simulados, tanto na geração como na exportação de energia elétrica, como mostra o quadro abaixo.

Tabela VI.05 – Quadro Comparativo do Potencial Gerador e Exportador

CASO	DESCRIÇÃO	GERAÇÃO kWh/tc	EXPORTAÇÃO kWh/tc
01	Conjunto de Baixa Eficiência Térmica	13,0	-
02	Conjunto de Alta Eficiência Térmica	80,0	65,2
03	Eletificação	119,3	90,5
04	Melhorias no Processo	130,2	101,5

Esta diferença deve-se basicamente ao aumento de eficiência de todo o sistema cogrador, resultado de um investimento considerável em melhorias e trocas dos equipamentos ali instalados.

Estes investimentos atualmente estão atingindo patamares na ordem de R\$2.200 por kW instalado. Vale salientar que nos últimos anos tivemos um aumento significativo neste valor, onde podemos destacar alguns fatores que contribuíram para este aumento, como por exemplo o “apagão”, a descoberta dos investidores desta nova oportunidade de negócio e obviamente o Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia, que apesar de não agradar todos os empreendedores causou, mesmo assim, um aumento na procura destes equipamentos.

Especificamente no caso do PROINFA, temos regulamentado pelo Decreto nº 5025 e pela Portaria nº 45 de 30 de março de 2004, um Valor Econômico da Tecnologia Específica da Fonte (VETEF) de R\$ 93,77 por kWh exportado (Valor Base Março de 2004), trazendo este valor para Março de 2005 (corrigido pelo IGPM maio de 2005), temos algo em torno de R\$ 104,5

por kWh. Para transformarmos os números da Tabela VI.05 em valores monetários, podemos considerar uma Usina com moagem média de 1.350.000 toneladas de cana por ano, e desta, forma poderemos avaliar os ganho de receita com o aumento na venda de energia elétrica, como vemos na Tabela VI.06.

Tabela VI.06 – Quadro Comparativo do Ganho de Receita Bruta

CASO	MOAGEM (tc/ano)	VETEF (R\$/MWh)	EXPORTAÇÃO kWh/tc	RECEITA BRUTA (R\$)
01	1.350.000,00	104,5	-	-
02	1.350.000,00	104,5	65,2	9.197.124
03	1.350.000,00	104,5	90,5	12.768.290
04	1.350.000,00	104,5	101,5	14.316.754

Um outro ponto a se avaliar para tomada de decisão do investimento é a estabilidade no fluxo de caixa da empresa, no caso específico do PROINFA temos que esta receita estaria garantida pelo prazo de 20 anos, somando-se a possibilidade de obtenção de recursos junto ao BNDES numa linha de crédito facilitada. Outra vantagem é o baixo impacto no custo operacional deste sistema, sendo necessário somente à qualificação técnica do corpo existente de profissionais, devido ao avanço tecnológico dos equipamentos ali instalados.

Como dito anteriormente, a implementação deste sistema implica também numa melhora no balanço térmico da empresa, minimizando as perdas de vapor para a atmosfera em função da variação da condensação da máquina evitando assim a atuação da válvula de alívio.

Soma-se aos benefícios citados anteriormente a depreciação dos equipamentos de baixa eficiência térmica ali instalados, que habitualmente são equipamentos antigos com custo de manutenção e reforma alto e juntando-se a isso a necessidade de expansão da produção de açúcar e álcool, fazendo com

que, necessariamente, haja um aumento no consumo de vapor no processo e conseqüentemente ultrapasse os limites nominais dos equipamentos instalados (Caldeiras e Turbogeneradores).

Desta forma, temos que considerar, que parte deste investimento deve ser atribuído ao processo de fabricação de açúcar e álcool, fazendo com que a viabilidade deste negócio aumente consideravelmente. Contudo, vale lembrar que, temos os custos da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição definido pela Aneel e pago as concessionárias, mais o custo da tarifa de fiscalização (TFSEE) e a alta carga tributária que incide sobre o produto, sendo estes fatores muitas vezes esquecidos na análise de investimento.



7. Conclusão

Este trabalho alcançou seu objetivo através das análises energéticas realizadas nos itens anteriores retratando a evolução de um sistema simples e convencional, Autoprodutores, até sistemas com níveis altos de modernização, Produtores Independentes de Energia, utilizando caldeiras de alta eficiência térmica e turbina de extração-condensação.

Nos resultados apresentados pode-se notar claramente que o caso 04 (planta mais moderna) tem o melhor desempenho energético enquanto o caso 01 (planta mais convencional) o pior. Nos outros casos temos soluções intermediárias, mostrando diferentes índices de desenvolvimento e eficiência tendo, conseqüentemente, diferentes valores de investimentos.

É importante citar que além do ganho financeiro nos casos apresentados também há uma melhoria técnica e operacional do sistema. A utilização da turbina de condensação possibilita flexibilização do balanço térmico da termelétrica, cujas variações no consumo de vapor de processo são constantes, fazendo com que habitualmente seja necessária à utilização de válvulas de segurança para aliviar pressurizações em função das diferenças dos consumos das linhas de vapor (Linha de alta, média e baixa pressão). Com a turbina de condensação toda variação no consumo de vapor no processo é assimilada pelo aumento ou diminuição da quantidade de vapor condensada, fazendo com que não haja necessidade da utilização das válvulas de segurança e conseqüentemente não seja jogada para atmosfera uma quantidade significativa de energia que neste caso será revertida em energia elétrica disponível para venda.

No caso 02, o aumento da eficiência energética também resultou num aumento do consumo interno de energia elétrica, pois com a mudança da classe de pressão da caldeira e a utilização de uma turbina de extração-condensação foi necessária a implementação de novos sistemas auxiliares (sistema adiabático, estação desmineralizadora, etc...) e grandes estações de bombeamento de água para o condensador. Este aumento significou cerca de

2,7% de toda energia maximizada neste processo, conforme podemos ver na Tabela VI.05.

No caso 03, temos outro fator que contribui significativamente para o aumento do consumo interno de energia elétrica, a motorização do preparo e moagem, resultando num aumento de 35,6% no ganho específico deste caso, contudo, de maneira geral, temos que o aumento total deste consumo saindo do caso 01 para o caso 03 é de apenas 14,8% e se considerarmos o projeto até o caso 04 este se reduz para 13,4% do ganho da geração de energia.

Pode-se constatar que apesar do aumento na potência gerada da planta, a demanda de potência no bombeamento não aumenta na mesma proporção da geração de potência. Isso é um indicador de que as plantas de alta pressão operando com turbinas mais eficientes são mais eficazes que aquelas de baixa pressão (Caso 01).

Vale ressaltar que conforme referência bibliográfica [29] que a turbina de condensação em seu ponto ótimo de geração (caso 04), faz com que a eficiência térmica global da planta seja menor quando comparado com o caso 03, pois temos uma quantidade alta de vapor que, de maneira “forçada”, é condensada sem ganho direto para o processo de fabricação de açúcar e álcool.

Conforme discutido anteriormente, é importante avaliar para tomada de decisão deste investimento, a estabilidade no fluxo de caixa da empresa que a receita da venda de energia proporciona e mais a possibilidade de obtenção de recurso externo para implementação deste projeto. Também faz parte desta análise a melhoria técnica dos equipamentos e, no caso de equipamentos depreciados, a divisão deste investimento com o restante do processo de fabricação de açúcar e álcool.

Este trabalho foi direcionado para otimização da geração de energia elétrica utilizando racionalmente a energia térmica disponível, contudo é viável que se analise individualmente o caso de cada central térmica, fazendo uma avaliação do mercado em longo prazo, desta forma é de extrema importância que seja feito um trabalho informativo voltado para o setor elétrico brasileiro

com o objetivo de esclarecer a importância do Setor Sucroalcooleiro para a matriz energética nacional e assim remunerar de forma adequada estes investidores.

A geração de energia elétrica do setor sucroalcooleiro é uma fonte de energia renovável estratégica para nossa matriz energética, pois sua produção é na “entressafra da geração hídrica” e desta forma, agrega valor à hidroeletricidade característica do nosso setor elétrico, ampliando assim a reserva de capacidade do Sistema Interligado Nacional (lastro físico). Outra vantagem é que essa energia produzida é injetada diretamente nas redes de distribuição de energia elétrica nos pontos de conexão com os clientes finais. Essa característica possibilita evitar perdas elétricas intrínsecas da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Além desses méritos, a instalação desta produção pode ser realizada no curto prazo, possibilitando ajuste da oferta e demanda num cenário de incertezas quanto ao crescimento do consumo.

Trabalhos futuros podem abordar este tema fazendo uma análise ao longo de uma safra, simulando variações de fibras, moagem, potências consumidas, consumo de vapor no processo, retorno de condensado, temperatura da água de reposição na caldeira e consumo interno de energia, etc...

Outra sugestão é a realização de uma análise de investimento em diferentes plantas já em operação e na implantação de novas Usinas, avaliando a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento para cada caso individualmente.

Adicionalmente, para complementação deste trabalho, podem-se analisar algumas soluções para otimização do consumo interno de energia elétrica, visando à utilização racional desta energia que será revertida num aumento de receita em função do aumento na exportação. Como sugestão pode-se estudar a utilização de conversores de frequência em cargas quadráticas, utilização de motores de alto rendimento e a substituição de

centrífuga multipolar por motor de indução controlado por inversor de frequência regenerativo.



8. Referências Bibliográficas

Alstom Power Industrial Turbines, 2001 "Steam Turbine Data Sheet", Proposta AA.SP.111.01.Rev01, Taubaté - SP.

Altafini, C. R. , "Estudo Computacional dos Ciclos Combinados Gás/Vapor na Cogeração de Calor e Potencia", Universidade de Caxias do Sul.

Ambiente Brasil, 2004, "Biomassa", Disponível em <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/biomassa.html>.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2004, "Estatísticas", Disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2004, "Balanço Energético Nacional", Disponível em <http://www.aneel.gov.br>

Bartholomeu, D. B., Salvi, J. V., Rocha, A. A., "Cogeração de Energia a Partir de Bagaço de Cana", Artigo Apresentado no XXXLX Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural (SOBER).

Balestieri, J.A.P., 2002, "Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor", Editora UFSC, Florianópolis - SC, 279p.

Barreda Del Campo, E.R. & Llagostera, J., 1996, "Estudo de Possibilidades de Incremento da Cogeração em Usinas Açucareiras Cubanas", Anais do VI Encontro de Ciências Térmicas, Florianópolis - SC, pp. 447-452.

Barreda Del Campo, E.R., Roxo, R., Nebra, S.A. & Bordonal, A.F., 1998, "Análises Energética e Exergética do Sistema de Cogeração da Usina Vale do Rosário", Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Vol. I, Rio de Janeiro - RJ, pp. 307-312.



Bejan, A., Tsatsaronis, G. & Moran, M., 1996, "Thermal Design & Optmization", John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 542p.

Brighenti, C.R.F, 2003, "Integração do Cogrador de Energia do Setor Sucroalcooleiro com o Sistema Elétrico", Dissertação de Mestrado PIPGE-USP, São Paulo - SP, 169p.

Brito, J.S., 2004, "A Cana como Gerador de Energia", Disponível em http://www.unica.com.br/pages/artigos_id.asp?ID=26.

Canal Energia – Portal GD Geração Distribuída, 2004, "A importância da cana-de-açúcar - Sua cultura reúne condições relevantes para se tornar a mais importante fonte de geração descentralizada no país", Disponível em <http://www.cogensp.com.br/opiniao/14012004.htm>.

Camargo, C.A., Ribeiro, A.M.M., Ushima, A.H., Sousa, M.E.P & Santos, N.F., 1990, "Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e Álcool: Manual de Recomendações", Publ. 1817, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo - SP, 798p.

Carpio, R.C., Teixeira, F.N., Bessa, F.C. & Lora, E.S., 1999, "Critérios de Avaliação Termodinâmica para Sistemas de Cogeração em Usinas de Açúcar", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), Águas de Lindóia - SP, 10p.

Castro, M., 2003, "Álcool Combustível – Que Energia é essa?", Disponível em <http://www.pick-upau.com.br/mundo/alcool/alcool.htm>.

Coelho, S.T., Oliveira Jr., S. & Zylberstajn, D., 1997, "Análise Termoeconômica da Cogeração de Eletricidade a Partir do Bagaço da Cana em uma Usina", Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), Bauru - SP, 8p.

Coelho, S.T., Paletta, C.E.M., Guardabassi, P., Pires, R.G., Silva, O.C. & Gomes Filho, A., 2002, "Levantamento do Potencial Real da Cogeração de



Excedentes no Setor Sucroalcooleiro”, Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro - RJ, pp. 1867-1875.

Destilaria Pioneiros, 1997, “Boletim de Dados de Processo da Safra 1997/1998”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 1998, “Boletim de Dados de Processo da Safra 1998/1999”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 1999, “Boletim de Dados de Processo da Safra 1999/2000”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 2000, “Boletim de Dados de Processo da Safra 2000/2001”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 2001, “Boletim de Dados de Processo da Safra 2001/2002”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 2002, “Boletim de Dados de Processo da Safra 2002/2003”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 2003, “Boletim de Dados de Processo da Safra 2003/2004”, Sud Mennucci - SP.

Destilaria Pioneiros, 2004, “Boletim de Dados de Processo da Safra 2004/2005”, Sud Mennucci - SP.

ELETROBRÁS - Centrais Elétricas Brasileiras, 2004, “Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica”, Disponível em http://www.eletrobras.gov.br/em_programas_proinfa/proinfa.asp.

Fernandes, A.C., 2000, “Cálculos na Agroindústria da Cana de Açúcar”, STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, Piracicaba - SP, 193p.

Fiomari, M. C., 2004, "Análise Energética E Exergética De Uma Usina Sucroalcooleira Do Oeste Paulista Com Sistema de Cogeração De Energia Em Expansão", Dissertação de Mestrado apresentada à FEIS/UNESP.

Higa, M & Bannwart, A.C., 2002, "Cogeração e Integração Térmica de Evaporadores de Múltiplos Efeitos em Usinas de Açúcar e Alcool", Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), João Pessoa - PB, 10p.

Horlock, J.H., 1997, "Cogeneration - Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics", Krieger Publishing Company, Florida, USA, 226p.

Hugot, E., 1969, "Manual da Engenharia Açucareira", Ed. Mestre Jou, São Paulo, 2 Vols., 1198p.

Jaguaribe E.F., Lobo, P.C., Neto, J.R.L, Souza, W.L. & Rocha, F.A.A., 2002, "Estudo Termodinâmico e Análise de Custos da Ampliação de um Sistema de Cogeração de Energia em uma Destilaria de Cana de Açúcar", Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, Caxambu - MG, 9p.

Jaguaribe, E.F., Lobo, P.C., Souza, W.L, Rocha, R.M. & Nascimento, E.T., 2004, "Vender Bagaço ou Comercializar a Energia Gerada pela Cogeração?", Anais do X Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas (em CD-ROM), Rio de Janeiro - RJ, 12p.

Jardim, A., 2004, "Biomassa da Cana – Um potencial a ser Aproveitado", Publicado no Site da LESP, São Paulo, Disponível em <http://www.al.sp.gov.br>.

Khartchenko, N.V., 1998, "Advanced Energy Systems", Taylor & Francis, Washington D.C., 285p.

Kitayama, O., 2003, "Situação da Cogeração, As Possibilidades de Cogeração com Biomassa da Cana e Legislação Nacional", Disponível em <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/seminario/alcool7.pdf>.



Kotas, T.J., 1995, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Krieger Publishing Company, Flórida, USA, 328p.

Lobo, P.C., Jaguaribe, E.F., Lima Neto, J.R., Rocha, F.A.A. & Souza, W.L., 2002, "Análise Comparativa de Sistemas de Cogeração Usados em Duas Diferentes Plantas Sucroalcooleiras", Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), João Pessoa - PB, 10p.

Machado, F. B. P., 2003, "Brasil, a Doce Terra – História do Setor", Disponível em <http://www.jornalcana.com.br/conteudo/HistoriadoSetor.asp>, Acessado em 5 de Março de 2004.

Mannarelli Filho, T., 2002, "Análise da Expansão Açucareira na Região Oeste do Estado de São Paulo", Dissertação de Mestrado, Universidade de Extremadura, Espanha, 260p.

MME - Ministério de Minas e Energia, 2004, "PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica", Disponível em <http://www.mme.gov.br/proinfa/default.asp>, Acessado em 10 de Agosto de 2004.

Orlando, J.A., 1991, "Cogeneration Planer's Handbook", Fairmont Press.

Patusco, J. A. M., 1993, "Tratamento da Cogeração nos Balanços Energéticos", Artigo COBEN 08/93, Disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

Patusco, J. A. M., 1988, "Tratamento da Cana de Açúcar no Balanço Térmico Nacional", Artigo COBEN 03/88, Disponível em <http://www.aneel.gov.br>.

Pellegrini, M. C., 2002, "Inserção de Centrais Cogedoras a Bagaço de Cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: Exemplo de Aplicação de Metodologia para Análise dos Aspectos Locacionais de Integração Energética", Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo - SP, 168p.

Rodrigues, L., G., S., 2003, "Medições e Análise de Sistemas Cogedores de uma Usina de Álcool e Açúcar", Estudo Especial Apresentado à FEIS/UNESP.



Sánchez Prieto, M.G.S., 2003, "Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas - SP, 255 p.

Sánchez Prieto, M.G.S., Carril, T.P. & Nebra, S.A., 2001, "Análise do Custo Exergético do Sistema de Geração de Vapor da Usina Cruz Alta", Anais do XVI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Vol. 4, Uberlândia - MG, pp. 196-205.

Sánchez Prieto, M.G.S. & Nebra, S.A., 2001, "Análise do Custo Exergético do Sistema de Cogeração de uma Usina Sucro-Alcooleira", Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Vol. 4, Uberlândia - MG, pp. 206-215.

UDOP - Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, 2004, "Estatística", Disponível em <http://www.udop.com.br/>.

UDOP – Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, 2004, "Álcool: História de um combustível sustentável", Disponível em <http://www.udop.com.br/>.

UDOP – Usinas e Destilarias do Oeste Paulista, 2004, "Subprodutos da cana se tornaram fonte de receita", Disponível em <http://www.udop.com.br/>.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2004, "A Bioeletricidade do Setor Sucroalcooleiro", Disponível em <http://www.portalunica.com.br/index.jsp>.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2004, "Estatísticas", Disponível em <http://www.portalunica.com.br/index.jsp>.

UNICA – União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, 2004, "Potencial De Co-Geração Com Resíduos Da Cana-De-Açúcar Sua Compatibilidade Com O Modelo Atual", Disponível em <http://www.portalunica.com.br/index.jsp>.



Van Wylen, G., Sonntag, R. & Borgnakke, C., 1995, "Fundamentos da Termodinâmica Clássica", Editora Edgard Blücher, São Paulo - SP, 594p.

Vieira, S. & Pellegrini, M.C., 1999, "Cogeração em Usinas Sucroalcooleiras de Médio Porte e sua Inserção no Parque Gerador Nacional", Anais do XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (em CD-ROM), Águas de Lindóia - SP, 8p.

Walter, A.C., 1994, "Viabilidade e Perspectivas da Cogeração e da Geração Termelétrica Junto ao Setor Sucro-Alcooleiro", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas - SP, 283p.



9. Apêndices

9.1. Dados de Produção da Destilaria Pioneiros S/A

Tabela IX.01 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 97/98

Safra	1997/1998
Dias Safra	239
Cana Moída (tc x 10 ³)	896
ART Cana (%)	16,16
Fibra Cana (%)	13,08
Fibra Bagaço (%)	47,91
Eficiência Agrícola (%)	93,69
Eficiência Industrial (%)	85,72
Açúcar (t x 10 ³)	38,9
Álcool Anidro (t x 10 ³)	13,7
Álcool Hidratado (m ³ x 10 ³)	42,2

Tabela IX.02 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 98/99

Safras	1998/1999
Dias Safra	221
Cana Moída (tc x 10 ³)	896
ART Cana (%)	15,35
Fibra Cana (%)	13,44
Fibra Bagaço (%)	46,99
Eficiência Agrícola (%)	94,17
Eficiência Industrial (%)	90,11
Açúcar (t x 10 ³)	57,5
Álcool Anidro (t x 10) ³	15,2
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	24,5

Tabela IX.03 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 99/00

Safra	1999/2000
Dias Safra	202
Cana Moída (tc x 10 ³)	882
ART Cana (%)	16,76
Fibra Cana (%)	13,72
Fibra Bagaço (%)	48,23
Eficiência Agrícola (%)	97,17
Eficiência Industrial (%)	91,61
Açúcar (t x 10 ³)	67,5
Álcool Anidro (t x 10) ³	13
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	26

Tabela IX.04 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 00/01

Safra	2000/2001
Dias Safra	161
Cana Moída (tc x 10 ³)	628
ART Cana (%)	16,38
Fibra Cana (%)	14,07
Fibra Bagaço (%)	47,64
Eficiência Agrícola (%)	92,25
Eficiência Industrial (%)	88,92
Açúcar (t x 10 ³)	40,5
Álcool Anidro (t x 10) ³	11,6
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	18,7

Tabela IX.05 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 01/02

Safra	2001/2002
Dias Safra	158
Cana Moída (tc x 10 ³)	693
ART Cana (%)	16,34
Fibra Cana (%)	14,11
Fibra Bagaço (%)	48,12
Eficiência Agrícola (%)	97,65
Eficiência Industrial (%)	90,96
Açúcar (t x 10 ³)	48,3
Álcool Anidro (t x 10) ³	22,5
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	8,5

Tabela IX.06 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 02/03

Safra	2002/2003
Dias Safra	173
Cana Moída (tc x 10 ³)	823
ART Cana (%)	15,87
Fibra Cana (%)	13,2
Fibra Bagaço (%)	47,04
Eficiência Agrícola (%)	96,24
Eficiência Industrial (%)	87,1
Açúcar (t x 10 ³)	56,8
Álcool Anidro (t x 10) ³	25,7
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	9,5

Tabela IX.07 – Dados de Produção Destilaria Pioneiros S/A Safra 03/04

Safra	2003/2004
Dias Safra	215
Cana Moída (tc x 10 ³)	1093
ART Cana (%)	15,8
Fibra Cana (%)	12,66
Fibra Bagaço (%)	46,15
Eficiência Agrícola (%)	96,98
Eficiência Industrial (%)	92,35
Açúcar (t x 10 ³)	79,7
Álcool Anidro (t x 10) ³	43,8
Álcool Hidratado (m ³ x 10) ³	0,6

9.2. Glossário de Termos Técnicos

- i) *Álcool Anidro*: álcool com grau alcoólico maior que 99,3 % (Fernandes, 2000).
- ii) *Álcool Hidratado*: álcool com grau alcoólico menor, 93,2 % (Fernandes, 2000).
- iii) *AR*: abreviatura de açúcares redutores (frutose mais glicose).
- iv) *ART*: abreviatura de açúcares redutores totais (AR + POL/0,95) (Fernandes, 2000).
- v) *Bagaço*: resíduo fibroso resultante da extração do caldo dos colmos da cana de açúcar que é constituído de fibra e caldo residual.
- vi) *Brix*: porcentagem em massa de sólidos solúveis aparentes contidos no caldo da cana.
- vii) *Cozedor*: trocador de calor entre o xarope e vapor de escape ou vegetal aumentando a concentração do xarope até que ocorra a cristalização.
- viii) *Dias de safra*: número de dias corridos contabilizados do primeiro ao último dia de moagem.
- ix) *Efeito*: caixas de evaporação seqüenciais ao pré-evaporador que normalmente utilizam como fonte quente vapor vegetal.
- x) *Eficiência agrícola*: a porcentagem de tempo que o setor agrícola não deixou faltar cana para o setor industrial.
- xi) *Eficiência industrial*: a porcentagem de tempo ao longo da safra que a moenda permaneceu funcionando, excetuando o tempo parado por falta de cana.
- xii) *Esgotamento da fábrica de açúcar*: porcentagem de açúcar que entrou na fábrica e que realmente cristalizou e foi ensacado.



xiii) *Extração do 1º terno: quantidade de açúcar extraído pelo primeiro terno de moenda.*

xiv) *Extração final: quantidade total de açúcar da cana extraído pelo tandem.*

xv) *Fibra da cana ou do bagaço: porcentagem em massa do colmo de cana insolúvel em água com relação à massa de cana ou bagaço.*

xvi) *Frutose: monossacarídeo, levógiro e redutor encontrado em pequenas proporções na cana de açúcar madura.*

xvii) *Glicose: monossacarídeo, dextrógiro e redutor encontrado em proporções bem maiores que a frutose na cana de açúcar madura.*

xviii) *Grau INPM do álcool: teor alcoólico do álcool.*

xix) *Horas efetivas de moagem: tempo efetivo de funcionamento do tandem de moendas.*

xx) *Moenda: conjunto de rolos responsável pelo esmagamento da cana e que normalmente são compostos de 4 unidades.*

xxi) *Mix de produção: é o percentual de açúcar e álcool produzido pela indústria que processa cana.*

xxii) *Perda na água de lavagem de cana: quantidade de açúcar perdido na água de lavagem de cana.*

xxiii) *Perda no bagaço: quantidade de açúcar perdido no bagaço que vai para a caldeira.*

xxiv) *Perda na torta de filtro: quantidade de açúcar perdido na torta proveniente do decantador de caldo.*

xxv) *Perda no multijato: quantidade de açúcar perdido por arraste nas caixas de evaporação de caldo e nos cozedores de açúcar.*



xxvi) *Pol*: abreviatura de polarização e é a unidade de medida (porcentagem em massa) que indica o teor de sacarose aparente.

xxvii) *Pré-evaporador*: trocador de calor entre o caldo e geralmente vapor de escape das turbinas gerando o vapor vegetal, proveniente da água contida no caldo.

xxviii) *Relação bagaço-vapor*: número característico de caldeiras que expressa a quantidade de bagaço necessária para produzir uma determinada quantidade de vapor, normalmente expresso em kg de bagaço por kg de vapor.

xxix) *Rendimento de fermentação*: define a quantidade de açúcar que através da fermentação alcoólica se transformou em álcool.

xxx) *Sacarose*: principal açúcar da cana, sendo um dissacarídeo não redutor e que por hidrólise produz glicose e frutose.

xxxi) *Safra 2003/2004*: período compreendido entre o início da moagem no ano de 2003 até o final da safra no ano de 2004.

xxxii) *Turbo Gerador*: conjunto gerador de energia elétrica, composto por uma turbina, um redutor de velocidades e um gerador elétrico.

xxxiii) *Tandem*: conjunto composto por várias moendas.

xxxiv) *Vapor vegetal*: vapor gerado a partir da água contida no caldo da cana.

xxxv) *Xarope*: matéria prima para fabricação de açúcar, ou seja, caldo de cana concentrado com Brix em torno de 65°.



**,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**

Câmpus de Ilha Solteira

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Av. Brasil Centro, 56

15385-000 Ilha Solteira - SP

www.dee.feis.unesp.br

