



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira

Ricardo Agudo Romão Júnior

Ilha Solteira – SP
Setembro/2009

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira

Ricardo Agudo Romão Júnior

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Ciências Térmicas.

Ilha Solteira – SP
Setembro/2009

FICHA CATALOGRÁFICA

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

R766a Romão Júnior, Ricardo Agudo.
Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira / Ricardo Agudo Romão Júnior. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2009.
164 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2009

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Bibliografia: p. 132-136

1. Indústria sucroalcooleira. 2. Colheita mecanizada. 3. Palha - Utilização.
4. Energia elétrica e calor - Cogeração. 5. Sistema de lavagem de cana a seco.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira

AUTOR: RICARDO AGUDO ROMÃO JÚNIOR

ORIENTADOR: Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA, Área: CIÊNCIAS TÉRMICAS, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. JOÃO BATISTA CAMPOS SILVA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



Prof. Dr. ALCIDES PADILHA

Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 25 de setembro de 2009.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus familiares Rose Mary Contiero, Marcelo Romão, Dolores Contiero, Vera Contiero, Gilberto Castilho e Fabiana Souza.

“Vivo por quem eu morreria”.

AGRADECIMENTOS

Devo meus agradecimentos às seguintes pessoas:

Aos meus familiares que me apoiaram por todos os anos de faculdade e posteriormente mesmo trabalhando incentivando-me a sempre dar continuidade nos meus estudos.

Aos colaboradores da Usina Pioneiros Bioenergia S/A que permitiram que dividisse meu tempo com o trabalho e as obrigações da pós-graduação, assim como auxílio técnico para que essa dissertação fosse mais rica em dados.

Ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos pelo apoio dado desde minha graduação até a conclusão da minha dissertação.

Aos meus amigos da República Gueri-Gueri que, além de me dar forças nas horas difíceis, sempre deixavam meus dias mais felizes e a outros vários amigos que fiz durante o período de faculdade e da pós-graduação, assim como no trabalho.

“Mais vale a lágrima da derrota, do que a vergonha de nunca ter tentado”.

RESUMO

Com o aumento da mecanização da colheita de cana de açúcar e a diminuição da prática de queima prévia da palha nos canaviais em função de protocolos ambientais estabelecidos entre os usineiros e o governo, cresce significativamente a quantidade de palha disponível no campo. Neste trabalho é analisada a utilização de palha como combustível suplementar para caldeiras convencionais de alta pressão (para bagaço), possibilitando assim um aumento de geração de energia excedente com a possibilidade de ser exportada para comercialização. Para tanto, são realizados estudos de perdas, ganhos e investimentos com a introdução da palha na indústria através de análises termodinâmicas de geração de energia, produção de álcool e açúcar, eficiências de equipamentos como colhedoras de cana, sistema de lavagem de cana a seco, picador de palha, caldeira de alta pressão, moagem da cana, entre outros. Como o poder calorífico inferior da palha é quase o dobro do poder calorífico do bagaço a geração de energia excedente para comercialização apresenta uma grande vantagem para o setor, sendo as perdas em produção de açúcar e álcool poucos significantes devido ao alto valor da venda de eletricidade.

Palavras-Chave: Indústria sucroalcooleira. Colheita mecanizada. Palha. Cogeração de energia. Sistema de lavagem de cana a seco.

ABSTRACT

With the increasing mechanization of the sugar cane harvest and the decline in the prior practice of burning of sugar cane straw, due to ambient protocols established by government and sugar and alcohol industries factories, there is a significant increase of the amount of straw available in the field. This paper considers the use of straw as additional fuel in conventional high-pressure boilers (of bagasse), thus enabling an increase in generation of energy surplus with the possibility to be exported for commercialization. For this, studies of losses, gains and investments are carried out with the introduction of straw in the industry through thermodynamics analysis to generate energy, production of alcohol and sugar, efficiencies of equipment like as mechanical cane harvest, washing system of cane to be dried, mincer of straw, high-pressure boiler, milling of sugar cane, among others. As the lower power heating of the straw is nearly twice of lower power heating the bagasse the generation of energy for commercialization presents a great advantage for the factories, and the losses in production of sugar and alcohol are not much significant due to the high value of electric energy sale.

Keywords: Sugar and alcohol factories. Mechanical harvest. Straw. Cogeneration of energy. Cane washing system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Participação da biomassa na matriz elétrica brasileira	26
Figura 1.2 –	Demanda por energia elétrica x Potencial da bioeletricidade (em MW médios)	27
Figura 2.1 –	Sistema Smokejack	35
Figura 2.2 –	Estimativa da produção de cana e de bioeletricidade.	38
Figura 2.3 –	Seqüência do processo de geração de potência e calor em sistemas de cogeração	38
Figura 2.4 –	Representação esquemática de um ciclo Rankine	40
Figura 2.5 –	Representação esquemática de um ciclo Brayton simples	42
Figura 2.6 –	Representação esquemática de um ciclo combinado	44
Figura 2.7 –	Cogeração com motor alternativo	46
Figura 2.8 –	Sistema de cogeração com turbina de extração-condensação	47
Figura 3.1 –	Colheita mecanizada da cana de açúcar	54
Figura 3.2 –	Prazos para eliminação da queima da palha no Estado de São Paulo	55
Figura 3.3 –	Montantes de energia provenientes de biomassa de cana comercializados em 2007 no Estado de São Paulo	56
Figura 3.4 –	Separação de impureza mineral	58
Figura 3.5 –	Picador de palha	60
Figura 3.6 –	Palha inteira e palha picada	60
Figura 3.7 –	Sistema de lavagem a seco de cana (Projeto Antigo - CTC)	61
Figura 3.8 –	Sistema de lavagem a seco de cana (Projeto Novo - CTC)	62
Figura 3.9 –	Relação da rotação do extrator primário da colhedora com a quantidade de impurezas a seco	63
Figura 3.10 –	Projeto atual do sistema de lavagem de cana a seco	64

Figura 3.11 – Mesa alimentadora	65
Figura 3.12 – Transporte de cana picada pela esteira de talisca	65
Figura 3.13 – Sistema de ventilação do sistema de limpeza de cana a seco	66
Figura 3.14 – Saídas de ar do sistema de limpeza de cana a seco	66
Figura 3.15 – Caixa coletora de palha e terra	67
Figura 3.16 – Sistema de lavagem a seco em uma usina sucroalcooleira	67
Figura 4.1 – Divisão da cana de açúcar	68
Figura 4.2 – Sistema aberto em comunicação com a atmosfera e n reservatórios térmicos.	81
Figura 5.1 – Produção energética global para o Caso 1	100
Figura 5.2 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 1).	100
Figura 5.3 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 1)	101
Figura 5.4 – Perdas de energia com a queima da palha no Caso 1 (Base cana queimada)	101
Figura 5.5 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira Safrá (Caso 1).	102
Figura 5.6 – Rentabilidade da energia excedente exportada no Caso 1 (Base cana queimada)	103
Figura 5.7 – Eficiência energética global no Caso 1 (100% colheita mecanizada)	104
Figura 5.8 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safrá do Caso 1 (Base cana queimada – 100 % colheita mecanizada)	104
Figura 5.9 – Produção energética global para o Caso 2	111

Figura 5.10 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 2)	112
Figura 5.11 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 2)	112
Figura 5.12 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar branco (Caso 2)	113
Figura 5.13 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar VHP (Caso 2)	113
Figura 5.14 – Perdas de energia com a queima da palha (Caso 2)	114
Figura 5.15 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra (Caso 2)	115
Figura 5.16 – Rentabilidade da energia excedente exportada no Caso 2 (Base cana queimada)	115
Figura 5.17 – Eficiência energética global no Caso 2 (100% colheita mecanizada)	116
Figura 5.18 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra no Caso 2 (Base cana queimada – 100% da colheita mecanizada)	117
Figura 5.19 – Produção energética global para o Caso 3.	124
Figura 5.20 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 3)	125
Figura 5.21 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 3)	125
Figura 5.22 – Perdas de ART convertidas em perdas e açúcar branco (Caso 3)	126
Figura 5.23 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar VHP (Caso 3)	126

Figura 5.24 – Perdas de energia com a queima da palha (Caso 3)	127
Figura 5.25 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra (Caso 3)	128
Figura 5.26 – Rentabilidade da energia excedente exportada (Caso 3)	128
Figura B.1 – Tela de dados de entrada do programa	139
Figura B.2 – Tela principal do programa (Parte 1)	140
Figura B.3 – Tela principal do programa (Parte 2)	141
Figura B.4 – Tela principal do programa (Parte 3)	142
Figura B.5 – Tela principal do programa (Parte 4)	143
Figura B.6 – Tela principal do programa (Parte 5)	144
Figura B.7 – Tela principal do programa (Parte 6)	145
Figura B.8 – Tela principal do programa (Parte 7)	146
Figura B.9 – Tela secundária do programa para cálculo da produção de álcool e açúcar	147
Figura B.10 – Tela secundária do programa para cálculo do balanço energético da usina	148
Figura B.11 – Tela secundária do programa para cálculo do seqüestro de ART pelo bagaço produzido	148
Figura B.12 – Tela secundária do programa para análise energética dos equipamentos do preparo e moagem de cana e preparo da palha (Parte 1)	150
Figura B.13 – Tela secundária do programa para análise energética dos equipamentos do preparo e moagem de cana e preparo da palha (Parte 2)	151
Figura B.14 – Tela secundária do programa para cálculo das perdas de ART convertidas em perdas de álcool e açúcar (Parte 1)	152

Figura B.15 – Tela secundária do programa para cálculo das perdas de ART convertidas em perdas de álcool e açúcar (Parte 2)	153
Figura B.16 – Perdas de energia com a queima da palha nos canaviais	154
Figura B.17 – Receita final com acréscimo da palha na indústria	154
Figura B.18 – Produção energética	155
Figura B.19 – Rentabilidade da energia comercializada com a introdução da palha na indústria	156

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potencial de geração de bioeletricidade até 2013	37
Tabela 2 – Parâmetros utilizados e resultados da simulação do uso combinado do bagaço e da palha para geração de eletricidade	57
Tabela 3 – Dados de impureza e eficiência de separação em função do tipo de coleta (projeto antigo)	62
Tabela 4 – Dados de impureza e eficiência de separação em função do tipo de coleta	63
Tabela 5 – Composição química típica de um colmo de cana de açúcar	69
Tabela 6 – Dados de entrada para uso no programa	70
Tabela 7 – Porcentagem de separação de palha pelas colhedoras	71
Tabela 8 – Classificação do açúcar cristal	75
Tabela 9 – Dados de entrada para cálculo de exportação de energia e eficiência térmica	86
Tabela 10 – Dados de equipamentos do setor de preparo e moagem de cana-de açúcar	90
Tabela 11 – Dados de equipamentos do setor de preparo da palha	90
Tabela 12 – Dados de entrada para cálculos (Caso 1)	95
Tabela 13 – Rendimento do canavial (Caso 1)	95
Tabela 14 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 1)	96
Tabela 15 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 1)	96
Tabela 16 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 1)	97
Tabela 17 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 1)	97

Tabela 18 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 1)	98
Tabela 19 – Geração total e exportação de energia por safra em MWh/safra (Caso 1)	99
Tabela 20 – Dados de entrada para cálculos (Caso 2)	106
Tabela 21 – Rendimento do canavial (Caso 2)	106
Tabela 22 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 2)	107
Tabela 23 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 2)	107
Tabela 24 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 2)	108
Tabela 25 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 2)	108
Tabela 26 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 2)	109
Tabela 27 – Geração total e exportação de Energia MWh / safra (Caso 2)	110
Tabela 28 – Dados de entrada para cálculos (Caso 3)	119
Tabela 29 – Rendimento do canavial (Caso 3)	119
Tabela 30 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 3)	120
Tabela 31 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 3)	120
Tabela 32 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 3)	121
Tabela 33 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 3)	121
Tabela 34 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 3)	122
Tabela 35 – Geração total e exportação de energia no Caso 3 (MWh / safra)	123
Tabela 36 – Comparação entre os casos analisados	129

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CGCE	- Câmara de Gestão da Crise Energética
CPFL	- Companhia Paulista de Força e Luz
COGEN-SP	- Associação Paulista de Cogeração de Energia
CTC	- Centro de Tecnologia Canavieira
GOELRO	- Plano Governamental de Eletrificação Russa
MAE	- Mercado Atacadista de Energia
MME	- Ministério de Minas e Energia
NUPLEN	- Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCI	- Poder Calorífico Inferior do Combustível
PPT	- Programa Prioritário de Termoeletricidade
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
PURPA	- <i>Public Utilities Regulatory Policy Act</i>
RP	- Regime Permanente
SIN	- Sistema Interligado Nacional
SLCS	- Sistema de Limpeza de Cana a Seco

NOMENCLATURA

Símbolos Latinos

$A_{Plantio}$	- Área necessária para o plantio da cana de açúcar (ha);
ART	- Açúcar redutor total (%);
ART_{Colmo}	- ART do colmo da cana de açúcar (kg);
ART_{DP}	- ART disponível para o processo (kg de ART);
ART_{Proc}	- ART para o processo (kg);
ART_{PP}	- ART perdido no processo (kg de ART);
ART_{Rec}	- ART recuperado (kg de ART);
b_{comb}	- Exergia específica do bagaço da cana (kJ/kg);
b_e	- Exergia específica na entrada da caldeira (kJ/kg);
b_{fis}	- Exergia física específica (kJ/kg);
b_{qui}	- Exergia química específica (kJ/kg);
b_s	- Exergia específica na saída da caldeira (kJ/kg);
b_t	- Exergia específica total (kJ/kg);
Bag_{Disp}	- Bagaço de cana disponível (t/safra);
$C_{Energia}$	- Custo da venda de energia (R\$/MW);
C_{Branco}	- Custo de venda do açúcar branco (R\$/sacas);
C_{VHP}	- Custo de venda do açúcar VHP (R\$/sacas);
C_{Aan}	- Custo de venda do álcool anidro (R\$/m ³);
C_{Ahi}	- Custo de venda do álcool hidratado (R\$/m ³);
$Cana_{Colmo}$	- Porcentagem de colmo na cana (%);
$Cana_{Total}$	- Cana total plantada (t);
Cte_{Pot}	- Constante de potência do motor do equipamento;
Cte_{Cons}	- Constante de consumo do equipamento (kWh/ t _{cana});
$Cap_{Máx}$	- Capacidade máxima do equipamento (t _{cana} /h ou t _{palha} /h);
Cv_{Proc}	- Consumo de vapor pelo processo (kg/t _{cana});
C_{Ext}	- Consumo da turbina na extração (kg _{vapor} /kW);

- C_{Cond} - Consumo da turbina na condensação ($\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{kW}$);
- C_{Moenda} - Consumo de energia pelas moendas (MW/safra);
- C_{Total_Planta} - Consumo total de energia na planta sucroalcooleira (MW/safra);
- $C_{esp_{Moenda}}$ - Consumo específico da moenda ($\text{kWh}/\text{t}_{\text{cana}}$);
- $C_{esp_{Proc}}$ - Consumo específico do processo ($\text{kWh}/\text{t}_{\text{cana}}$);
- $C_{extra_{Palha}}$ - Consumo extra de energia no processamento da palha (MW/safra);
- $C_{int_{Proc}}$ - Consumo de energia interno do processo (MW/safra);
- D_{Aab} - Densidade do álcool absoluto (kg/l);
- \dot{E}_w - Taxa de trabalho útil (kW);
- $E_{Total_{Cons}}$ - Energia total consumida pelos equipamentos ($\text{kWh}/\text{t}_{\text{cana}}$);
- Exp_{Total} - Exportação total de energia (MWh/safra);
- G_{Cond} - Geração de energia através da condensação da turbina (MW);
- G_{Ext} - Geração de energia através da extração da turbina (MW);
- G_{Total} - Geração total da turbina (MW);
- h_{Aal} - Entalpia da água de alimentação (kJ/kg);
- h_e - Entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg);
- h_o - Entalpia específica no estado de referência (kJ/kg);
- h_s - Entalpia específica na saída do volume de controle (kJ/kg);
- h_{Vger} - Entalpia do vapor gerado (kJ/kg);
- \dot{I}_i - Irreversibilidade num determinado equipamento (kW);
- \dot{m} - Vazão mássica (líquido ou vapor) no volume de controle (kg/s);
- \dot{m}_{comb} - Vazão mássica de combustível consumido na caldeira (kg/s);
- \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);
- M_{Safra} - Moagem total (t/safra);
- P - Pressão (kPa);
- P_o - Pressão no estado de referência (kPa);
- P_{Bag} - Bagaço gerado a partir da cana de açúcar (%);
- $P_{cald_{Bag}}$ - Produção de vapor por bagaço pela caldeira ($\text{kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{bag}}$);

$P_{cald_{Palha}}$	- Produção de vapor por palha pela caldeira (kg_{vapor} / kg_{palha});
P_{Caldo}	- Porcentagem de caldo existente na cana de açúcar (%);
P_{FB}	- Porcentagem de fibra no bagaço (%);
P_{FC}	- Porcentagem de fibra no colmo (%);
P_{Colmo}	- Porcentagem de colmo na cana de açúcar (%);
P_{Motor}	- Potência do motor do equipamento (kW);
$P_{Útil}$	- Potência útil do equipamento (kW);
$Palha_{Disp}$	- Palha disponível (t/safra);
PCI_{Bag}	- Poder Calorífico Inferior do bagaço (kJ/kg);
PCI_{comb}	- Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg);
PCI_{Palha}	- Poder Calorífico Inferior da palha (kJ/kg);
Pf_{Aan}	- Produção final de álcool anidro (litros);
Pf_{Ahi}	- Rendimento da destilaria (litros);
Pf_{Branco}	- Produção Final de Açúcar Branco (sacas);
Pf_{VHP}	- Produção final de açúcar VHP (sacas);
Pol_{Branco}	- Pol para produção de açúcar branco (%);
Pol_{VHP}	- Pol para produção de açúcar VHP (%);
$Prod$	- Produtividade (t/ha);
\dot{Q}_{vc}	- Taxa de transferência de calor para o volume de controle (kW);
R_{Dest}	- Rendimento da destilaria (%);
$R_{ExpTotal}$	- Receita final para exportação de energia (R\$/MW);
$R_{Pf_{Branco}}$	- Receita final para produção de açúcar branco (R\$/sacas);
$R_{Pf_{VHP}}$	- Receita final para produção de açúcar VHP (R\$/sacas);
$R_{Pf_{Aan}}$	- Receita final para produção de álcool anidro (R\$/m ³);
$R_{Pf_{Ahi}}$	- Receita final para produção de álcool hidratado (R\$/m ³);
Re_{Aan}	- Rendimento estequiométrico do álcool anidro (kg/kg ART);
Re_{Ahi}	- Rendimento estequiométrico do álcool hidratado (kg/kg ART);
Rg_{Aan}	- Rendimento global do álcool anidro (l/kg ART);

Rg_{Ahi}	- Rendimento global do álcool hidratado (l/kg ART);
Rp_{Ferm}	- Rendimento prático da fermentação (%);
Rt_{Aan}	- Rendimento teórico do álcool anidro (l/kg ART);
Rt_{Ahi}	- Rendimento teórico do álcool hidratado (l/kg ART);
s_e	- Entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kgK);
s_o	- Entropia específica no estado de referência (kJ/kgK);
s_s	- Entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kgK);
\dot{S}_{ger}	- Geração de entropia no volume de controle (kJ/kgK);
Sq	- Quantidade de ART seqüestrado por quantidade de bagaço produzido;
T	- Temperatura (K);
T_o	- Temperatura no estado de referência (K);
T_j	- Temperatura superficial do volume de controle (K);
TA_{Aan}	- Teor alcoólico do álcool anidro (%peso);
TA_{Ahi}	- Teor alcoólico do álcool hidratado (%peso);
V	- Velocidade do fluxo de massa (m/s);
V_{Cond}	- Vapor destinado à condensação da turbina (t/safra);
V_{Ext}	- Vapor destinado à extração da turbina (t/safra);
V_{Ger}	- Vapor gerado pela caldeira (t/safra);
\dot{W}_{perd}	- Taxa de trabalho perdido (kW);
\dot{W}_{vc}	- Potência referente ao volume de controle (kW);
\dot{W}_{rev}	- Taxa de trabalho reversível (kW);
x_i	- Fração do componente na mistura (%).

Símbolos Gregos

δ_i	- Porcentagem da irreversibilidade de cada equipamento em relação ao total da planta (%);
$\varepsilon_{Energética}$	- Produção energética (kWh/t _{cana});
ε_{Ext}	- Eficiência de extração da moenda (%);
Δh_{iso}	- Diferença entre as entalpias de entrada e saída do volume de controle, para processo isoentrópico (kJ/kg);
η_{Cald}	- Rendimento da caldeira (%);
η_I	- Eficiência pela 1ª Lei (%);
η_{II}	- Eficiência pela 2ª Lei (%);
$\mu_{0,i}$	- Potencial químico de referência do elemento (T_0, P_0);
μ_i	- Potencial químico do elemento na mistura (T_i, P_i);
$\sum_{i=1}^n \dot{I}_i$	- Irreversibilidade total da planta (kW).

Legendas

AA	- Álcool Anidro;
AH	- Álcool Hidratado;
BA	- Bomba de Alimentação;
C	- Caldeira;
CC	- Câmara de Combustão;
CR	- Câmara de Recuperação;
CH	- Chaminé;
CO	- Condensador;
CP	- Compressor;
G	- Gerador;
PV	- Parcialmente Ventilada;
RP	- Regime Permanente;
SLCS	- Sistema de Limpeza de Cana a Seco;
SV	- Sem Ventilação;
TG	- Turbina a Gás;
TV	- Turbina a Vapor;
V	- Ventilada.

SUMÁRIO

1	Introdução	24
1.1	O Setor Elétrico Brasileiro.....	24
1.2	Contribuição Energética do Setor Sucroalcooleiro	25
1.3	Relevância do Tema e Objetivo.....	27
1.4	Revisão da Literatura.....	28
2	Aspectos da Cogeração de Energia.....	34
2.1	Definição de Cogeração	34
2.2	Histórico da Cogeração	35
2.3	Ciclos de Cogeração.....	38
2.3.1	<i>Ciclo Rankine</i>	39
2.3.2	<i>Ciclo Brayton</i>	41
2.3.3	<i>Ciclo Combinado</i>	44
2.3.4	<i>Ciclos Otto e Diesel</i>	45
2.4	Sistemas de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro	46
2.5	Programas de Incentivo a Cogeração Criados pelo Governo.....	47
2.5.1	<i>Programa Prioritário de Termoeletricidade</i>	47
2.5.2	<i>Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica</i>	48
2.5.3	<i>Programa Paulista de Bioenergia</i>	50
3	Aproveitamento da Palha para Cogeração.....	52
3.1	Potencial Energético da Palha para Cogeração	52
3.2	Sistema para a Separação da Palha	57
3.3	Origens do Sistema de Lavagem de Cana a Seco, Testes e Resultados Obtidos	61
3.4	Princípios de Funcionamento do Sistema de Limpeza de Cana a Seco.....	64
4	Conceitos e Metodologia Aplicada para o Aproveitamento da Palha	68
4.1	Dados de Entrada.....	68
4.2	Produção de Álcool.....	72
4.3	Fabricação de Açúcar.....	74
4.4	Balanço Energético da Geração de Energia.....	76
4.4.1	<i>Conceitos Termodinâmicos</i>	76

4.4.1.1	<i>Primeira Lei da Termodinâmica</i>	76
4.4.1.2	<i>Segunda Lei da Termodinâmica</i>	77
4.4.1.3	<i>Balanço de Exergia</i>	78
4.4.1.4	<i>Irreversibilidade dos Equipamentos</i>	83
4.4.1.5	<i>Eficiências Térmicas pela Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica</i>	84
4.4.2	<i>Exportação de Energia e Produção Energética</i>	86
4.4.3	<i>Análise Energética dos Equipamentos do Preparo e Moagem de Cana e do Preparo da Palha</i>	89
4.5	<i>Cálculo do Seqüestro de ART pelo Bagaço</i>	91
4.6	<i>Balanço Econômico da Geração de Energia, Produção de Álcool e Açúcar</i>	92
5	Resultados	94
5.1	<i>Caso 1</i>	94
5.1.1	<i>Resultados Termodinâmicos</i>	98
5.1.2	<i>Resultados Econômicos</i>	100
5.2	<i>Caso 2</i>	105
5.2.1	<i>Resultados Termodinâmicos</i>	109
5.2.2	<i>Resultados Econômicos</i>	111
5.3	<i>Caso 3</i>	118
5.3.1	<i>Resultados Termodinâmicos</i>	122
5.3.2	<i>Resultados Econômicos</i>	124
5.4	<i>Tabela Comparativa entre os Casos</i>	129
6	Conclusões	130
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A	137
	ANEXO A	157

1 Introdução

A ocorrência da crise energética em 2001, decorrente da redução de água em reservatórios das hidrelétricas por escassez de chuvas e do aumento do consumo de energia acima da capacidade do setor público em responder ao crescimento dessa demanda, levou o Brasil a um panorama de incertezas quanto à garantia de oferta de energia.

Uma das alternativas para suprir o déficit de eletricidade é o estímulo à geração independente e descentralizada e a participação de capital privado no sistema através da construção de pequenas centrais hidrelétricas e termelétricas, além do aumento da geração de energia elétrica através da cogeração em indústrias, com destaque para as sucroalcooleiras.

Diante deste contexto, a seguir serão apresentados alguns detalhes do setor elétrico brasileiro: a contribuição energética do setor sucroalcooleiro; a relevância e objetivos do presente trabalho, bem como uma revisão bibliográfica sobre o assunto.

1.1 O Setor Elétrico Brasileiro

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro sofreu várias mudanças estruturais que geraram uma série de inovações, quer seja de ordem institucional ou em nível de regulamentação, que alteraram sensivelmente o panorama, até então estável e controlado pelo governo, para um ambiente competitivo. Assim, foram criadas a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 1996, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e o Mercado Atacadista de Energia (MAE) em 1998, a Câmara de Gestão da Crise Energética (CGCE) em 2001, dentre outras agências e órgãos, que passaram a regular o sistema elétrico dentro de um novo contexto, cujo objetivo maior foi passar de um mercado de energia elétrica onde predominam os consumidores cativos, para um mercado de livre negociação.

As recentes transformações estruturais do setor elétrico brasileiro vêm seguindo as tendências mundiais, cujo caráter é eminentemente descentralizador, com maior espaço para a produção de eletricidade em geradores independentes das concessionárias; uso mais intensivo de fontes energéticas renováveis; auto-produção energética e a geração distribuída, contexto dentro do qual se destaca a cogeração no setor sucroalcooleiro (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

A partir da biomassa produzida pelo seu processo produtivo, o potencial de geração de energia elétrica excedente possui como principais determinantes a alternativa tecnológica adotada para o ciclo termoelétrico de cogeração, o crescimento da cultura da cana de açúcar, as alterações técnicas para redução dos consumos específicos de energia mecânica, térmica e elétrica no processo produtivo de açúcar e álcool e o método de colheita adotado.

O potencial de mercado para a comercialização do excedente de energia elétrica depende fundamentalmente da estrutura do setor elétrico, do interesse das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica em agregar esta fonte a seu portfólio, da disposição dos empresários do setor sucroalcooleiro em investir nesta geração de energia elétrica e da disposição das concessionárias em remunerar adequadamente a energia elétrica contratada.

1.2 Contribuição Energética do Setor Sucroalcooleiro

Há alguns anos vem sendo discutido o melhor aproveitamento do potencial econômico da biomassa da cana de açúcar, tanto o bagaço de cana de açúcar como a biomassa que compõe a planta no campo (palhiço): suas folhas, pontas e palhas.

Com esse advento da cogeração e a possibilidade de exportação de energia elétrica, além da competitividade do mercado, as usinas passaram a se preocupar com a eficiência das suas máquinas térmicas, já que nessa situação, além de atender a demanda térmica e eletromecânica, o excedente de energia pode ser comercializado.

Em 2008 a agroindústria sucroalcooleira brasileira possuía cerca de 3.000 MW de potência instalada, que não era totalmente utilizada. As usinas

comercializavam apenas uma parte da geração de energia (aproximadamente 600 MW), outra parcela produzida era consumida pelo próprio processo da usina (mais de 2.000 MW durante a safra). Atualmente, a comercialização da energia do bagaço e da palha representa menos de 1 % da matriz elétrica nacional, sendo que a biomassa como um todo (considerando outros resíduos), corresponde 3,5 %, conforme mostra a Figura 1.1. Das cerca de 360 usinas em funcionamento, praticamente todas geram o insumo para a sua própria demanda, mas apenas 10 % aproximadamente comercializam excedentes para o mercado. Segundo a UNICA (União da Indústria da Cana de Açúcar), algumas unidades ainda não se sentem estimuladas pelos preços oferecidos ao insumo a investir em novos equipamentos para tornar a energia uma receita adicional aos seus tradicionais produtos (BALEOTTI, 2008).

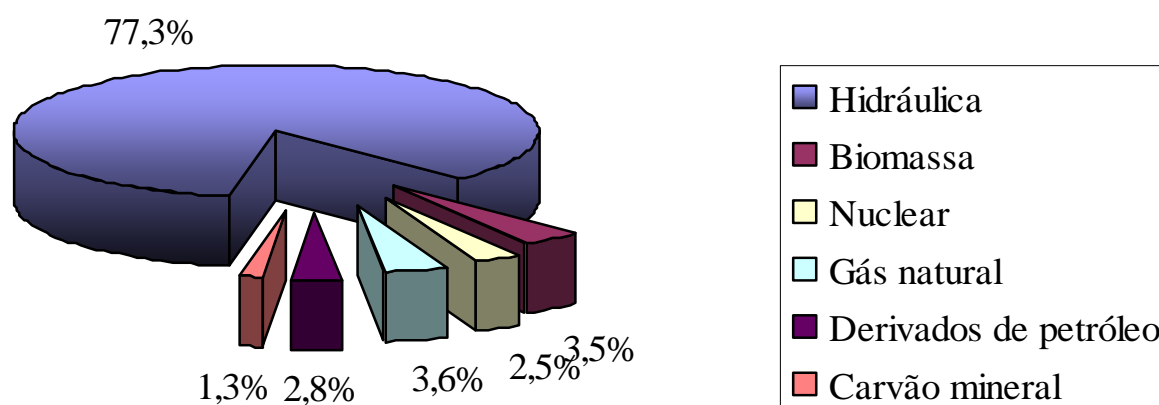


Figura 1.1 – Participação da biomassa na matriz elétrica brasileira.

Fonte: www.mme.gov.br

Com o aumento de produção de cana de açúcar devido à expansão das áreas plantadas e às novas tecnologias empregadas e com a possibilidade de aproveitamento da palha através da colheita mecanizada, a cada dia que passa o potencial de geração de energia do setor sucroalcooleiro está em ascendência, assim o setor poderá atender todo o volume adicional de energia ainda não contratado no período de 2011 a 2013, conforme mostra a Figura 1.2.

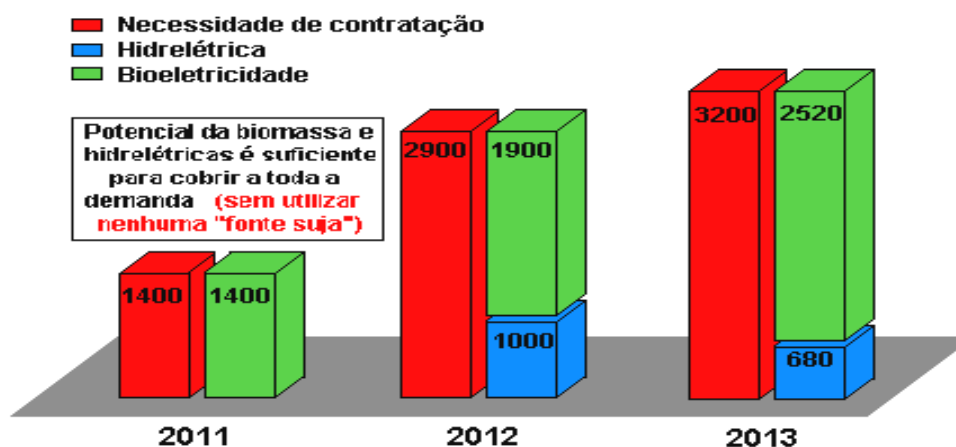


Figura 1.2 – Demanda por energia elétrica x Potencial da bioeletricidade (em MW médios).

Fonte: http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_113/mc_1.html

A UNICA assegura que o setor terá potência para injetar no mercado elétrico nacional de 11.500 MW médios na safra 2015/2016, quando processará 829 milhões de toneladas de cana, a 14.400 MW médios em 2020/2021. Neste ciclo, a entidade prevê a produção de 1.038 bilhões de toneladas da matéria-prima, que corresponderia por 15 % da matriz energética nacional no período.

Um estudo da empresa KOBLOITZ mostra que, quando o setor estiver moendo 500 milhões de toneladas de cana, terá capacidade para produzir 4.886 MW médios, apenas considerando geração de energia com bagaço, sendo que a palha e os ponteiros vão agregar maior volume para cogeração. Hoje, um terço da energia da cana presente nos resíduos é desperdiçado em decorrência do corte manual, que adota a prática da queima da cana no campo para o corte.

1.3 Relevância do Tema e Objetivo

A cultura da cana de açúcar reúne condições relevantes para se tornar a mais importante fonte de geração descentralizada no país, sendo que a energia renovável produzida pelas usinas sucroalcooleiras para uso externo (etanol e eletricidade) apresenta uma boa sustentabilidade, pois permite a redução das emissões de gases de efeito estufa em cerca de 12,7 milhões de toneladas de carbono equivalente.

Assim, é desejável que a evolução das usinas ocorra de forma a:

- Aumentar a eficiência no uso do bagaço;
- Desenvolver a colheita/utilização da palha para gerar mais energia;
- Buscar produtos de fermentações do açúcar;
- Buscar novas opções (energéticas) para o etanol.

Diante deste contexto, neste trabalho é analisada a utilização de palha como combustível suplementar para caldeiras convencionais de alta pressão para bagaço. Para tanto, são realizados estudos com perdas, ganhos e investimentos com a introdução da palha na indústria, através de análises termodinâmicas de geração de energia, produção de álcool e açúcar, eficiência de extração de palhicho das colhedoras de cana, sistema de lavagem de cana a seco, picador de palha, caldeira de alta pressão, moagem da cana, entre outros.

1.4 Revisão da Literatura

Foram analisados diversos estudos, pesquisas e reportagens sobre o tema do presente trabalho, como aplicações e resultados práticos, sendo que a seguir serão feitos alguns comentários sobre algumas publicações que trouxeram alguma contribuição para o mesmo.

Zulauf, Caporali e Videira (1985), para cálculo da energia liberada pela queima, consideraram valores entre 4 % e 11,5 % de palha e entre 6 % e 16,2 % de ponteiros. Os autores citam ainda valores encontrados em Cuba que, em 144 t de massa total (*in natura*), 28 t corresponderiam a ponteiros e 16 t seriam folhas verdes e folhas secas, o que equivaleria a 19,4 e 11,1 %, respectivamente. Para determinação da energia gerada pela queima, foi determinado em laboratório o poder calorífico da palha, que corrigido pelo teor médio de umidade nas condições dos experimentos, chegou a um valor de 2.576 kcal/kg palha (poder calorífico inferior). Na Índia, segundo Kadam e Jadhav (1995), são estimados cerca de 10 t/ha de resíduos de colheita e no Brasil, Macedo (1997) considerou uma média de

matéria seca de resíduos de 13,9 t/ha, sendo 10,1 t/ha para folhas secas, 3,0 t/ha para folhas verdes e 0,8 t/ha para ponteiros.

Ripoli et al. (1991) afirmaram que, com o aumento da colheita mecânica, as usinas que desejarem agregar valor por meio do aproveitamento da palha tenderão a apresentar custos operacionais menores do que os atuais, pois as futuras colhedoras de cana picada, por exigência de mercado, poderão apresentar valores de aquisição por volta de 20 a 30 % menores do que os atuais (por volta de US\$ 300.000), visto que não mais apresentarão exaustores, ventiladores, além de menor número de motores hidráulicos, mangueiras e outros componentes e, com certeza, motores de combustão interna de menores potências. Com isso, afirmam que máquinas com tais características permitirão manutenções periódicas mais rápidas e mais baratas, levando-se a simplificação das estruturas de apoio do sistema de colheita.

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 às 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 e Llagostera (1996) realizaram uma avaliação em três configurações de sistemas de cogeração em usinas de açúcar, tendo em vista a produção de excedentes de energia elétrica para a comercialização. Foi estudada a influência dos parâmetros da eficiência, das caldeiras e do vapor para as configurações de melhor desempenho, da dependência da geração de eletricidade em função da demanda de vapor de processo. Foi efetuada uma análise exérgica das alternativas mais significativas e, por fim, uma avaliação econômica das configurações mais promissoras.

De Beer et al. (1996) relataram que a proporção de folhas verdes, folhas secas e ponteiros em relação à cana total variam de 10 a 60 % na Colômbia e de 20 a 35 % na África do Sul. Segundo estes autores, ponteiros, folhas verdes e folhas secas de cana não queimadas, deixados no campo, possuem umidade média em torno de 50 %. Esta umidade cai para 30 % em 2 a 3 dias, e para 15 % em 2 semanas, havendo, portanto, grande variação na umidade em função do tempo de permanência no campo.

Coelho, Oliveira Jr. e Zylberstajn (1997) realizaram uma análise termoeconômica do processo de cogeração em uma usina de açúcar e álcool paulista. Os custos exergéticos do processo de geração de vapor e eletricidade foram calculados para várias configurações, estimando 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 consiste 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 consiste 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 são 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. Além de determinar as propriedades termodinâmicas dos diferentes fluxos do sistema, foram determinados balanços de massa, energia e exergia. Além disso, foi realizada uma comparação das eficiências baseadas na 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.

Hassuani (1998) obteve um custo de US\$ 19,8 para recolhimento e transporte a 10 km para 1 t de palha seca enfardada. Considerando a produção de 11,2 t de resíduo seco por hectare e uma eficiência de recolhimento de palha de 50 %, foi obtido um custo aproximado de US\$ 110/ha para recolhimento e transporte da palha até a usina.

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 taxaço de carbono no planejamento integrado do setor elétrico brasileiro.

Sánchez Prieto, Carril e Nebra (2001) estudaram que a cogeração tem uma grande aceitação no setor sucroalcooleiro fundamentalmente em razão da sua adequação, pois o combustível empregado é um rejeito do processo de fabricação e os produtos do sistema, potência mecânica ou elétrica e vapor, são utilizados no próprio processo.

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 tinha o objetivo apenas de tornar a destilaria auto-suficiente em termos de energia, mas também de tornar possível exportar 33.616 MWh durante a safra e 3.600 MWh na entressafra. Foram considerados todos os custos envolvidos e os resultados mostraram que, naquela oportunidade, o negócio não seria atrativo, mas se houvesse 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 ampliou sua geração própria, passando a comercializar sua eletricidade excedente com a CPFL.

Sánchez Prieto (2003) realizou uma detalhada análise energética e exergética, visando determinar as eficiências baseadas na primeira e na segunda leis da termodinâmica para os principais equipamentos de duas plantas de usina sucroalcooleira, 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 do bagaço e sua influência nos custos dos fluxos da planta e dada ênfase na potência elétrica e nos índices de desempenho.

Fiomari (2004) realizou análises energética e exergética de cinco plantas de vapor de uma usina sucroalcooleira. As plantas consideradas foram baseadas na expansão do sistema de cogeração da Usina Pioneiros Bioenergia S/A, iniciada em 2003 e término em 2007. Através da primeira e segunda leis da termodinâmica, foi possível avaliar a eficiência e a geração de calor e potência para cada componente: caldeiras, turbinas, condensadores e bombas que compunham as plantas avaliadas; bem como o aproveitamento global de energia de cada uma delas. Através de índices baseados na primeira lei da termodinâmica, foi possível comparar todas as plantas consideradas. Além disso, foram calculados também alguns indicadores que são bastante comuns em usinas de açúcar e álcool, como o consumo específico de vapor de turbinas a vapor ou consumo específico de vapor de processo. Algumas análises de sensibilidade foram feitas para avaliar o comportamento do aproveitamento global de energia de um ciclo com turbina de extração-condensação levando em consideração a variação de parâmetros como eficiência da caldeira, consumo de vapor de processo e taxa de condensação na turbina de extração-condensação, sendo observado que a eficiência da planta é bastante sensível à variação da taxa de condensação da turbina e ocorreu um aumento quando se aumentou a demanda do vapor de processo.

No Estado de São Paulo, segundo Ometto (2005), a colheita da cana de açúcar é feita 25 % crua e 75 % com queimada prévia. Já com relação ao método da colheita, 63,8 % é manual e 36,2 % é mecanizada. Vale destacar que em outros

Estados o índice de queimada gira em torno de 90 %.

Oliveira e Halmeman (2006) estudaram quais são as principais implicações do novo modelo do setor elétrico como alternativa para impulsionar a geração de energia, utilizando o bagaço da cana de açúcar no processo de cogeração. Os dados sobre as autorizações e registros das usinas termoelétricas foram obtidos junto a Agência Nacional de Energia Elétrica, bem como as informações sobre processo de compra e venda da geração distribuída a partir da utilização do bagaço da cana de açúcar junto às usinas que receberam autorização ou registro entre 2004 a 2005.

Bohórquez, Horta Nogueira e Lora (2006) avaliaram a utilização integral do bagaço de cana de açúcar resultante do processo produtivo de uma usina de açúcar que pretende incrementar sua capacidade de geração de energia elétrica de 7 para 35 MW, mediante o redesenho do ciclo e a incorporação de novos turbogeradores. Utilizando as ferramentas termoeconômicas foi estabelecida a matriz de incidência da planta de cogeração, a determinação dos custos exergoeconômicos e a realização das simulações da variação do preço de combustível e a eficiência da caldeira. Além disso, foi efetuado um breve estudo econômico da produção de energia elétrica e da venda dos excedentes de 27 MWh médios e concluído que o custo da eletricidade gerada era de US\$ 0,051/kWh.

Diante do que foi encontrado na literatura sobre o aproveitamento da palha, o presente trabalho apresenta como diferencial um estudo sobre a lucratividade com a exportação de energia com a implantação do sistema atual vigente no mercado de lavagem de cana a seco, através de ventiladores, com a possibilidade de separação e preparo da palha para servir como combustível suplementar na queima em caldeiras de alta pressão convencionais para bagaço.

2 Aspectos da Cogeração de Energia

Dada à importância deste tema, a seguir serão apresentados alguns aspectos referentes à definição, ao histórico e aos ciclos de cogeração, bem como a sua aplicação no setor sucroalcooleiro e os programas governamentais de incentivo.

2.1 Definição de Cogeração

De acordo com Walter (1994), cogeração é um vocábulo de origem norte-americana empregado desde a década de 70 para designar os processos de produção combinada de calor útil (vapor, água quente, água gelada, ar quente e frio) e potência (elétrica ou mecânica), com uso seqüencial da energia liberada a partir da queima de uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico empregado (Rankine, Brayton ou Combinado). Em outras palavras, seria o aproveitamento de uma parcela de energia que teria de ser obrigatoriamente rejeitada prevista pela Segunda Lei da Termodinâmica, resultando em um aumento da eficiência global do ciclo (BALESTIERI, 2002).

A cogeração é um método efetivo de conservação de energia primária (energia de um combustível) que pode ser aplicado ao setor industrial (açúcar e álcool, papel e celulose, químicas, petroquímicas, etc...) ou ao setor terciário (hospitais, hotéis, *shopping centers*, restaurantes, aeroportos, etc...), quando economicamente justificado, sendo que os níveis globais de eficiência das plantas de cogeração podem se situar entre 50 e 85 %, de acordo com o ciclo utilizado.

Pode-se citar como vantagens da cogeração a redução dos gastos em energia, independência da rede elétrica e segurança no fornecimento, maior proteção do meio ambiente, maior eficiência na geração de energia, redução de gastos de transporte e de distribuição, melhor adequação entre oferta e procura de energia, entre outras vantagens.

2.2 Histórico da Cogeração

Pierce (1995) realizou um interessante trabalho de investigação histórica e identificou a origem da cogeração no sistema de elevação desenvolvido pelos Tártaros na Europa no século XIV. Este sistema, denominado *smokejack*, mostrado na Figura 2.1, era acionado a partir de gases quentes que subiam em uma chaminé e desempenhava um trabalho útil com baixo custo e foi o precursor de outros mecanismos mais eficientes e úteis, como a turbina a gás e a hélice.

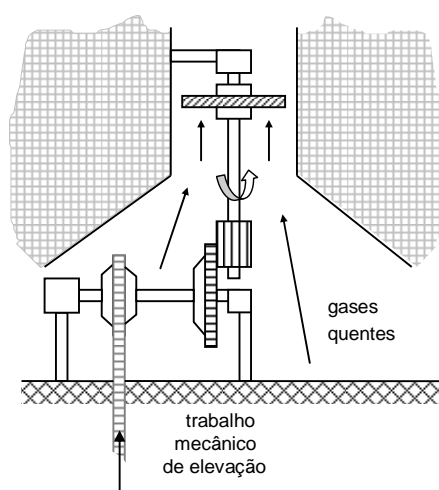


Figura 2.1 – Sistema *Smokejack*.

Em 1776, a idéia de utilizar cogeração foi aplicada por Watt e Boulton nas máquinas de combustão para moendas de cana de açúcar na West Indies & Co., considerando que a mesma combustão usada para ferver o açúcar fosse utilizada para produzir o vapor que seria necessário para o processo da fábrica. Essa idéia foi logo difundida e aplicada em outras indústrias.

Em 1787, Oliver Evens fabricou máquinas a vapor de alta pressão para serem usadas em destilarias, cervejarias, fábricas de sabonete, de papel, economizando combustível para todos estes propósitos com o aproveitamento do vapor de exaustão das máquinas de vapor. Além disso, ele projetou um sistema para resfriamento de oficinas utilizando refrigeração por absorção operada pelos gases de escape de uma máquina a vapor. As oficinas inglesas, em 1820, também adotaram a cogeração para processos, condicionamento de ambientes e outras aplicações.

O início do desenvolvimento moderno da cogeração aconteceu em meados de 1870, quando máquinas a vapor foram acopladas a geradores elétricos em áreas com alta densidade populacional. Nesta oportunidade, a cogeração estava intimamente ligada ao aquecimento de ambientes. Alguns anos depois, em Detroit, utilizou-se o vapor de exaustão de uma planta para a evaporação da água e obtenção do sal.

As plantas com cogeração também foram utilizadas na Dinamarca, Alemanha e Polônia, a partir de 1890, e na Rússia, em 1903. Por volta de 1914, engenheiros alemães recuperaram energia de uma máquina de combustão interna e aqueceram fábricas e prédios. Em 1926, estas práticas tornaram-se mais freqüentes em aplicações de cogeração.

O desenvolvimento da cogeração na Europa foi auxiliado pela agência de planificação de energia russa que fez a elaboração do Plano Governamental de Eletrificação Russa, conhecido como GOELRO.

Na primeira Conferência Mundial, realizada em Londres em 1924, foi feito apenas um curto relato do aproveitamento dos rejeitos de energia. Porém, na segunda conferência, realizada em Berlim em 1930, foi discutida a combinação calor-trabalho entre os participantes, sendo dada ênfase aos aspectos de centralização versus descentralização das plantas.

A introdução comercial das turbinas a gás durante o ano de 1930 contribuiu para o surgimento de diferentes esquemas para a utilização dos gases de exaustão nas máquinas a vapor.

Com o surgimento de grandes concessionárias de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, os sistemas de cogeração foram paulatinamente perdendo importância. A melhora da confiabilidade, da disponibilidade e das condições econômicas dos sistemas de geração, transporte e distribuição de energia elétrica, obtidas com a economia de escala, a disponibilidade de combustíveis a baixos preços e as regulações e proibições que se verificaram no decorrer do século passado, contribuíram para que a cogeração perdesse sua importância e tivesse seu emprego restrito a casos bastante específicos (TOLMASQUIM et al., 1999).

As importantes modificações na disponibilidade e nos custos da energia, que tiveram início a partir de 1973, com o primeiro choque do petróleo, resultaram no incentivo à racionalização do uso da energia e dos combustíveis nobres e nas

desregulações do setor elétrico de alguns países ao longo das últimas três décadas, restabelecendo a importância da tecnologia de cogeração. Nos Estados Unidos, a publicação do PURPA (*Public Utilities Regulatory Policy Act*), em 1978, abriu novos horizontes na indústria de geração, na medida em que introduziu a noção de competição em mercado aberto de energia elétrica e rompeu a estrutura verticalmente integrada das concessionárias públicas.

Já no Brasil, a cogeração começou a ser priorizada apenas na década de 80 visando à minimização dos impactos ambientais provocados por outras fontes.

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro sofreu mudanças estruturais inovadoras de ordem institucional e em nível de regulamentação que alteraram sensivelmente o panorama, até então estável e controlado pelo governo, para um ambiente competitivo.

O estímulo à geração independente e descentralizada, além do aumento da geração de energia elétrica através da cogeração em indústrias, tem sido crescente. Dentro deste contexto, o setor sucroalcooleiro merece uma posição de destaque, pois pode contribuir e muito para a produção de energia elétrica excedente para comercialização.

O setor sucroalcooleiro, apesar da auto-suficiência em energia elétrica, consta com uma geração de excedentes ainda bastante limitada. Isso porque a maior parte das usinas possui instalações relativamente antigas que operam aquém do potencial técnico existente, considerando-se a quantidade de biomassa residual gerada e as novas tecnologias disponíveis.

A Tabela 1 mostra uma estimativa da Associação Paulista de Cogeração de Energia (COGEN-SP) do potencial de geração de bioeletricidade até a safra 2012-2013, considerando a instalação de novas unidades e o *retrofit* das atuais.

Tabela 1 – Potencial de geração de bioeletricidade até 2013.

Safra (S)	Número Usinas	Cana (Mt/S)	Bagaço (Mt/S)	Instalado (MW)	Exportação (MW)	Retrofit (MW)	Nova (MW)
2009-2010	313	556	139	13.331	5.585	316	1.103
2010-2011	343	605	151	14.508	6.742	316	841
2011-2012	349	641	160	15.376	7.678	316	620
2012-2013	351	668	167	16.009	8.447	316	452

Fonte: www.cogensp.com.br

A Figura 2.2 mostra estimativas da evolução da produção de cana e da capacidade instalada até a safra 2021-2022, na qual se espera atingir uma produção de 1 bilhão de toneladas de cana e se ter uma oferta de 12.000 MW de bioeletricidade, gerando uma demanda potencial de cerca de 400 turbinas a vapor com capacidade de geração de 30 a 40 MW cada.

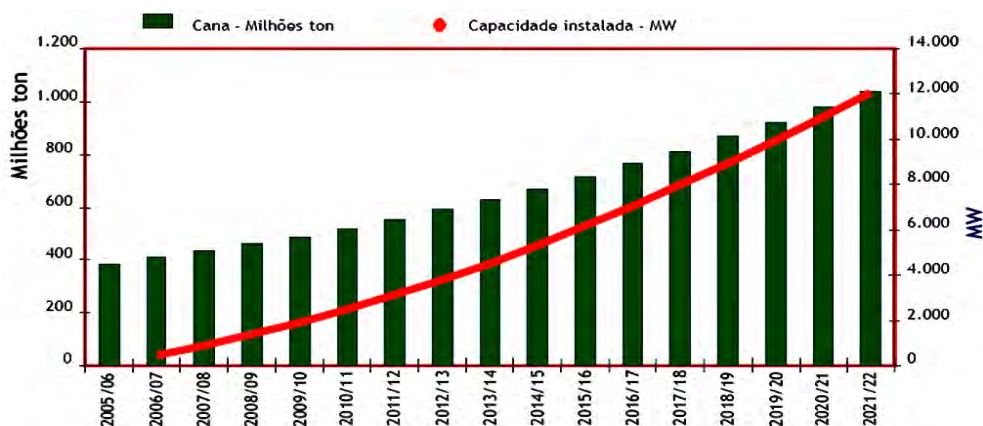
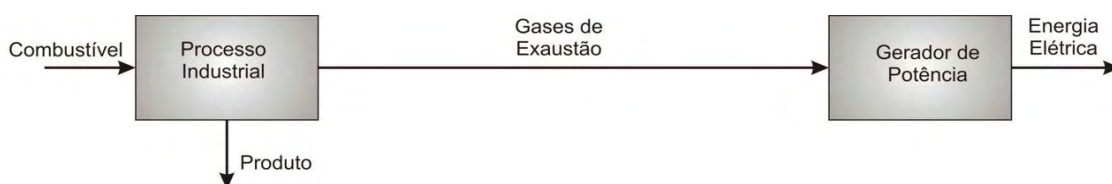


Figura 2.2 – Estimativa da produção de cana e de bioeletricidade.

Fonte: www.cogensp.com.br

2.3 Ciclos de Cogeração

Sob o ponto de vista do fluxo energético, a seqüência do processo de geração de potência e calor permite aos sistemas de cogeração serem classificados como *bottoming* e *topping*, conforme mostra a Figura 2.3.



(a) Sistema operando no regime *bottoming*.



(b) Sistema operando no regime *topping*.

Figura 2.3 – Seqüência do processo de geração de potência e calor em sistemas de cogeração.

Na configuração *bottoming*, a geração de potência para atender a demanda eletromecânica ocorre após a produção de calor, que é utilizado para suprir a demanda térmica. Neste caso, o sistema de cogeração utiliza o calor rejeitado por processos industriais na geração de vapor; este vapor é então expandido em turbinas de condensação e/ou contrapressão, que acionam geradores elétricos ou equipamentos, tais como bombas hidráulicas, compressores de ar, etc. O ciclo *bottoming* normalmente é empregado em indústrias químicas, as quais estão associadas a processos que exigem altas temperaturas.

Na configuração *topping*, o combustível é queimado primeiramente em uma máquina térmica para geração de energia elétrica e/ou mecânica e, em seguida, o calor rejeitado é utilizado para atender os requisitos térmicos do processo. Por permitir trabalhar com temperaturas mais baixas, o ciclo *topping* possui uma ampla variedade de aplicações, permitindo uma maior versatilidade no momento de escolher o equipamento a empregar.

Os principais ciclos usados para configurações de centrais de cogeração são os ciclos Rankine ou a vapor, Brayton ou a gás, Combinado (gás + vapor), Diesel e Otto, os quais serão descritos resumidamente a seguir.

2.3.1 Ciclo Rankine

O ciclo de Rankine é baseado em quatro processos que ocorrem em regime permanente onde um fluido de trabalho apresenta mudança de fase nos processos que ocorrem à pressão constante, sendo ideal para uma unidade motora simples a vapor como, por exemplo, a utilização do calor proveniente da queima de

combustíveis para geração de vapor numa Caldeira ou Gerador de Vapor. A energia térmica gerada pode ser utilizada para calor de processo e para geração de energia elétrica em um gerador elétrico acionado por uma turbina a vapor, conforme mostra a Figura 2.4.

O rendimento de um ciclo Rankine pode ser aumentado pela redução da pressão de saída, pelo aumento da pressão no fornecimento de calor e pelo superaquecimento do vapor. O título do vapor que deixa a turbina aumenta pelo superaquecimento do vapor e diminui pelo abaixamento da pressão de saída e pelo aumento da pressão no fornecimento de calor (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1995).

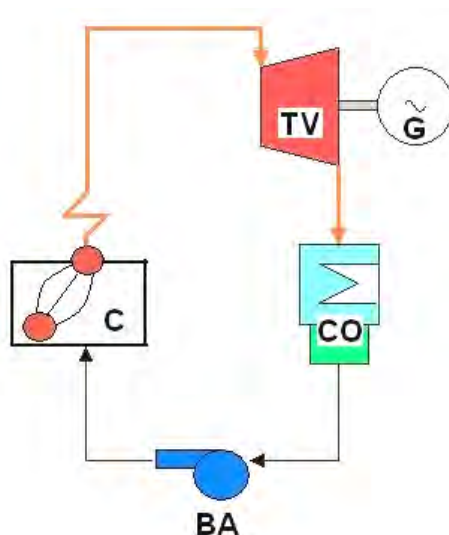


Figura 2.4 – Representação esquemática de um ciclo Rankine.

Uma das formas de se elevar a temperatura de fornecimento de vapor é através da utilização de um trocador de calor adicional na caldeira, denominado superaquecedor. A expansão do vapor na turbina se dá quase toda na condição de “vapor seco”, o que favorece suas condições de escoamento através desta. Quase todas as usinas termelétricas trabalham com vapor superaquecido.

O aumento da temperatura do vapor, e seu conseqüente aumento de pressão, têm limitações por questões metalúrgicas, principalmente nas caldeiras, onde o aumento das temperaturas internas nos tubos provoca um sobreaquecimento das superfícies expostas às altas temperaturas e radiação dos produtos da combustão.

Para contornar estas limitações realiza-se o reaquecimento do vapor, ou seja, o vapor é extraído da turbina (vapor de escape) a uma determinada pressão e é reenviado à caldeira (reaquecedor), onde sua temperatura é elevada novamente. Assim, este vapor superaquecido retorna à turbina (vapor direto) e é expandido até a condensação, diminuindo a umidade nos últimos estágios da turbina e evitando possíveis danos às palhetas (BARREDA DEL CAMPO, 1999).

Outro fator que colabora para o aumento da eficiência do ciclo é a diminuição da temperatura de rejeição do vapor (fonte fria), embora isto esteja ligado às condições do ambiente.

A redução da pressão de saída eleva o teor de umidade do vapor que deixa a turbina. A forma de escoamento do vapor através da turbina é influenciada pelo vapor úmido que por ela circula sendo que, quanto maior for o teor de umidade, menor será o rendimento, tanto da turbina como de todo o ciclo.

Outra maneira de aumentar o rendimento do ciclo é através do aquecimento regenerativo progressivo e gradual da água de alimentação da caldeira, o qual é realizado através de trocadores de calor, sendo o vapor utilizado para o aquecimento nestes trocadores extraído de diferentes pontos da turbina.

2.3.2 Ciclo Brayton

O ciclo padrão a ar Brayton, ideal para turbina a gás simples, é baseado num fluido de trabalho que não apresenta mudanças de fase no seu processo, ou seja, o fluido sempre está na fase vapor. Na Figura 2.5 é mostrada uma representação esquemática do ciclo Brayton. As turbinas a gás são constituídas basicamente por um compressor de ar, uma câmara de combustão e um expansor (turbina propriamente dita), que produz a potência necessária ao acionamento do compressor e, ainda, a potência útil para acionamento de um gerador elétrico ou para acionamento mecânico.

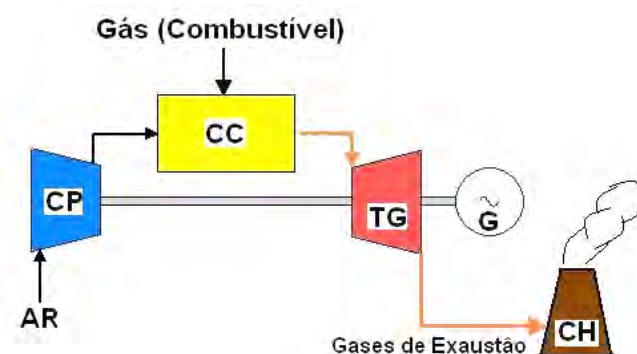


Figura 2.5 – Representação esquemática de um ciclo Brayton simples.

O aumento na eficiência das turbinas a gás alcançado nestas últimas décadas e a disponibilidade de gás a preços competitivos tem favorecido sua implantação em sistemas de cogeração para a indústria (BARREDA DEL CAMPO, 1999).

O compressor é um equipamento que, uma vez definidos seus parâmetros geométricos e a rotação, operará com uma vazão volumétrica de ar praticamente independente de outros fatores. Conseqüentemente, a massa de ar admitida, que por sua vez determina a potência da turbina, é diretamente influenciada pela densidade do ar na sua entrada. Por isso, as propriedades do ambiente que determinam a densidade do ar, altitude ou pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa, influem decisivamente na potência e eficiência da turbina (ANTUNES, 1999).

Sendo a turbina um equipamento volumétrico, a sua potência é determinada basicamente pela vazão em volume dos gases em sua entrada.

O primeiro processo é a compressão do fluido de trabalho. Se a expansão deste fluido comprimido ocorrer diretamente e sem perdas, a potência desenvolvida pela turbina será tão somente igual à consumida no compressor. Mas, se for adicionada energia para aumentar a temperatura do fluido antes da expansão, haverá um aumento significativo na potência desenvolvida pela turbina, produzindo excedentes de potência em relação àquela necessária para acionar o compressor.

Ocorrem irreversibilidades ou perdas no processo de combustão e expansão que reduzem o rendimento térmico do ciclo.

O ciclo de turbinas a gás pode ser caracterizado por dois parâmetros significativos: a relação de pressão e a temperatura de queima. A relação de pressão do ciclo se refere ao quociente da pressão de descarga e a pressão de entrada, sendo que em turbinas modernas um valor típico é 14:1. Quando o objetivo

é alcançar eficiências mais altas em operação em ciclos simples, empregando, por exemplo, turbinas aeroderivadas, são necessárias taxas de compressão mais elevadas, na faixa de 18:1 a 30:1 (IPT, 1996).

A temperatura mais alta do ciclo é a temperatura de queima que chega a atingir 1.200 °C. Temperaturas mais altas podem ser atingidas em turbinas com sistemas de resfriamento nas pás.

As turbinas se dividem em dois tipos básicos: aeroderivadas e industriais. As turbinas aeroderivadas são baseadas na tecnologia adotada para a propulsão de aeronaves, sendo compactas e de peso reduzido. As turbinas industriais são mais robustas e, por isso, apresentam maior resistência a ambientes agressivos, permitindo processar combustíveis líquidos de baixa qualidade e sua potência máxima supera em muito a das turbinas aeroderivadas.

Diversas modificações podem ser feitas no ciclo Brayton simples para aumentar o seu desempenho, incluindo regeneração, resfriamento intermediário e reaquecimento, ou uma combinação dessas três modificações, denominada ciclo composto ou combinado.

A regeneração é a recuperação de energia térmica (calor) dos gases de exaustão pelo ar comprimido antes de entrar no combustor. A eficiência do ciclo decresce à medida que a relação de pressões aumenta (exatamente o oposto do ciclo Brayton básico) e, além disso, depende das relações de temperatura. A regeneração aumenta a eficiência do ciclo até a relação de pressões na qual a temperatura do ar que sai do compressor é igual à temperatura dos gases de exaustão da turbina. Este tipo de ciclo diminui a temperatura dos gases de exaustão e pode não ser adequado para cogeração.

O resfriamento do ar comprimido entre os estágios de compressão oferece um aumento no trabalho líquido extraído do ciclo, mais diminui a eficiência. Se, além desse resfriamento intermediário, for adicionada a regeneração, a eficiência e o trabalho líquido são melhorados em relação ao ciclo simples.

O reaquecimento requer um segundo combustor entre os estágios de expansão e tem os mesmos efeitos de um resfriamento intermediário, porém são menos pronunciados. Utilizando apenas o reaquecimento, há um aumento na produção de trabalho líquido com um decréscimo na eficiência do ciclo. Entretanto,

se for adicionada a regeneração, o trabalho líquido e a eficiência são aumentados comparativamente ao ciclo simples.

A regeneração, o resfriamento intermediário e o reaquecimento podem ser utilizados simultaneamente no ciclo composto. Este ciclo alcança a maior eficiência nas relações de pressão mais elevadas, mas exige uma maior quantidade de equipamentos e controles adicionais.

2.3.3 Ciclo Combinado

O ciclo combinado é uma combinação dos ciclos da turbina a gás (ciclo Brayton) com o ciclo de turbina a vapor (ciclo Rankine), conforme é mostrado na Figura 2.6. A entalpia ainda disponível nos gases de exaustão da turbina de gás é aproveitada para gerar vapor sob pressão na caldeira de recuperação de calor, o qual irá expandir-se numa turbina a vapor, produzindo mais energia útil. Portanto, a geração de vapor pela caldeira de recuperação está diretamente ligada à vazão e temperatura dos gases de exaustão da turbina a gás.

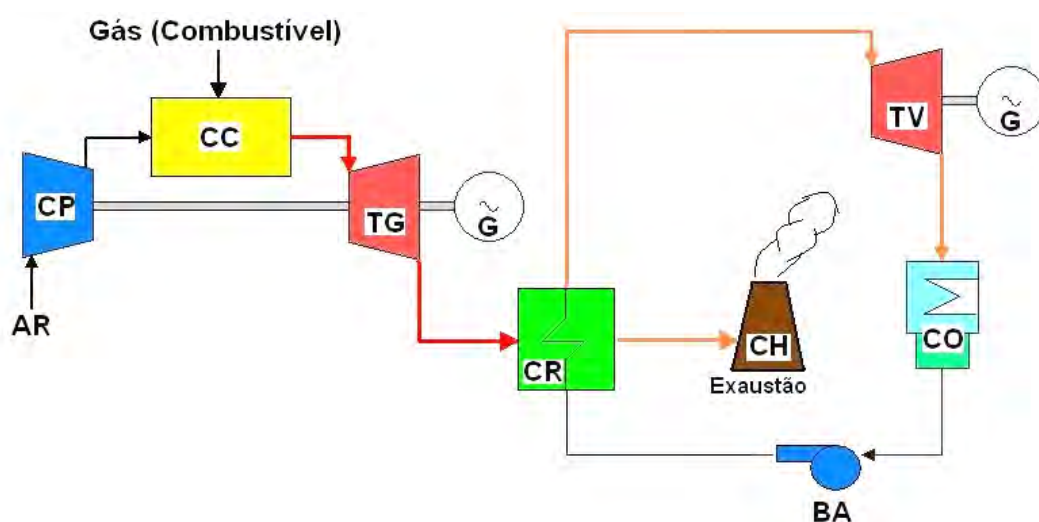


Figura 2.6 – Representação esquemática de um ciclo combinado.

Nesta modalidade, resulta uma alta eficiência de utilização do combustível, pois a alta temperatura de exaustão dos gases na turbina a gás permite suprir o ciclo

a vapor. Conseqüentemente, parte das irreversibilidades de ambos os ciclos, que advém das temperaturas de rejeição de calor, são eliminadas no ciclo combinado.

As caldeiras de recuperação usadas nos ciclos combinados podem ser de dois tipos: sem pós-queima, onde a geração de vapor só depende da vazão de gases recebidas da turbina a gás, e com queima suplementar, onde um combustível é queimado na caldeira de recuperação, aumentando, assim, a participação na geração de vapor. Em ambos os casos, essas caldeiras de recuperação são de concepção mais simples que as caldeiras convencionais, principalmente a caldeira sem pós-queima. Estas caldeiras podem gerar vapor em diferentes níveis de pressão, geralmente dois níveis, embora se possa chegar a três, o que possibilita o uso de turbinas a vapor que permitem a injeção de fluxos adicionais de vapor entre a pressão de alimentação e a de condensação (BARREDA DEL CAMPO, 1999).

2.3.4 Ciclos Otto e Diesel

O ciclo a ar Otto é um ciclo ideal que se aproxima do motor a combustão interna de ignição por centelha, onde em um estado ocorre uma compressão isoentrópica do ar, momento este em que o pistão se movimenta, assim o calor é transferido para o ar, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso, após ocorre uma expansão isoentrópica e por fim do processo, rejeição do calor do ar enquanto o pistão está no ponto inferior.

Já o ciclo de ar Diesel é ideal para motores de ignição por compressão. Neste ciclo o calor é transferido ao fluido de trabalho à pressão constante, como o gás expande durante a transferência de calor no ciclo padrão a ar, a transferência de calor deve ser apenas o suficiente para manter a pressão constante. No próximo estado a transferência de calor cessa e o gás sofre uma expansão isoentrópica até que o pistão atinja o ponto morto inferior. A rejeição de calor, como no ciclo Otto, ocorre a volume constante e com o pistão no ponto morto inferior.

Uma central elétrica com motor de combustão interna é composta pelas unidades de motores e geradores principais, sala de controle e sistemas auxiliares, que incluem tanques e bombas do armazenamento e alimentação do combustível,

sistema de resfriamento de água e óleo lubrificante, suprimento de ar de combustão e exaustão dos gases da combustão.

As centrais de geração de energia elétrica com motores de combustão interna são freqüentemente utilizadas para suprir sistemas onde a demanda não justifique a instalação de uma usina termelétrica a vapor (BARREDA DEL CAMPO, 1999).

Para a utilização de gás natural como combustível é recomendado o ciclo Otto. No entanto, pode-se utilizar o gás natural em equipamentos de ciclo Diesel, desde que o combustível inserido na câmara de combustão seja uma mistura de gás natural com 3 a 5 % de diesel. Estes equipamentos são conhecidos como bi-combustível ou duplo-combustível em função do modo que é realizado a mistura dos combustíveis.

A Figura 2.7 representa um ciclo de cogeração com um motor alternativo.

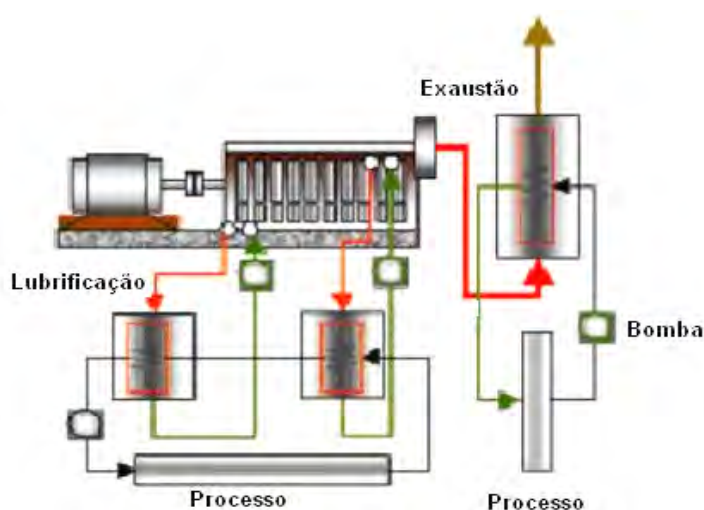


Figura 2.7 – Cogeração com motor alternativo.

2.4 Sistemas de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro

Diversas são as possibilidades para incremento da produção de eletricidade com a manutenção dos sistemas tradicionais e todas elas passam pela melhoria da eficiência energética do processo, reduzindo o consumo de vapor por tonelada de cana processada e usando a quantia economizada para produzir mais eletricidade.

A interferência mínima possível seria a substituição das atuais turbinas a vapor de simples estágio e de baixa eficiência por turbinas de múltiplos estágios e de

maior eficiência. A substituição das atuais caldeiras por outras de maiores pressões e temperaturas, e dos turbogeradores de contrapressão por turbogeradores de extração-condensação, seria uma interferência mais profunda, mas que ainda permitiria a manutenção dos atuais ciclos de contrapressão, tal como mostra a Figura 2.8 (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

Adicionalmente, existem outras tecnologias que também estão sendo implantadas, tais como a eletrificação dos acionamentos e o aproveitamento da palha como combustível, através da substituição da queimada e coleta manual pela colheita mecanizada.

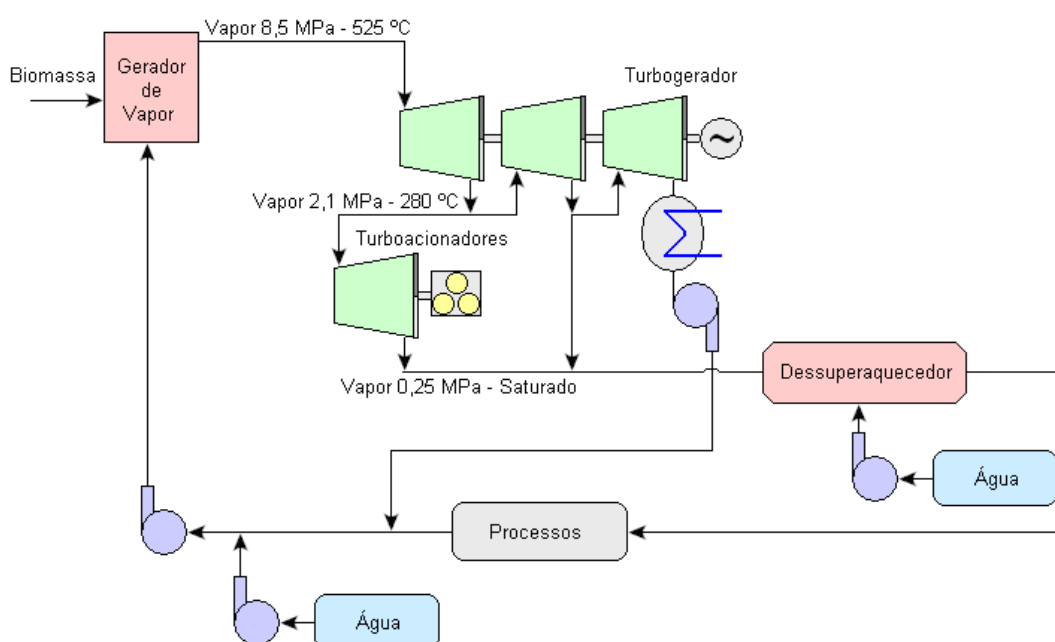


Figura 2.8 – Sistema de cogeração com turbina de extração-condensação.

2.5 Programas de Incentivo a Cogeração Criados pelo Governo

2.5.1 Programa Prioritário de Termoeletricidade

Uma medida tomada no Brasil, que nasceu com o blecaute de maio de 1999, foi o Programa Prioritário de Termoeletricidade (PPT), que previa a colocação

gradual de cerca de 11.500 MW de geração térmica.

O objetivo do Programa Prioritário de Termoeletricidade era viabilizar, em curto prazo, investimentos na área de geração termelétrica, com uma série de medidas para incentivar os investidores, em especial na área de gás natural.

O lançamento do PPT produziu resultados no que se diz respeito à disposição dos investidores quanto ao risco dos projetos de geração de energia, contando com a adesão de 49 usinas térmicas. Com o risco do gás parcialmente equacionado, restava apenas assegurar a tendência de crescimento da economia, o que garantiria o crescimento do consumo de energia elétrica.

No entanto, o PPT não conseguiu atingir totalmente os seus objetivos, sendo que a maioria das Usinas Termelétricas não saiu do papel.

2.5.2 Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) é um importante 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 eólicas, 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.

O PROINFA conta com o suporte do BNDES, que criou um programa de apoio a investimentos em fontes alternativas renováveis de energia elétrica. A linha de crédito prevê financiamento de até 70 % do investimento, excluindo apenas bens e serviços importados e a aquisição de terrenos. Os investidores têm que garantir 30 % do projeto com capital próprio. As condições do financiamento entre outras são

de carência de seis meses após a entrada em operação comercial, amortização por dez anos e não pagamento de juros durante a construção do empreendimento.

A Eletrobrás, no contrato de compra de energia de longo prazo (PPAs), assegura 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, durante os 20 anos dos projetos contratados.

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, além disso, ela estabelece critérios de regionalização, impondo um limite de contratação por Estado de 20 % da potência total destinada às fontes eólicas 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 pode ser distribuído entre os Estados que possuem 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 é um instrumento de complementaridade energética sazonal à energia hidráulica, responsável por mais de 90 % da geração do país. Na região Nordeste, a energia eólica serve como complemento ao abastecimento hidráulico, já que o período de chuvas é inverso ao de ventos. O mesmo ocorre 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 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.

Entre os benefícios do PROINFA podem ser destacados os seguintes:

- **Social:** Geração de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e a operação, sem considerar os de efeito-renda.

- **Tecnológico:** Investimentos de R\$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos e materiais.
- **Estratégico:** Complementaridade energética sazonal entre os regimes hidrológico/eólico (NE) e hidrológico/biomassa (SE e S). A cada 100 MW médios produzidos por parques eólicos, economizam-se 40 m³/s de água na cascata do Rio São Francisco.
- **Ambiental:** A emissão evitada de 2,5 milhões de tCO₂/ano criará um ambiente potencial de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto.
- **Econômico:** Investimento privado da ordem de R\$ 8,6 bilhões.

2.5.3 Programa Paulista de Bioenergia

Algumas ações têm sido desenvolvidas para incrementar a cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, principalmente no Estado de São Paulo onde se encontra a maior parte das usinas.

Entre estas ações pode ser destacada a da Secretaria de Saneamento e Energia, que está iniciando um trabalho sobre a Matriz Energética Paulista, identificando, levantando e avaliando todos os fatores relacionados com a geração de energia elétrica, com destaque para a geração distribuída baseada na cogeração através da bioenergia. Em abril de 2007 foi constituída a Comissão Especial de Bioenergia do Estado de São Paulo, cujo objetivo é dar subsídios para a elaboração de um Plano de Ação do Governo.

Destaca-se também no Estado de São Paulo o apoio da FAPESP e da DEDINI, através da assinatura de um convênio em julho de 2007, no valor de 100 milhões de reais, para o desenvolvimento de atividades de pesquisa científicas e tecnológicas de interesse do setor sucroalcooleiro, envolvendo, dentre outros temas, o processo de hidrólise, a produção e consumo de energia e o rendimento e eficiência dos processos.

Outra ação importante foi o protocolo assinado entre o Governo do Estado de São Paulo e a FIESP em 05/09/2007 para a criação do "Programa Paulista de

Cogeração de Energia”, que tem como objetivos desburocratizar o setor e buscar, junto à ANEEL, uma regulamentação adequada e linhas de crédito para dar sustentação financeira ao crescimento do setor sucroalcooleiro paulista, com o intuito de se duplicar a quantidade de energia cogerada até 2010.

Mais informações sobre a parte que envolve a palha podem ser encontradas no Termo de Referência 8 - Geração de Eletricidade a partir de Biomassa e Biogás, cuja minuta pode ser livremente acessada no *website* da Secretária de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo.

3 Aproveitamento da Palha para Cogeração

A seguir será apresentado o potencial energético da palha para a cogeração no setor sucroalcooleiro, destacando o Sistema de Lavagem de Cana a Seco; as origens do sistema, com apresentação de testes e resultados obtidos; e, por fim, os princípios de funcionamento do sistema.

Nesta dissertação será tratado o termo “palha” como a matéria vegetal separada pelo Sistema de Limpeza de Cana Seco que será preparada para utilização como combustível suplementar na caldeira, diferentemente do termo “palhiço”, que é o conjunto de folhas, ponteiros e palha que estão presentes na cana de açúcar ainda no canavial.

3.1 Potencial Energético da Palha para Cogeração

Há um potencial adicional a ser explorado para a cogeração, o qual envolve o aproveitamento da palha, que tradicionalmente é usada como adubo nas lavouras. Um grande trabalho tem sido realizado no Brasil na busca de melhores técnicas para a colheita/transporte da palha, assim como para a avaliação da sua disponibilidade real (BNDES, 2003).

É importante comentar que o setor sucroalcooleiro, em seus primórdios, ignorava a possibilidade de aproveitamento do bagaço e muito menos da palha; comprava energia elétrica das concessionárias locais e queimava óleo combustível. Com o passar do tempo, o uso do bagaço foi se tornando rotina em um processo cogrador, pois permitia produzir energias térmica, para o processo industrial, e elétrica, para a movimentação mecânica da indústria, iluminação e outros fins. A falta de visão do Setor Elétrico, entretanto, impedia a exportação de excedentes, em face, tanto das dificuldades impostas pela legislação, que defendia o monopólio existente na época, quanto pela cultura centralizante, predominante no Setor Elétrico Brasileiro, geradora de soluções hidrelétricas de grande porte.

Esta característica inibiu, totalmente, a queima eficiente do bagaço. Os investimentos dimensionaram-se não pelo lado da potencialidade intrínseca do combustível, mas sim pela necessidade exigida pelo processo industrial. As unidades cogeneradoras instaladas, em razão desta falta de visão, tornaram ineficiente esta combustão, desperdiçando quantidades significativas de energia potencialmente presentes, tanto no bagaço quanto na palha.

Atualmente, contudo, em face da proximidade do fim da vida útil destas unidades, da evolução da tecnologia e das alterações legais ocorridas no Setor Elétrico, os impedimentos à venda de excedentes à rede só poderão ocorrer em razão praticamente exclusiva da inércia da cultura centralizante que ainda predomina neste setor. No entanto, as alterações mencionadas anteriormente passaram a permitir o compartilhamento das linhas de transmissão e das redes de distribuição ou, em outras palavras, passaram a incentivar a concorrência na geração da eletricidade.

Ademais, a palha que, neste primeiro período, não era utilizada, agora, por força da evolução tecnológica ocorrida tanto na cultura da cana quanto nos equipamentos e no processo de cogeração, passou a colaborar com a produção energética, fato que aumentou a capacidade energética do setor sucroalcooleiro.

O uso racional dessas biomassas combustíveis (bagaço e palha) representa uma típica solução de geração distribuída. Com a proximidade das usinas dos centros de consumo elétrico, aliada à potencialidade da exportação dos excedentes, em razão da evolução tecnológica verificada, e à complementaridade com o parque gerador hidrelétrico brasileiro, se não coloca a cultura da cana de açúcar como a melhor alternativa de geração distribuída dentre todas aquelas passíveis de serem disponibilizadas rapidamente no país, certamente a situa dentre as mais promissoras. Além destes fatores, pode-se citar ainda:

- Os valores elevados de energia injetados à rede, dando ancoragem ao Sistema Interligado;
- O fato de ser fonte renovável;
- Ser fonte altamente benéfica ao meio ambiente, pois fornece uma alternativa comercialmente válida para o uso dos resíduos gerados.

A palha, os colmos e boa parte dos ponteiros da cana de açúcar são processados simultaneamente na colheita mecânica até a fase da separação pneumática na qual o palhiço é lançado ao solo e os rebolos de cana são priorizados e transportados até o veículo de transbordo. No conceito atual, onde se prevê uma forte expansão das áreas plantadas, fica em evidência a necessidade de reformular este paradigma para que aproximadamente um terço da energia da cana seja recuperado com custo e qualidade adequados para seu aproveitamento energético. Duas mudanças importantes podem ser apontadas nos processos atuais de recuperação da palha que contribuiriam para acelerar seu aproveitamento energético: aumentar sua densidade no ato da colheita e eliminar o manuseio intenso com seus correspondentes custos e a contaminação com terra. Estes, entre outros tópicos importantes sobre a colheita, foram discutidos no “II Workshop Tecnológico sobre Colheita de Cana de Açúcar e Palha”, realizado na Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da UNICAMP em 29/11/2006.

A Figura 3.1 demonstra uma forma de colheita da cana de açúcar, onde o palhiço é eliminado no próprio campo.



Figura 3.1 – Colheita mecanizada da cana de açúcar.

Fonte: <http://www.rankbrasil.com.br>.

A UNICA, representando a indústria paulista produtora de açúcar, etanol e bioeletricidade, e o Governo do Estado de São Paulo, assinaram, no dia 4 de junho de 2007, o Protocolo Agro-ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista. Esse protocolo, de adesão voluntária, estabeleceu uma série de princípios e diretrizes técnicas, de natureza ambiental, a serem observadas pelas indústrias da cana de açúcar (vide Anexo A).

Através desse Protocolo Agroambiental a maioria das usinas do setor sucroalcooleiro paulista se comprometeu a antecipar o cronograma de diminuição gradual das queimadas nas lavouras de cana no Estado, anteriormente fixados pela Lei Estadual Nº 11.241/02. Até 2014 as usinas deverão eliminar 100 % da queimada nas áreas mecanizáveis e, até 2017, o fogo deverá ser eliminado inclusive nas áreas não mecanizáveis, conforme mostra a Figura 3.2.

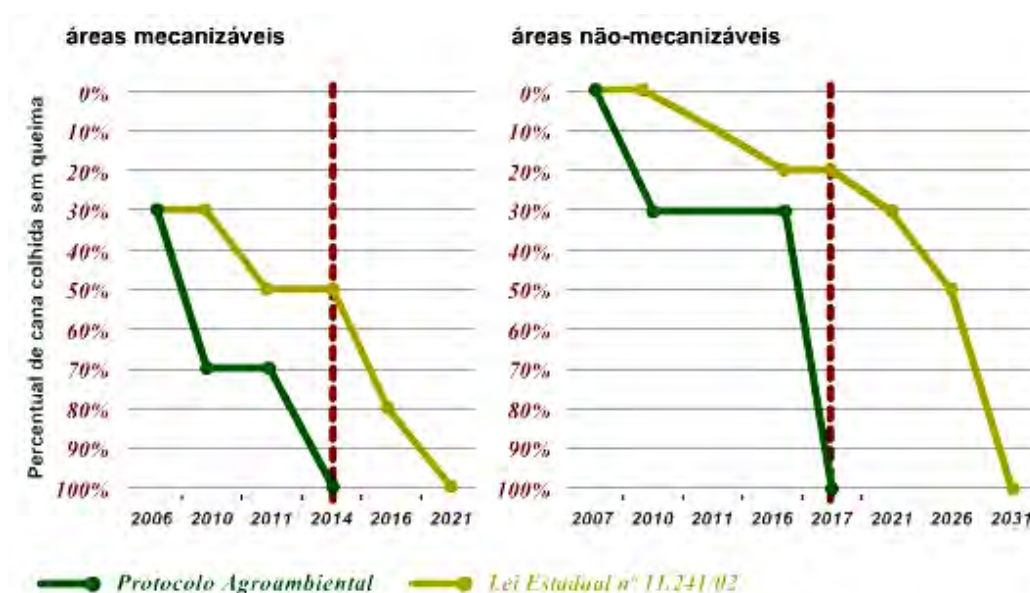


Figura 3.2 – Prazos para a eliminação da queima da palha no estado de São Paulo.

Fonte: www.unica.com.br

De acordo com a UNICA, a agroindústria canavieira nacional negociou em 2008 cerca de 2.245 MW, sendo grande parte deste total (1.500 MW) entregues ainda em 2008. Mas o potencial será ainda maior nos próximos anos. Segundo cálculos da entidade, se o setor chegar a 1 bilhão de toneladas em 2020, como está sendo previsto, e aproveitar 50 % da palha e 75 % do bagaço para gerar energia excedente, teria potencial de geração de 28.000 MW, o que representaria cerca de duas usinas de Itaipu (COMBUSTÍVEL..., 2008).

De acordo com os estudos realizados pela empresa Andrade & Canellas Consultoria e Engenharia, em 2007 estavam em operação no Estado de São Paulo 146 usinas de cogeração do setor sucroalcooleiro, somando uma potência total instalada de 1.712 MW, 70 % do segmento de cogeração do país, sendo que o total de energia vendida no mercado era cerca de 900 MW médios, divididos conforme mostra a Figura 3.3 (MELLO, 2007).

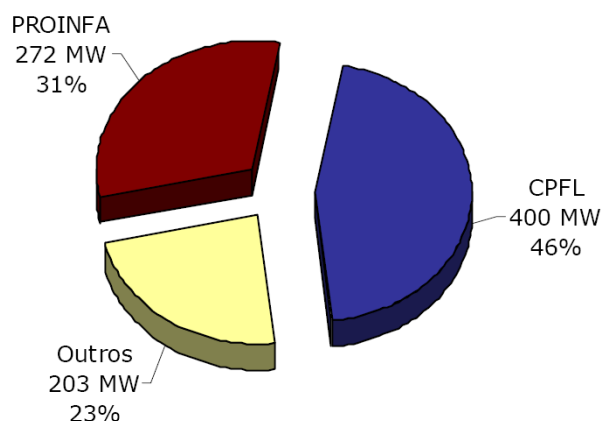


Figura 3.3 – Montantes de energia provenientes de biomassa de cana comercializados em 2007 no Estado de São Paulo.

As perspectivas da cogeração de energia com o bagaço de cana no Estado de São Paulo são excelentes, podendo haver um incremento de mais de 500 %, aumentando a potência instalada para mais de 10.000 MW até 2015, em função dos seguintes fatores complementares:

- Expansão do setor sucroalcooleiro em mais de 20 % nos próximos 5 anos;
- Aproveitamento da palha e das pontas para a cogeração de energia;
- Possibilidade de *retrofit* nas atuais usinas, aumentando consideravelmente as atuais capacidades de geração de energia.

Atualmente os investimentos para a recuperação da palha deixada no campo estão cada vez mais intensos visando, além de uma melhor produtividade, a utilização da palha juntamente com o bagaço na produção de energia elétrica, aumentando a quantidade de excedentes para comercialização. Dentro dessa perspectiva, a seguir serão apresentados alguns dados sobre a utilização da palha para a geração de energia.

A produtividade de palha, em base seca, é de 14 % da cana com a produtividade da cana de 82,4 t/ha, sendo valores médios para as variedades plantadas no Estado de São Paulo, segundo o CTC (Centro de Tecnologia Canavieira). Considerando estes valores de produtividade, Mello (2007) simulou dois casos para verificar o incremento da geração de eletricidade devido ao aproveitamento da palha, utilizando equipamentos modernos e eficientes e com a melhor tecnologia para a geração, no caso turbinas de extração-condensação operando, respectivamente, com vapor a 65 bar e 510 °C (Caso A) e 92 bar e 520 °C (Caso B), e, ainda, considerando todo o processo eletrificado. Na Tabela 2 são

apresentados os resultados dessas simulações e os parâmetros utilizados, verificando-se que a geração específica de excedente de eletricidade com o uso combinado do bagaço e da palha é muito superior ao caso em que se utiliza apenas o bagaço (MELLO, 2007).

Tabela 2 – Parâmetros utilizados e resultados da simulação do uso combinado do bagaço e da palha para geração de eletricidade.

Parâmetro	Unidade	Caso A	Caso B
Pressão do vapor	bar	65	92
Temperatura do vapor	°C	510	520
Demanda de vapor no processo	kg/t _{cana}	342-402	342-402
Consumo eletricidade (processo eletrificado)	kWh/t _{cana}	32	32
Eficiência nominal da turbina a vapor	%	85	87
Eficiência nominal da caldeira	%	88	88
Geração específica de excedente de eletricidade usando apenas o bagaço	kWh/t _{cana}	60-70	70-80
Geração específica de excedente de eletricidade usando o bagaço e a palha	kWh/t _{cana}	125-130	132-145

3.2 Sistema para a Separação da Palha

Com o aumento da mecanização na colheita de cana e a diminuição da prática de queima prévia da palha nos canaviais, cresce significativamente a quantidade de palha que vai para a indústria, assim como a quantidade de resíduos minerais que acompanham a cana.

Para evitar grandes perdas de sacarose no processo industrial, é necessário separar essas impurezas e atualmente o melhor sistema para realizar esta função é através do Sistema de Limpeza de Cana a Seco (SLCS).

Segundo os especialistas, esta deve ser uma conseqüência do avanço da colheita mecanizada no Brasil e deve aumentar ao longo dos anos. A matéria-prima picada possui mais áreas de atração de impurezas, de modo que, se a usina for lavar a cana picada, a perda de açúcar será da ordem de 5 %, tornando proibitiva essa medida.

Uma tonelada de cana de açúcar possui, em média, 150 quilos de sacarose, sendo que 2 % deste volume podem ser perdidos no procedimento de lavagem da cana. Entre 4 % e 6 % também são eliminados durante o processamento da cana na moenda ou no difusor.

Com a tecnologia de limpeza a seco, parte dessas perdas pode ser evitada, sendo dois fatores determinantes para a obtenção desse resultado. O primeiro quando a usina remove a impureza vegetal (palha) e este material fica impedido de “roubar” sacarose do caldo durante o processo de extração e o segundo permite que a usina diminua o tempo de moagem e, conseqüentemente, ajuste a safra para um período maior de maturação de cana, o que renderá maior concentração de sacarose.

Embora os resultados possam parecer promissores, o sistema, pesquisado inicialmente em Cuba, é complexo e possui duas vertentes, sendo aplicado por meio de um processo de sopragem ou por ação mecânica. A primeira opção promove a separação das partículas vegetais e a outra remove as impurezas minerais.

O sistema de ventilação foi desenvolvido pelo CTC, antiga COPERSUCAR, em parceria com o Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). A técnica empregada é semelhante ao túnel de vento utilizado para testar aviões. Já a ação mecânica é realizada em separadores ou em mesas com fundo furado, que fazem revolvimento do material para obter a separação de partículas.

A Figura 3.4 mostra um equipamento que realiza a separação de impurezas vegetais das minerais.



Figura 3.4 – Separação de impureza mineral.

Fonte: www.revistaalcoolbras.com.br.

Ambos os processos retiram o resíduo sólido e entregam a cana limpa na moenda ou no difusor. Atualmente, o sistema permite, segundo cálculos do CTC, eficiência de aproximadamente 70 % de separação de impureza mineral e vegetal.

Além da restrição já mencionada imposta pela mecanização, o aumento do uso do sistema de lavagem de cana a seco pode ser determinado pela necessidade de aumento da capacidade de moagem.

Quando a usina está operando no limite da capacidade, cada tonelada de palha que passa na moenda representa menos uma tonelada de cana a ser moída. Além disso, o teor de fibra deste material é maior se comparado ao verificado na cana, o que pode derrubar ainda mais a capacidade de moagem. Assim, a usina não deixa de moer só aquela tonelada, deixa de moer mais um pouco devido ao efeito dessa fibra no comportamento da moenda.

O custo de implantação da tecnologia de limpeza a seco está relacionado diretamente ao porte e às características operacionais de cada usina, sendo, de maneira geral, um investimento considerado ainda alto.

O sistema de lavagem de cana a seco trata-se de uma solução já adotada por algumas usinas com bons resultados. Parte destas unidades separa e manda para a lavoura a palha e a terra recolhida, já outras separam a palha da terra e a passam pela moenda. No entanto, o ideal é a utilização da palha como combustível suplementar para as caldeiras de bagaço possibilitando um aumento de geração de energia excedente que pode ser exportada, porém as palhas retiradas apresentam um inconveniente que é o fato de serem de tamanho grande e com fibras longas, por isso não são próprias para a queima nas caldeiras convencionais a bagaço.

Faz-se necessário transformar a palha em pequenos pedaços para que possa fazer a mistura com o bagaço e, depois, a queima nas caldeiras convencionais.

Uma das soluções encontrada foi o uso de um picador de palha, sendo o mesmo testado durante o ano de 2004, atingindo resultados satisfatórios. Ele é um equipamento simples, composto por um rotor com facas fazendo com que a palha passe por um cesto, assim transformando as palhas de fibras longas em palha picada, ideal para a queima em caldeiras. A Figura 3.5 é um exemplo de um picador de palha que prepara a mesma para queima em caldeiras convencionais.



Figura 3.5 – Picador de palha.

Fonte: www.bruno.com.br/MyFiles/PPB/palha.jpg

Outra forma encontrada pelas usinas sucroalcooleiras de enviar esta palha para a caldeira é passando-a por todos os ternos de moagem e, conseqüentemente, tendo uma perda em sacarose (ART) ou ainda adicionando-a no último terno de moagem, sem diminuir a capacidade de moagem como no caso em que ela passa por todo o processo, possibilitando, assim, uma economia na construção de esteiras para o transporte da palha picada até a caldeira, além de diminuir a perda de sacarose.

A Figura 3.6 mostra o estado da palha antes e depois do picador.



Figura 3.6 – Palha inteira e palha picada.

Fonte: <http://www.ideaonline.com.br>.

3.3 Origens do Sistema de Lavagem de Cana a Seco, Testes e Resultados Obtidos

A origem do sistema de limpeza de cana a seco surgiu para atender a necessidade de reduzir as impurezas minerais, especialmente na cana picada, pois não podia ser lavada com água, devido às grandes perdas de sacarose. Desta forma, a especificação do projeto também se estendeu para a redução das impurezas vegetais e também para a operação com a cana inteira. Este sistema contava com vários estágios de separação de impurezas (até 3 estágios) e assim ocasionava num elevado custo do equipamento e dificuldades no *lay-out* para instalação.

A Figura 3.7 apresenta o sistema antigo de lavagem de cana a seco.

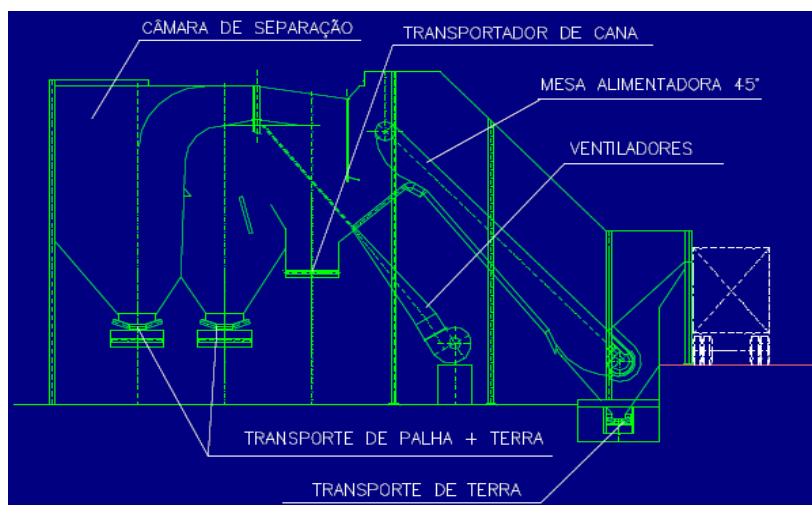


Figura 3.7 – Sistema de lavagem a seco de cana (Projeto Antigo - CTC).

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

Para atingir o objetivo de viabilizar o sistema, além das mudanças de conceito, foi necessária a melhoria na eficiência de limpeza. Com auxílio de pesquisas, foi criado um novo projeto para o sistema, ocorrendo reduções no número de estágios de ventilação, na potência dos ventiladores e no espaço necessário em termos de *lay-out*.

As mudanças de conceito, busca numa melhor eficiência e com as tendências atuais de aumento do percentual de cana picada (colheita mecanizada), resultaram no novo projeto, que é mostrado na Figura 3.8.

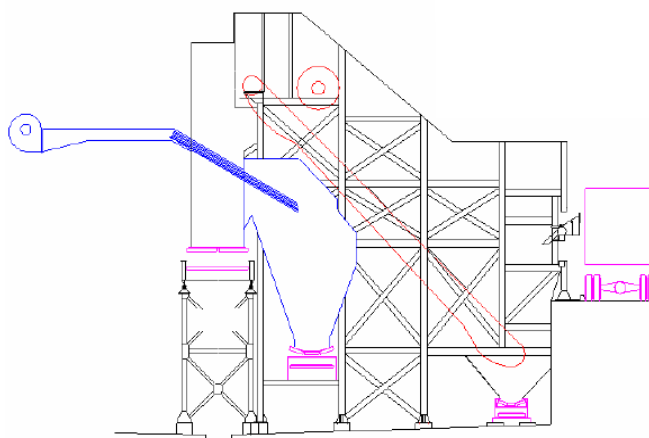


Figura 3.8 – Sistema de lavagem a seco de cana (Projeto Novo - CTC).

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

A Tabela 3 mostra resultados obtidos pela usina Quatá na safra 2001/2002, sendo considerados 3 estágios de ventilação do extrator das colhedoras de cana (ventilada, parcialmente ventilada e sem ventilação – mais informações no Item 4.1 Dados de entrada).

Tabela 3 – Dados de impureza e eficiência de separação em função do tipo de coleta (projeto antigo).

Cana Picada		Ventilada	Parcialmente Ventilada	Sem Ventilar
Quantidade de Testes		4,0	4,0	4,0
Cana Processada (t/h)		201,4	150,4	111,0
Impurezas na Cana	Mineral (%)	1,4	1,9	2,3
	Vegetal (%)	5,7	10,8	21,5
Eficiência de Separação (Base Seca)	Mineral (%)	45,4	63,0	71,7
	Vegetal (%)	55,1	56,3	59,9
	Total (%)	46,3	45,0	59,7

Observa-se na Tabela 3 que a quantidade de cana processada é bem maior quando a colhedora trabalha com seus ventiladores ligados (extrator), pois a maior quantidade de impurezas acaba ficando em campo e o transporte até a usina de cana acaba sendo mais eficaz. Quanto menor for a separação de impurezas no campo, maior é a quantidade que entra na indústria, como pode ser visto para a colhedora trabalhando sem ventilação. Conseqüentemente, a eficiência do sistema

de limpeza a seco é maior conforme a quantidade de impurezas aumenta.

Com o novo conceito do projeto para o sistema de lavagem a seco, o CTC obteve alguns resultados preliminares os quais são demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de impureza e eficiência de separação em função do tipo de coleta.

Colheita	Perdas de Cana (%)	Separação de Folhas (%)	Separação de Ponteiros (%)	Separação de terra (%)
Ventilada	0,1	29,0	2,0	70,0
Parcialmente Ventilada	0,5	40,0	4,0	75,0
Sem Ventilar	1,8	45,0	10,0	64,0

A Tabela 4 demonstra uma análise que, quanto maior a quantidade de impurezas (vegetal e mineral) adentra na usina (Sem Ventilar), ocorre um maior valor na eficiência de separação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco, sendo que essa eficiência é menor para os ponteiros (10 %).

A Figura 3.9 mostra uma relação da rotação do extrator primário da colhedora com a quantidade de impurezas que chega à moenda e que é separada pelo sistema de limpeza a seco do projeto novo do CTC.

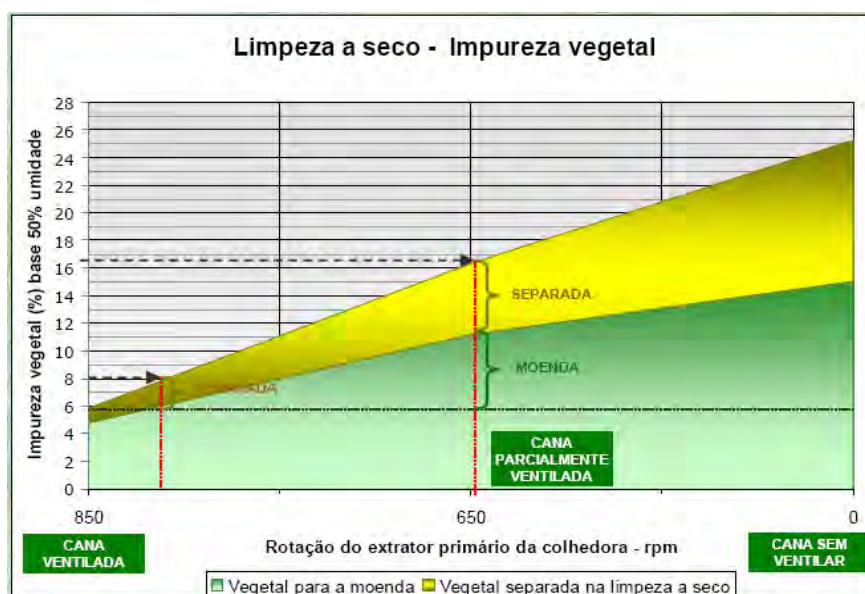


Figura 3.9 - Relação da rotação do extrator primário da colhedora com a quantidade de impurezas.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

3.4 Princípios de Funcionamento do Sistema de Limpeza de Cana a Seco

O sistema atual faz com que um fluxo de ar gerado por ventiladores atravesse a "cascata" de cana, que cai da mesa alimentadora para a esteira de cana, sendo que os ventiladores são instalados atrás ou sob a mesa de alimentação para eliminar as impurezas por sopragem, variando a quantidade e a localização de acordo com o layout da instalação.

A Figura 3.10 mostra dois sistemas com localização diferente dos ventiladores.

As mesas de alimentação, com 10 a 13 metros de comprimento e ângulos de 35°, 45° e 50°, além de receber e armazenar a cana, estão diretamente ligadas à instalação dos ventiladores, à queda da cana de certa altura direta na esteira de talisca ou de borracha e à queda de areia e terra. Já na descarga da mesa, os ventiladores removem a palha e parte da areia.

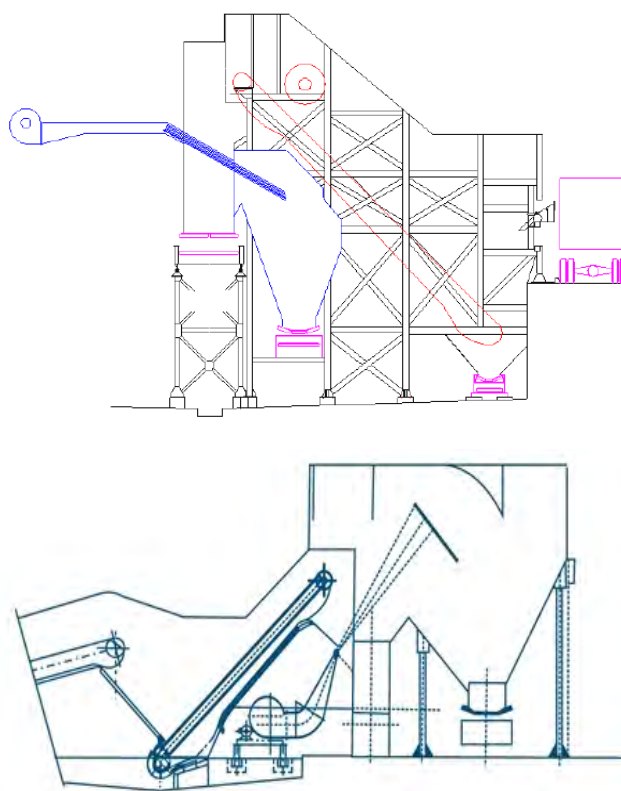


Figura 3.10 – Projeto atual do sistema de lavagem de cana a seco.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC; www.techpetersen.com.br

A Figura 3.11 mostra uma Mesa Alimentadora de 13 m de comprimento e 45° de inclinação.

Segundo o CTC utilizando apenas a cana picada, o fluxo de ar realiza um trabalho melhor, chegando a níveis de limpeza próxima dos 70 % da cana que é descarregada na Mesa Alimentadora. Na cana inteira este índice chega de 60 a 65 %. É mais do que suficiente para que a usina processe o caldo e o bagaço sem transtornos.



Figura 3.11 – Mesa alimentadora.

Fonte: Usina Pioneiros Bioenergia S/A.

A Figura 3.12 apresenta o esboço do Sistema de Limpeza de Cana a Seco e uma foto real do transporte da cana picada após ser descarregada na Mesa Alimentadora através da esteira de taliscas.

Uma opção para que na própria Mesa Alimentadora já ocorra uma pré-separação das impurezas vegetais é trabalhar com as chapas de fundo perfuradas, assim parte da terra contida na cana já é eliminada.

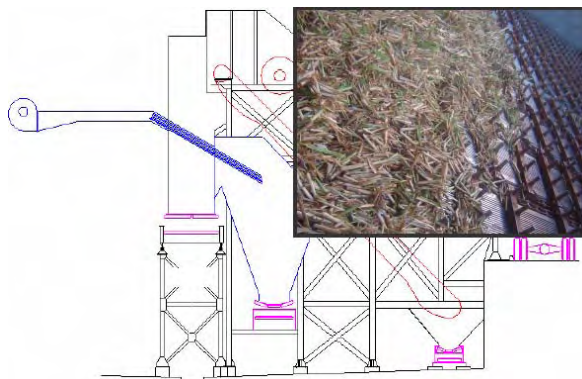


Figura 3.12 – Transporte de cana picada pela esteira de talisca.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

Na Figura 3.13 é mostrado o local de instalação dos ventiladores que no caso do projeto do CTC fica atrás da Mesa Alimentadora e na Figura 3.14 ilustra-se o local de saída de ar que faz a separação da cana das impurezas mineral e vegetal.

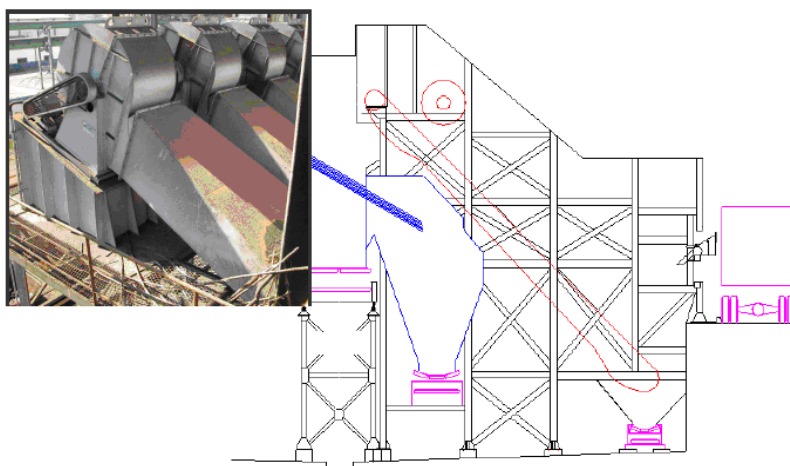


Figura 3.13 – Sistema de ventilação do sistema de limpeza de cana a seco.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

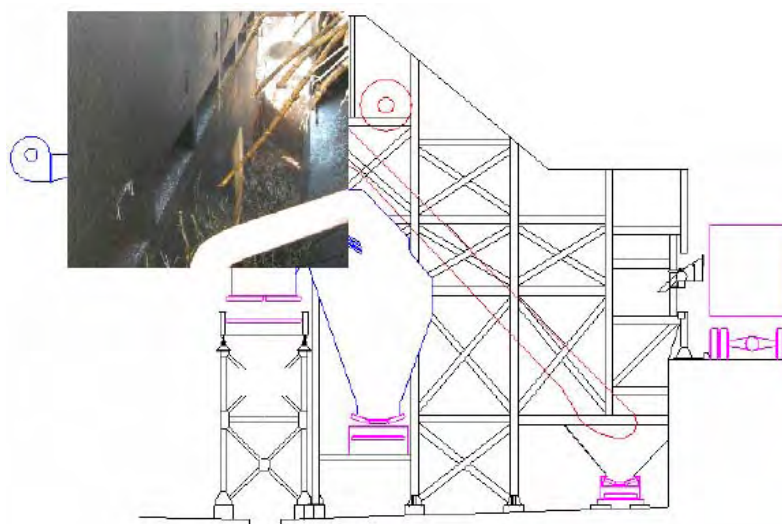


Figura 3.14 – Saídas de ar do sistema de limpeza de cana a seco.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

Com a instalação deste sistema, as Caldeiras podem queimar sem problemas o bagaço advindo de moendas com limpeza por ventilação, e as seções de decantação e filtração, devidamente dimensionadas, podem operar sem transtornos.

Este processo tem duas formas de separação de terra da palha que inevitavelmente é arrastada pelo fluxo de ar: O sistema via seco e via úmido. No sistema via seco, a câmara recolhe a terra através de esteiras transportadoras que enviam para um reservatório definido para se dar o destino final. No sistema via úmida, uma cortina de água recolhe a terra e a palha, separada esta da terra por um *cush-cush*, e segue para o sistema de decantação, onde a água volta ao processo.

A Figura 3.15 apresenta a caixa coletora de palha e terra e a Figura 3.16 apresenta o Sistema de Lavagem de Cana a Seco já em operação na usina Equipav em Promissão, SP.

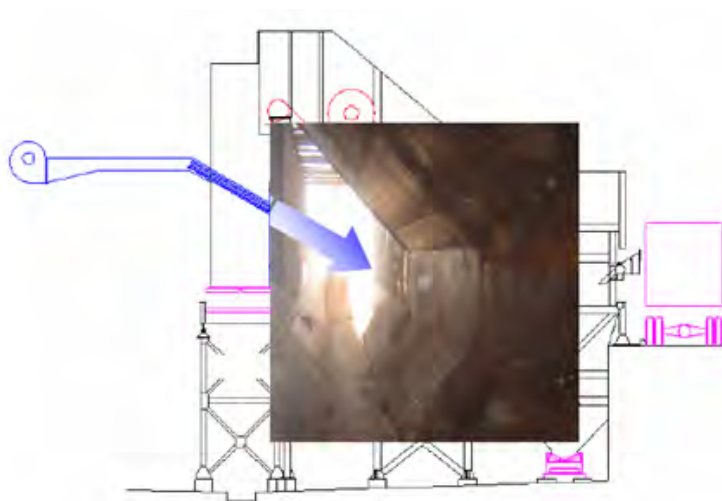


Figura 3.15 – Caixa coletora de palha e terra.

Fonte: Centro de Tecnologia Canaveira – CTC.



Figura 3.16 – Sistema de lavagem a seco em uma usina sucroalcooleira.

Fonte: Usina Equipav.

4 Conceitos e Metodologia Aplicada para o Aproveitamento da Palha

A seguir serão apresentados os conceitos e a metodologia aplicada para o aproveitamento da palha da cana de açúcar.

4.1 Dados de Entrada

Para início do programa elaborado é necessária a inserção de alguns dados, como a quantidade de palha existente na de cana de açúcar.

Na Figura 4.1 segue um desenho ilustrativo de como a cana de açúcar é composta.

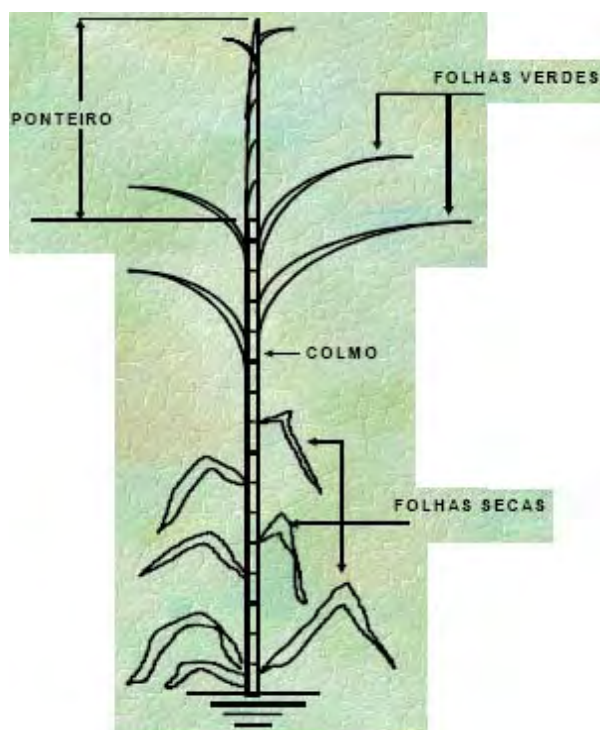


Figura 4.1 – Divisão da cana de açúcar.

Fonte: Centro de Tecnologia Canavieira – CTC.

A Tabela 5 se refere a composição química de uma cana de açúcar madura, normal e sadia.

Tabela 5 – Composição química típica de um colmo de cana de açúcar.

Água	74,50%	-----	74,50%
Cinzas	0,50%	SiO ₂	0,25%
		K ₂ O	0,12%
		Na ₂ O	0,01%
		CaO	0,02%
		MgO	0,01%
		Fe ₂ O ₃	-
		P ₂ O ₅	0,07%
		SO ₃	0,02%
		Cl	-
Fibra	10,00%	Celulose	0,25%
		Pentosana	0,12%
		Goma de Cana	0,01%
		Lignina, etc	0,02%
Açúcares	14,00%	Sacarose	12,50%
		Dextrose	0,90%
		Levulose	0,60%
Matérias Nitrogenadas	0,40%	Albuminóides	0,12%
		Amida	0,07%
		Aminoácidos	0,20%
		Ácido Nítrico	0,01%
		Amoníaco	-
		Corpos xânticos	-
Graxas e ceras	0,20%	-----	0,20%
Pectinas	0,20%	-----	0,20%
Ácidos Livres	0,08%	-----	0,08%
Ácidos combinados	0,12%	-----	0,12%

Fonte: <http://www.cosan.com.br>.

Para fins de cálculos foram considerados 12% de palha e o restante (88%) de colmo para a cana de açúcar.

A Tabela 6 apresenta outros dados que são considerados para determinação dos resultados.

Tabela 6 – Dados de entrada para uso no programa.

Parâmetro	Valor
PCI do Bagaço a 51% umidade	7.243 kJ/kg
PCI da Palha a 15% umidade	12.905 kJ/kg
Fibra da Palha	85 %
Fibra do Colmo	12 %
Fibra do Bagaço	47 %
% Açúcar Redutor Total (ART)	16 %

Fonte: Usina Pioneiros Bioenergia S/A.

Com esses dados é possível determinar a porcentagem de caldo e a de bagaço para uma determinada quantidade de cana de açúcar plantada.

$$P_{Caldo} = 1 - P_{FC} - ART \quad (4.1)$$

$$P_{Bag} = P_{FC} / P_{FB} \quad (4.2)$$

onde:

P_{Caldo} - Porcentagem de caldo existente na cana de açúcar (%);

P_{FC} - Porcentagem de fibra no colmo (%);

P_{FB} - Porcentagem de fibra no bagaço (%);

ART - Açúcar redutor total (%);

P_{Bag} - Bagaço gerado a partir da cana de açúcar (%).

Determinada a quantidade de cana de açúcar plantada e considerando uma produtividade de 90 t/ha, pode-se calcular a área necessária para o plantio da mesma como sendo:

$$A_{Plantio} = \frac{Cana_{Total} \cdot P_{Colmo}}{Prod} \quad (4.3)$$

onde:

$A_{Plantio}$ - Área necessária para o plantio da cana de açúcar (ha);

$Cana_{Total}$ - Cana total plantada (t);

P_{Colmo} - Porcentagem de colmo na cana de açúcar (%);

$Prod$ - Produtividade (t/ha).

De acordo com o CTC as colhedoras de cana apresentam 3 tipos de variação na ventilação para a separação de palha já no campo. A Tabela 7 demonstra esses dados.

Tabela 7 – Porcentagem de separação de palha pelas colhedoras.

Tipo de colheita	Palha no Campo	Palha para Indústria
Ventilada	80 %	20 %
Parcialmente Ventilada	50 %	50 %
Sem Ventilar	6 %	94%

O programa desenvolvido também apresenta algumas variações para chegar a resultados mais próximos possíveis do real, como por exemplo, eficiência da lavagem de cana pelo Sistema de Limpeza de Cana a Seco, taxa de utilização do equipamento, eficiência da Indústria (extração), porcentagem de mecanização do corte de cana de açúcar, custos de venda de açúcar, álcool e energia além do *mix* de produção.

4.2 Produção de Álcool

Atualmente 85 % do etanol brasileiro é consumido no mercado interno. Dois fatores contribuem para isso: a proporção de álcool anidro na gasolina e a expansão de veículos bicombustíveis. A produção de etanol em 2007 foi de 20,1 bilhões de litros; em 2008 foi de 27,1 bilhões de litros e se estima que, em 2030, alcance a marca de 66,6 bilhões de litros. Em 2007 foram plantados 7,08 milhões de hectares de cana, e em 2008 um total 9,0 milhões de hectares. Um aumento de 1,9 milhões de hectares plantados com cana em apenas um ano (BRASIL, 2008).

O Álcool Anidro é o produto obtido através do processo de desidratação do álcool hidratado, com a utilização de agentes desidratantes como benzol, ciclohexano e peneira molecular. Ele encerra uma riqueza alcoólica mínima de cerca de 99,3°INPM, com um grau recomendável para a produção de 99,5°INPM ou 99,69°GL, sendo que °INPM e °G correspondem, respectivamente, a concentração de álcool em peso e em volume, a 15°C.

O Álcool Hidratado é o produto principal da operação de retificação e possui uma riqueza alcoólica mínima de 92,6°INPM e máxima de 93,8°INPM.

A seguir são descritas as equações necessárias para o cálculo do rendimento teórico da produção de álcool de anidro e hidratado, respectivamente:

$$Rt_{Aan} = Re_{Aan} \left[\left(\frac{1}{D_{Aab}} \right) + \left(\frac{1}{TA_{Aan}/100} \right) - 1 \right] \quad (4.4)$$

$$Rt_{Ahi} = Re_{Ahi} \left[\left(\frac{1}{D_{Aab}} \right) + \left(\frac{1}{TA_{Ahi}/100} \right) - 1 \right] \quad (4.5)$$

onde:

- D_{Aab} - Densidade do álcool absoluto (kg/l);
- Re_{Aan} - Rendimento estequiométrico do álcool anidro (kg/kg ART);
- Re_{Ahi} - Rendimento estequiométrico do álcool hidratado (kg/kg ART);
- Rt_{Aan} - Rendimento teórico do álcool anidro (l/kg ART);

Rt_{Ahi} - Rendimento teórico do álcool hidratado (l/kg ART);

TA_{Aan} - Teor alcoólico do álcool anidro (% peso);

TA_{Ahi} - Teor alcoólico do álcool hidratado (% peso).

O rendimento global da produção de álcool anidro e de álcool hidratado pode ser calculado, respectivamente, pelas equações:

$$Rg_{Aan} = (Rt_{Aan} \cdot Rp_{Ferm} \cdot R_{Dest}) / 10.000 \quad (4.6)$$

$$Rg_{Ahi} = (Rt_{Ahi} \cdot Rp_{Ferm} \cdot R_{Dest}) / 10.000 \quad (4.7)$$

onde:

Rg_{Aan} - Rendimento global do álcool anidro (l/kg ART);

Rg_{Ahi} - Rendimento global do álcool hidratado (l/kg ART);

Rp_{Ferm} - Rendimento prático da fermentação (%);

R_{Dest} - Rendimento da destilaria (%).

Para encontrar a produção final de álcool, o ART perdido no processo (ART_{PP}), assim como o recuperado (ART_{Rec}), devem ser calculados, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$ART_{PP} = ART_{DP} \left[1 - \left((Rp_{Ferm} / 100) (R_{Dest} / 100) \right) \right] \quad (4.8)$$

$$ART_{Rec} = ART_{DP} - ART_{PP} \quad (4.9)$$

Assim, pode-se definir a produção final de álcool anidro e hidratado, respectivamente, por:

$$Pf_{Aan} = ART_{Rec} Rg_{Aan} \quad (4.10)$$

$$Pf_{Ahi} = ART_{Rec} Rg_{Ahi} \quad (4.11)$$

onde:

ART_{PP} - ART perdido no processo (kg de ART);

ART_{DP} - ART disponível para o processo (kg de ART);

ART_{Rec} - ART recuperado (kg de ART);

Pf_{Aan} - Produção final de álcool anidro (litros);

Pf_{Ahi} - Rendimento da destilaria (litros).

4.3 Fabricação de Açúcar

O açúcar como produto de consumo de massa é o produto que mais participa da alimentação diária dos brasileiros. Com um consumo individual de 45 kg/habitante/ano, o maior do mundo, esse produto detém um portfólio dos mais variados. Sua presença se faz obrigatória na produção industrial de diferentes gêneros alimentícios. As indústrias de refrigerante, panificação, sucos artificiais e achocolatados, são as que mais utilizam esse produto na fabricação de seus produtos. O açúcar refinado líquido, por exemplo, é bastante utilizado pela indústria na fabricação de bebidas carbonatadas, licores, sucos de frutas; sorvetes, alimentos matinais; balas achocolatadas, biscoitos e confeitos; além de cervejas especiais adoçadas (MOAGEM..., 2005).

A partir dos dois últimos séculos o açúcar começou a ser produzido e consumido de forma cada vez mais intensa. Com a sofisticação da técnica, purificou-se ainda mais o açúcar de cana retirando-se dele apenas a sacarose branca e com a adição de produtos químicos é obtido o açúcar branco cristal. O açúcar VHP (*Very High Polarization*) por ser menos úmido (Max 0,10 %), é ideal para exportação, pois facilita o transporte. Toda sua produção é destinada ao mercado externo para o refino em outros países devido sua alta polarização (99,0 a 99,5°S).

A Tabela 8 demonstra a classificação do açúcar cristal de acordo com a Polarização (POL), que é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal, determinada pelo desvio provocado

pela solução no plano de vibração da luz polarizada, com a cor e as porcentagens de umidade e de cinza.

Tabela 8 – Classificação do açúcar cristal.

Tipo	POL	Umidade (%)	Cor (UI)	Cinzas (%)
Açúcar Demerara	Máx. 99,0 °S	-	-	-
Açúcar Standard	Mín. 99,3 °S	0,15	700	0,15
Açúcar VHP	Mín. 99,3 °S	0,10	700	0,10
Açúcar Superior	Mín. 99,5 °S	0,10	> 400	0,10
Açúcar 200 tipo 3	Mín. 99,7 °S	0,04	200	0,05
Açúcar 150 tipo 2	Mín. 99,7 °S	0,04	150	0,05
Açúcar Refinado	Mín. 99,8 °S	0,04	45	0,04

A seguir são descritas as equações necessárias para o cálculo de produção de açúcar branco e VHP.

A eq. (4.12) é referente ao ART recuperado, sendo que para seu cálculo é necessário analisar a eficiência de recuperação de ART pela porcentagem de ART da cana (ε_{Rec_ART}), assim quando ocorrer apenas produção de açúcar a eficiência é de 85 % e quando se tem a produção de açúcar e álcool a eficiência é de 90 %.

$$ART_{Rec} = ART_{DP} \varepsilon_{Rec_ART} \quad (4.12)$$

As eqs. (4.13) e (4.14) são referentes à produção de açúcar branco e açúcar VHP, respectivamente:

$$Pf_{Branco} = \left(\frac{ART_{Rec}}{(50 \cdot 0,95 / Pol_{Branco})} \right) \quad (4.13)$$

$$Pf_{VHP} = \left(\frac{ART_{Rec}}{(50 \cdot 0,95 / Pol_{VHP})} \right) \quad (4.14)$$

onde:

Pf_{Branco} - Produção Final de Açúcar Branco (sacas);

Pf_{VHP} - Produção final de açúcar VHP (sacas);

Pol_{Branco} - Pol para produção de açúcar branco (%);

Pol_{VHP} - Pol para produção de açúcar VHP (%).

4.4 Balanço Energético da Geração de Energia

Desde a sua implantação e em maior escala a partir da metade do século XX, as indústrias do setor sucroalcooleiro desenvolveram instalações próprias de geração elétrica, seja através de pequenos aproveitamentos hidrelétricos, óleo diesel, e, depois, face à indisponibilidade de energia elétrica e aos seus custos, adotaram-se sistemas de geração, em processo de cogeração, ajustados às necessidades do processamento industrial da cana de açúcar, utilizando o bagaço.

Mas, como a quantidade do bagaço produzida é muito elevada, existe um grande potencial para geração de eletricidade para venda comercial.

4.4.1 Conceitos Termodinâmicos

4.4.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

A maneira clássica de determinar o desempenho térmico de sistemas é através da utilização da primeira lei da termodinâmica. Esta análise permite, sob o ponto de vista da energia, definir o desempenho de cada equipamento e também o desempenho global do sistema (HORLOCK, 1997).

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 exérgica (KOTAS, 1985). Esta forma de avaliação não substitui as avaliações feitas com base na 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 (FIOMARI, 2004).

A eq. (4.15) mostra que, em regime permanente, a taxa total do fluxo de massa entrando no volume do controle é igual à taxa total do fluxo de massa que sai do volume do controle e a eq. (4.16) estabelece que a taxa total da energia entrando no volume de controle é igual à taxa total de energia deixando o volume de controle, já desconsiderando as variações de energia cinética e potencial.

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (4.15)$$

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (4.16)$$

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);

\dot{Q}_{vc} - Taxa de transferência de calor para o volume de controle (kW);

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

4.4.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica

As irreversibilidades num processo são quantificadas pela Segunda Lei da Termodinâmica, por meio da propriedade entropia. Para processos em um volume

de controle, considerando que o processo seja em regime permanente o balanço de entropia é definido como:

$$\dot{S}_{ger} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_{vc,i}}{T_i} \right) + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s = 0 \quad (4.17)$$

onde:

- s_e - Entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kgK);
- s_s - Entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kgK);
- T_j - Temperatura superficial do volume de controle (K);
- \dot{S}_{ger} - Geração de entropia no volume de controle (kJ/kgK); $\dot{S}_{ger} \geq 0$.

Para se prever se um processo qualquer que envolve interações de energia pode ocorrer ou se os sentidos dos processos de transferência do calor são possíveis pode-se utilizar a equação de balanço de entropia e também se pode dizer que a segunda lei governa o limite de conversão entre diferentes formas de energia. Para um processo ser possível do ponto de vista termodinâmico é necessário que $\dot{S}_{ger} \geq 0$.

4.4.1.3 Balanço de Exergia

A determinação de um fluxo (termodinâmico) em termos do trabalho mecânico que poderia ser extraído dele e as ineficiências e perdas reais dos sistemas energéticos vinculam estreitamente a aplicação da primeira e segunda leis da termodinâmica.

No centro da análise está o conceito de exergia, que para um sistema termodinâmico, num dado estado, é definido como a máxima quantidade de trabalho que se pode obter chegando a um estado de equilíbrio entre o sistema e o ambiente em um processo reversível, porém no processo irreversível existe um saldo de trabalho não realizável que dá uma medida da irreversibilidade do processo.

Outra definição seria a de Kotas (1985) que afirma que a exergia é o padrão de qualidade de energia, igual ao máximo trabalho útil que pode ser obtido de uma dada forma de energia, utilizando os parâmetros do ambiente (P_0 , T_0) como referencial.

Assim, para sistemas energéticos cujos fluxos operam com parâmetros fora das condições do ambiente de referência, a exergia pode ser entendida como a parte da energia que pode ser transformada em trabalho mecânico de forma reversível e útil, sendo a destruição de exergia o resultado direto das irreversibilidades de um sistema. Um dos aspectos que pode aumentar a geração de irreversibilidades é o funcionamento do equipamento fora das condições de projeto inerentes ao mesmo, aspecto que geralmente incrementa não só a destruição de exergia, mas também as perdas exergéticas para o ambiente.

Como a exergia é função de propriedades de dois estados (físico e químico), uma vez fixado o ambiente de referência, pode-se utilizá-lo para calcular a exergia de qualquer outro estado. Sendo uma propriedade termodinâmica, a variação de exergia entre dois estados será independente do processo seguido para alcançar um a partir do outro. Isto permite, por sua vez, definir uma trajetória composta por vários processos para separar a variação total de exergia no somatório de vários termos.

Szargut, Morris e Steward (1988) e Kotas (1985), bem como outros autores, propõem a seguinte relação para o cálculo da exergia:

$$b_t = b_{fis} + b_{qui} \quad (4.18)$$

onde:

b_{fis} - Exergia física específica (kJ/kg);

b_{qui} - Exergia química específica (kJ/kg).

A exergia física de um fluxo é calculada com base num estado de referência restrito (P_0 , T_0) onde há equilíbrio térmico e mecânico com o meio, através da seguinte equação:

$$b_{fis} = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (4.19)$$

Para haver equilíbrio completo com o meio, o sistema deve estar também em equilíbrio químico com ele. O trabalho que pode ser obtido através de um processo reversível que leva o sistema do estado de referência restrito até o estado de referência onde há equilíbrio completo (“estado morto”), é a exergia química, definida por:

$$b_{qui} = \sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (4.20)$$

onde:

- $\mu_{0,i}$ - Potencial químico de referência do elemento (T_0, P_0);
- μ_i - Potencial químico do elemento na mistura (T_i, P_i);
- x_i - Fração do componente na mistura.

Logo, a exergia total (b_t) pode ser representada por:

$$b_t = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum_i (\mu_i - \mu_{0,i}) x_i \quad (4.21)$$

A combinação entre a primeira e segunda leis da termodinâmica permite que se estabeleça o balanço de exergia. Considere o sistema da Figura 4.2 que num certo instante pode estar em contato térmico com vários reservatórios térmicos de temperaturas T_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). A atmosfera, representada pelo reservatório térmico a P_0 e T_0 , tem um papel especial na instalação. A potência (\dot{W}) representa a combinação de todos os modos possíveis de transferência de trabalho ($P dV/dt, \dot{W}_{mecânico}, \dot{W}_{elétrico}, \dot{W}_{magnético}$).

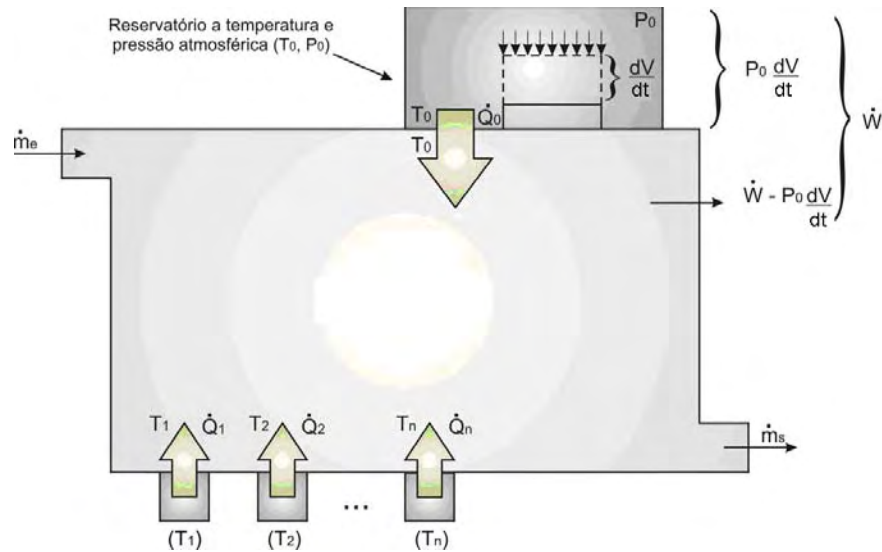


Figura 4.2 – Sistema aberto em comunicação com a atmosfera e n reservatórios térmicos.

Com referência ao sistema aberto e desprezando as mudanças de energia cinética e potencial, pode-se escrever a primeira e a segunda leis da seguinte forma:

$$\frac{dE}{dt} = \sum \dot{Q}_i - \dot{W} + \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e = 0 \quad (4.22)$$

$$\dot{S}_{ger} = \frac{dS}{dt} - \sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \dot{m}_s s_s \geq 0 \quad (4.23)$$

Eliminando \dot{Q}_0 das eqs. (4.22) e (4.23), encontra-se que a potência (\dot{W}) depende explicitamente do grau de irreversibilidade termodinâmica do sistema (\dot{S}_{ger}), como segue:

$$\dot{W} = -\frac{d}{dt}(E - T_0 S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}_e (h - T_0 s) - \sum \dot{m}_s (h - T_0 s) - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (4.24)$$

Assim, a eq.(4.24) pode ser expressa como:

$$\dot{W} = \dot{W}_{rev} - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (4.25)$$

Na qual, tem-se:

$$\dot{W}_{rev} = -\frac{d}{dt}(E - T_0 S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}_e (h - T_0 s) - \sum \dot{m}_s (h - T_0 s) \quad (4.26)$$

Pode-se fazer a diferença entre a taxa de transferência de trabalho reversível e a taxa de transferência de trabalho real, resultando a taxa de transferência de trabalho perdido ou taxa de exergia destruída (\dot{W}_{perd}), ou seja, irreversibilidades, conforme segue:

$$\dot{W}_{perd} = \dot{I} = \dot{W}_{rev} - \dot{W} = T_0 \dot{S}_{ger} \geq 0 \quad (4.27)$$

A expressão $\dot{W}_{perd} = \dot{I} = T_0 \dot{S}_{ger}$ é conhecida como Teorema do Trabalho Perdido de “Gouy-Stodola”.

A taxa de trabalho útil (\dot{E}_w) é:

$$\dot{E}_w = \dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt} \quad (4.28)$$

Portanto, o balanço de exergia é o seguinte:

$$\dot{E}_w = -\frac{d}{dt}(E + P_0 V - T_0 S) + \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) \dot{Q}_i + \sum \dot{m}_e (h - T_0 s) - \sum \dot{m}_s (h - T_0 s) - T_0 \dot{S}_{ger} \quad (4.29)$$

Sob a ótica da Segunda Lei da Termodinâmica, a adoção da hipótese de processo adiabático pode ser uma condição útil para a identificação de irreversibilidades internas que não estão associadas às medições de calor na fronteira do volume de controle (KOTAS, 1985).

Para os processos que envolvem transferência de calor, a seleção da superfície de controle é importante para a determinação das perdas exergéticas

associadas ao termo de transferência de calor na equação do balanço exergético e da exergia destruída ou irreversibilidade (BEJAN, 1988).

Quando a fronteira do volume de controle posiciona-se suficientemente distante do equipamento onde ocorre a interação de calor, o termo de exergia associado a este calor transferido se anula, já que a temperatura da fronteira é a mesma do meio. Neste caso, a redução de exergia de fluxo na saída do volume de controle é computada como uma irreversibilidade interna ou exergia destruída, ao invés de exergia perdida. Por este motivo, a seleção da fronteira para análise do volume de controle é importante quando se pretende identificar as reais possibilidades de aumento de eficiência térmica de um processo, diferenciando-se as irreversibilidades intrínsecas daquelas que poderiam ser evitadas.

4.4.1.4 Irreversibilidade dos Equipamentos

Um importante parâmetro a ser observado na análise exergética é a irreversibilidade em cada equipamento e, conseqüentemente, em todo o sistema. As irreversibilidades são determinadas através da aplicação do balanço de exergia, descrito na eq. (4.29), em cada volume de controle definido no sistema.

A irreversibilidade mostra a quantidade de exergia que é destruída em cada equipamento do ciclo, ou seja, mostra o quanto o equipamento é eficiente em aproveitar a exergia que nele é introduzida.

A análise exergética também contempla a determinação da quantidade com que cada equipamento contribui na geração de irreversibilidade global do sistema, podendo ser definida uma equação que permite quantificar a porcentagem da irreversibilidade de cada equipamento (δ_i) em relação ao total da planta:

$$\delta_i = \frac{\dot{I}_i}{\sum \dot{I}_i} \quad (4.30)$$

onde:

\dot{i}_i - Irreversibilidade num determinado equipamento;

$\sum \dot{i}_i$ - Irreversibilidade total da planta.

4.4.1.5 Eficiências Térmicas pela Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica

A eficiência termodinâmica baseada na primeira lei (η_I) relaciona o trabalho realizado no volume de controle com o trabalho produzido em um processo hipotético isoentrópico desde o mesmo estado de entrada até a mesma pressão de saída. Um processo pode ser chamado de isoentrópico se a entropia é constante durante o processo. Para que isso ocorra necessariamente o processo tem que ser adiabático, mas não necessariamente um processo adiabático é isoentrópico. A eq. (4.31) mostra a eficiência com base na primeira lei:

$$\eta_I = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m} \Delta h_{iso}} \quad (4.31)$$

onde:

Δh_{iso} - Diferença entre as entalpias de entrada e saída do volume de controle, para processo isoentrópico (kJ/kg);

\dot{m} - Vazão mássica (líquido ou vapor) no volume de controle (kg/s).

Associado ao uso da análise de exergia foi desenvolvido o conceito de eficiência determinada a partir do ponto de vista da segunda lei da termodinâmica.

$$\eta_{II} = \frac{\dot{W}_{v.c.}}{\dot{m}(b_e - b_s)} \quad (4.32)$$

No caso específico das caldeiras, as eficiências de primeira e segunda leis

são calculadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\eta_I = \frac{\dot{m}_s h_s - \dot{m}_e h_e}{\dot{m}_{comb} PCI_{comb}} \quad (4.33)$$

$$\eta_{II} = \frac{\dot{m}_s b_s - \dot{m}_e b_e}{\dot{m}_{comb} b_{comb}} \quad (4.34)$$

onde:

- h_s - Entalpia específica na saída da caldeira (kJ/kg);
- h_e - Entalpia específica na entrada da caldeira (kJ/kg);
- b_s - Exergia específica na saída da caldeira (kJ/kg);
- b_e - Exergia específica na entrada da caldeira (kJ/kg);
- b_{comb} - Exergia específica do bagaço da cana (kJ/kg);
- \dot{m}_s - Vazão mássica na saída da caldeira (kg/s);
- \dot{m}_e - Vazão mássica na entrada da caldeira (kg/s);
- \dot{m}_{comb} - Vazão mássica de combustível consumido na caldeira (kg/s);
- PCI_{comb} - Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

Através da primeira e segunda leis da termodinâmica, foi possível avaliar a eficiência e a geração de calor e potência para cada componente tais como caldeiras, turbinas, condensadores e bombas que compõe a planta avaliada, bem como o aproveitamento global de energia desta.

Para a análise termodinâmica de sistemas são aplicadas as equações de conservação da massa, conservação de energia (primeira lei da termodinâmica), balanço de entropia (segunda lei da termodinâmica) e o balanço de exergia baseado nas duas leis anteriores, considerando um volume de controle para cada um dos equipamentos que compõem a planta a ser analisada. A análise exergética é útil para a avaliação de desempenho dos componentes e do sistema em seu conjunto. É importante também para quantificar as irreversibilidades termodinâmicas verificadas nos diversos processos (BEJAN, 1988).

Adotou-se para esse trabalho que todo volume de controle analisado, seja pela primeira lei da termodinâmica ou pela segunda, considerará a operação em regime permanente (RP). Portanto, nas análises não serão incluídas as fases transitórias de entrada em operação, parada ou qualquer variação no tempo, mesmo em operação normal. Isso equivale a dizer que qualquer variação de massa, energia e exergia no tempo dentro do volume de controle serão desconsideradas. Essa hipótese é possível de ser adotada nesse caso, pois mesmo os volumes de controle maiores, que é caso da caldeira, não apresentam grandes variações de massa ou de suas propriedades termodinâmicas quando em operação normal.

4.4.2 Exportação de Energia e Produção Energética

Na Tabela 9 segue dados que foram utilizados para os cálculos de exportação de energia e produção energética.

Tabela 9 – Dados de entrada para cálculo de exportação de energia e eficiência térmica.

Parâmetro	Valor
Rendimento da caldeira	86 %
Entalpia da água de alimentação da caldeira	440 kJ/kg
Entalpia de vapor gerado	3.483 kJ/kg
Consumo vapor de processo	430 kg _{vapor} /t _{cana}
Consumo do setor extração de caldo	5 kg _{vapor} /kW
Consumo do condensador	3 kg _{vapor} /kW
Consumo específico	16 kWh/t _{cana}
Consumo da moenda	15 kWh/t _{cana}

A produção de vapor por bagaço e palha pela caldeira são dados pelas eqs. (4.35) e (4.36), respectivamente:

$$Pcald_{Bag} = \frac{\eta_{Cald} \cdot PCI_{Bag}}{(h_{Vger} - h_{Aal})} \quad (4.35)$$

$$Pcald_{Palha} = \frac{\eta_{Cald} \cdot PCI_{Palha}}{(h_{Vger} - h_{Aal})} \quad (4.36)$$

onde:

$Pcald_{Bag}$ - Produção de vapor por bagaço pela caldeira (kg_{vapor}/kg_{bag});

$Pcald_{Palha}$ - Produção de vapor por palha pela caldeira (kg_{vapor}/kg_{palha});

η_{Cald} - Rendimento da caldeira (%);

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

PCI_{Palha} - Poder Calorífico Inferior da palha (kJ/kg);

h_{Vger} - Entalpia do vapor gerado (kJ/kg);

h_{Aal} - Entalpia da água de alimentação (kJ/kg).

O vapor gerado pela caldeira é utilizado na turbina a vapor onde parte é destinada a extração e a outra parte para a condensação. Abaixo seguem as equações necessárias para encontrar esses valores:

$$V_{Ger} = (Pcald_{Bag} \cdot Bag_{Disp}) + (Pcald_{Palha} \cdot Palha_{Disp}) \quad (4.37)$$

$$V_{Ext} = Cv_{Proc} M_{Safra} / 1000 \quad (4.38)$$

$$V_{Cond} = V_{Ger} - V_{Ext} \quad (4.39)$$

onde:

V_{Ger} - Vapor gerado pela caldeira (t/safra);

V_{Ext} - Vapor destinado à extração da turbina (t/safra);

V_{Cond} - Vapor destinado à condensação da turbina (t/safra);

Bag_{Disp} - Bagaço de cana disponível (t/safra);

- $Palha_{Disp}$ - Palha disponível (t/safra);
 M_{Safra} - Moagem total (t/safra);
 Cv_{Proc} - Consumo de vapor pelo processo (kg/t_{cana}).

Desta forma é possível encontrar a geração de energia através da extração e condensação da turbina a vapor através das eqs. (4.40) e (4.41), respectivamente.

$$G_{Ext} = V_{Ext} / C_{Ext} \quad (4.40)$$

$$G_{Cond} = V_{Cond} / C_{Cond} \quad (4.41)$$

Com a somatória das eqs. (4.40) e (4.41) encontra-se a geração total da turbina extração/condensação:

$$G_{Total} = G_{Ext} + G_{Cond} \quad (4.42)$$

onde:

- G_{Ext} - Geração de energia através da extração da turbina (MW);
 G_{Cond} - Geração de energia através da condensação da turbina (MW);
 G_{Total} - Geração total da turbina (MW);
 C_{Ext} - Consumo da turbina na extração (kg_{vapor}/kW);
 C_{Cond} - Consumo da turbina na condensação (kg_{vapor}/kW).

O consumo de energia interno do processo e o consumo da moenda são necessários para encontrar a quantidade total de energia comercializada, assim como o consumo dos equipamentos para adequação da queima da palha na caldeira. As eqs. (4.43) e (4.44) apresentam, respectivamente, o consumo interno de energia pelo processo e consumo de energia pelas moendas:

$$C_{int_{Proc}} = M_{Safra} C_{esp_{Proc}} / 1000 \quad (4.43)$$

$$C_{Moenda} = M_{Safra} C_{esp}_{Moenda} \quad (4.44)$$

A eq. (4.45) demonstra o consumo total de energia pela planta sucroalcooleira analisada:

$$C_{Total_Planta} = C_{int}_{Proc} + C_{Moenda} + C_{extra}_{Palha} \quad (4.45)$$

Desta forma encontra-se a energia total exportada e a produção energética, como sendo, respectivamente:

$$Exp_{Total} = G_{Total} - C_{Total_Planta} \quad (4.46)$$

$$\varepsilon_{Energética} = (Exp_{Total_Energia} \cdot 1.000) / M_{Safra} \quad (4.47)$$

onde:

- C_{int}_{Proc} - Consumo de energia interno do processo (MW/safra);
- C_{esp}_{Proc} - Consumo específico do processo (kWh/t_{cana});
- C_{Moenda} - Consumo de energia pelas moendas (MW/safra);
- C_{esp}_{Moenda} - Consumo específico da moenda (kWh/t_{cana});
- C_{Total_Planta} - Consumo total de energia na planta sucroalcooleira (MW/safra);
- C_{extra}_{Palha} - Consumo extra de energia no processamento da palha (MW/safra);
- Exp_{Total} - Exportação total de energia (MWh/safra);
- $\varepsilon_{Energética}$ - Produção energética (kWh/t_{cana}).

4.4.3 Análise Energética dos Equipamentos do Preparo e Moagem de Cana e do Preparo da Palha

Os equipamentos em análise do setor de preparo de cana são um picador 54" modelo COP-5 e um desfibrador 54" modelo COP-8. A moagem da cana de açúcar é

realizada por 6 ternos de moenda 30 x 54". A Tabela 10 mostra os dados destes equipamentos.

Tabela 10 – Dados de equipamentos do setor de preparo e moagem de cana de açúcar.

Parâmetro	Picador	Desfibrador	Ternos de Moenda
Capacidade Máxima	600 t _{cana} /h	600 t _{cana} /h	600 t _{cana} /h
Potência do Motor	3,087 MW	3,087 MW	1,470 MW
Constante de Potência	0,6	0,7	0,7

O Setor de Preparo de Palha é composto por um picador de palha (mostrado na Figura 3.5) que possui a finalidade de transformar a palha de fibras longas em palha picada, ideal para a queima em caldeiras, esteiras transportadoras (total de 4 esteiras) e uma peneira rotativa para realizar a separação vegetal da mineral. A Tabela 11 mostra os dados destes equipamentos.

Tabela 11 – Dados de equipamentos do setor de preparo da palha.

Parâmetro	Triturador de Palha	Esteiras Transportadoras	Peneira Rotativa
Capacidade máxima (t _{palha} /h)	25,0	25,0	20,0
Potência do motor (kW)	294,0	29,4	11,0
Constante de potência	0,9	0,9	0,9

Os ventiladores que fazem a separação da palha dos colmos da cana de açúcar do Sistema de Limpeza de Cana a Seco (ver Figura 3.13) possuem em média uma constante de consumo de aproximadamente 0,5 kWh/t_{cana}.

Para encontrar a Energia Total Consumida (eq. 4.50) do conjunto de equipamentos acima é necessário calcular a Potência Útil de cada equipamento e a Constante Consumida, conforme as eqs. (4.48) e (4.49):

$$P_{\text{Útil}} = P_{\text{Motor}} \cdot Cte_{\text{Pot}} \quad (4.48)$$

$$Cte_{\text{Cons}} = P_{\text{Útil}} / (Cap_{\text{Máx}} \cdot P_{\text{FC}}) \quad (4.49)$$

$$E_{Total_{Cons}} = \sum Cte_{Cons} \quad (4.50)$$

onde:

- $P_{\text{Útil}}$ - Potência útil do equipamento (kW);
- P_{Motor} - Potência do motor do equipamento (kW);
- Cte_{Pot} - Constante de potência do motor do equipamento;
- Cte_{Cons} - Constante de consumo do equipamento (kWh/t_{cana});
- $Cap_{\text{Máx}}$ - Capacidade máxima do equipamento (t_{cana}/h ou t_{palha}/h);
- $E_{\text{Total}_{\text{Cons}}}$ - Energia total consumida pelos equipamentos (kWh/t_{cana}).

4.5 Cálculo do Sequestro de ART pelo Bagaço

A quantidade de ART sequestrado pelo bagaço, seja ele com palha ou sem palha, foi determinado adotando certa quantidade de colmo (constante) e através das equações que serão apresentadas na seqüência.

As eqs. (4.51) e (4.52) apresentam a quantidade de ART do colmo da cana de açúcar e a quantidade de ART destinada para o processo, respectivamente:

$$ART_{\text{Colmo}} = Cana_{\text{Colmo}} ART_{\text{Cana}} \quad (4.51)$$

$$ART_{\text{Pr oc}} = ART_{\text{Colmo}} \varepsilon_{\text{Ext}} \quad (4.52)$$

onde:

- ART_{Colmo} - ART do colmo da cana de açúcar (kg);
- $ART_{\text{Pr oc}}$ - ART para o processo (kg);
- ART_{Cana} - ART total da cana de açúcar (kg);
- ε_{Ext} - Eficiência de extração da moenda (%).

Assim, é possível encontrar a quantidade de ART (em kg) no bagaço (ART_{Bag}), através da equação:

$$ART_{Bag} = ART_{Colmo} - ART_{Proc} \quad (4.53)$$

Como a quantidade de colmo da cana considerado para determinar o seqüestro de ART é constante a quantidade (em kg) de bagaço produzido (Q_{Bag}) será determinada pela equação:

$$Q_{Bag} = Cana_{Colmo} Bag \quad (4.54)$$

Através destas equações é possível determinar a quantidade de ART que é seqüestrado por quantidade de bagaço produzido (Sq):

$$Sq = ART_{Bag} / Q_{Bag} \quad (4.55)$$

Por fim, mais informações a respeito da formulação podem ser encontradas nas planilhas do programa desenvolvido que se encontram no Apêndice A.

4.6 Balanço Econômico da Geração de Energia, Produção de Álcool e Açúcar

Para encontrar as receitas finais de exportação de energia, produção de álcool e açúcar e, assim, gerar os gráficos que serão apresentados no próximo capítulo para efeito de comparação dos casos estudados, serão necessárias algumas equações que serão descritas a seguir.

As eqs. (4.56) e (4.57) representam as receitas finais da produção de álcool anidro e hidratado, respectivamente, com relação à perda de ART convertida em perda de produção de álcool.

$$R_{Pf_{Aan}} = Pf_{Aan} C_{Aan} \quad (4.56)$$

$$R_{Pf_{Ahi}} = Pf_{Ahi} C_{Ahi} \quad (4.57)$$

As eqs. (4.58) e (4.59) representam as receitas finais da produção de açúcar branco e VHP, respectivamente, com relação à perda de ART convertida em perda de produção de açúcar.

$$R_{Pf_{Branco}} = Pf_{Branco} C_{Branco} \quad (4.58)$$

$$R_{Pf_{VHP}} = Pf_{VHP} C_{VHP} \quad (4.59)$$

A eq. (4.60) representa a receita final de exportação de energia com relação à perda de exportação energia utilizando como base a colheita manual através de queimadas.

$$R_{ExpTotal} = Exp_{Total} C_{Energia} \quad (4.60)$$

onde:

- $R_{ExpTotal}$ - Receita final para exportação de energia (R\$/MW);
- $R_{Pf_{Branco}}$ - Receita final para produção de açúcar branco (R\$/sacas);
- $R_{Pf_{VHP}}$ - Receita final para produção de açúcar VHP (R\$/sacas);
- $R_{Pf_{Aan}}$ - Receita final para produção de álcool anidro (R\$/m³);
- $R_{Pf_{Ahi}}$ - Receita final para produção de álcool hidratado (R\$/m³);
- $C_{Energia}$ - Custo da venda de energia (R\$/MW);
- C_{Branco} - Custo de venda do açúcar branco (R\$/sacas);
- C_{VHP} - Custo de venda do açúcar VHP (R\$/sacas);
- C_{Aan} - Custo de venda do álcool anidro (R\$/m³);
- C_{Ahi} - Custo de venda do álcool hidratado (R\$/m³).

5 Resultados

5.1 Caso 1

No primeiro caso estudado é considerada uma usina com uma moagem média de 1.500.000 toneladas de cana. É considerada uma moagem média, pois a quantidade de cana que passa pelo Setor de Extração é diretamente ligada com a eficiência de ventilação das colhedoras, ora a moagem é menor com uma eficiência maior do ventilador das colhedoras (limpeza/separação da palha), ou seja, uma maior quantidade de palha fica na lavoura, ora é maior com uma eficiência menor da ventilação das colhedoras, ou seja, uma quantidade maior de palha vai para a indústria.

Na safra de 2007/2008 a Usina Santa Isabel / SP ficou em 112º no ranking de produção da região centro-sul com uma moagem de aproximadamente 1.501.884t de cana. Sua produção de álcool anidro foi de 23.037m³ e de hidratado 12.197m³, sendo que a produção de açúcar chegou a 146.877 t (UNICA, 2008).

Neste caso é considerada a produção apenas de álcool com um mix de 70% anidro e 30% hidratado.

A Tabela 12 apresenta os dados de entrada necessários para início dos cálculos, sendo que os dados do SLCS (Sistema de Limpeza de Cana a Seco) foram obtidos através de fornecedores do sistema e os custos de venda de energia e de álcool através da UNICA.

Tabela 12 – Dados de entrada para cálculos (Caso 1).

Dados da Cana de açúcar	
Porcentagem de Palha	12 %
Porcentagem de Cana Colmo	88 %
PCI Bagaço	7.243 kJ/kg
PCI Palha	12.905 kJ/kg
Fibra da Palha	85 %
% Fibra Colmo	12 %
% Fibra do Bagaço	47 %
% ART	16 %
% Caldo	71 %
% Bagaço (51 % umidade)	26 %
Sistema de Lavagem de Cana a Seco	
Eficiência da Lavagem	63 %
Taxa de Utilização do Equipamento	65 %
Investimento	R\$5.000.000,00
Eficiência da Indústria	
Eficiência de Extração (Moenda)	97 %
Custos de Venda do Álcool e Energia	
Álcool Hidratado	R\$ 720,00 / m ³
Álcool Anidro	R\$ 840,00 / m ³
Energia	R\$ 120,00 / MW

Na Tabela 13 pode-se observar que, com uma produtividade de 90 t/ha e uma área de plantio de aproximadamente 16.000 ha (eq. 4.3), a quantidade de cana disponível no canavial, incluindo a palha, é de 1.635.000 t.

Tabela 13 – Rendimento do canavial (Caso 1).

Rendimento do Canavial	
Área de plantio (ha)	16.000
Produtividade (t/ha)	90
Cana com palha (t)	1.635.000

De acordo com o CTC as colhedoras de cana apresentam 3 tipos de variação na ventilação para a separação de palha já no campo (Tabela 7), sendo assim,

considerando 60 % da colheita mecanizada e o restante manual através de queimadas (40 %), chega-se a um valor disponível no canavial de 1.556.520 t de cana de açúcar a ser colhida, deste total cerca de 1.438.800 t são referentes a colmo e 117.720 t referentes a palha (ver Figura 4.1.). Assim a Tabela 14 mostra a quantidade de cana (colmo + palha) que chega a indústria.

Tabela 14 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 1).

Colhedora de Cana (Ventilação)	Quantidade de Colmo e Palha
Ventilada	1.438.800 t_colmo
	23.544 t_palha
Parcialmente Ventilada	1.438.800 t_colmo
	58.860 t_palha
Sem Ventilação	1.438.800 t_colmo
	110.657 t_palha

Com a colhedora trabalhando sem ventilação aproximadamente 6% da palha fica no campo, quase que 5 vezes mais de palha acaba entrando na indústria comparado com a colhedora trabalhando com sua potência máxima de ventilação.

Após a cana ser descarregada na Mesa Alimentadora que possui o Sistema de Limpeza de Cana a Seco (ver Figura 3.16) a quantidade de cana que chega ao setor de Preparo e Extração da indústria é mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 1).

SLCS	Tipo de Ventilação	Colmo (t)	Palha (t)	Total (t)
Ligado	Ventilada	1.438.800	13.903	1.452.703
	Parcialmente Ventilada	1.438.800	23.544	1.462.344
	Sem Ventilação	1.438.800	34.757	1.473.557
Desligado	Ventilada	1.438.800	58.860	1.497.660
	Parcialmente Ventilada	1.438.800	65.343	1.504.143
	Sem Ventilação	1.438.800	110.557	1.549.457

A Tabela 15 apresenta uma situação do SLCS Desligado, ou seja, desta forma se pode comparar com uma usina que não possui este sistema. Comparando a quantidade de palha que segue para os setores de preparo e extração com a

colhedora ventilada e sem ventilar podendo o SLCS estar Ligado ou Desligado observa-se que a diferença é elevada de impureza vegetal que adentra na indústria. Desta forma aumenta a possibilidade de paradas industriais (buchas) no setor e, conseqüentemente, diminui-se a eficiência da indústria.

A Tabela 16 apresenta a quantidade de palha que é separada com o SLCS Ligado.

Tabela 16 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 1).

Tipo de Ventilação	Palha (t)
Ventilada	9.641
Parcialmente Ventilada	24.103
Sem Ventilação	45.314

De acordo com o tipo de sistema de ventilação das colhedoras e respectivamente as quantidades de cana moídas de acordo com a Tabela 14 obtêm-se as quantidades de bagaço apresentadas na Tabela 17, que são destinadas à queima na caldeira. Considera-se que a palha já esteja preparada para a devida queima em uma caldeira de alta pressão.

Tabela 17 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 1).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Bagaço Derivado da Moagem (t)	Palha Preparada para Queima (t)	Total (t)
SLCS Ligado	Ventilada	392.534	9.641	402.175
	Parcialmente Ventilada	413.388	24.103	437.491
	Sem Ventilação	443.974	45.314	489.288
SLCS Desligado	Ventilada	402.175	0,00	402.175
	Parcialmente Ventilada	437.491	0,00	437.491
	Sem Ventilação	489.288	0,00	489.288
Colheita Manual (Queimada)		378.631	0,00	378.631

5.1.1 Resultados Termodinâmicos

Com um rendimento da caldeira de 86 %, a entalpia da água de alimentação da caldeira e do vapor gerado igual a 440 kJ/kg e 3.483 kJ/kg, respectivamente, e outros dados já informados anteriormente nas Tabelas 15, 16 e 17, chega-se aos consumos da moenda, interno do processo e do preparo da palha para queima na caldeira (em MWh / safra) apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 1).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Consumo Moenda	Consumo Extra Palha	Consumo Processo	Consumo Total
SLCS Ligado	Ventilada	21.790	2.373	23.243	47.407
	Parcialmente Ventilada	22.103	4.854	23.577	50.535
	Sem Ventilação	22.562	8.493	24.066	55.122
SLCS Desligado	Ventilada	21.935	1.128	23.397	46.460
	Parcialmente Ventilada	22.464	2.820	23.962	49.247
	Sem Ventilação	23.241	5.301	24.791	53.345
Colheita Manual (Queimada)		21.582	0	23.020	44.603

Como pode ser observado na Tabela 18 o consumo da moenda e do processo não variam muito com a diferença no tipo de ventilação da colhedora, sendo que a maior diferença no consumo total não ultrapassa 1.780 MWh/safra (SLCS Ligado e Desligado - Sem Ventilação), porém no final da safra essa diferença pode corresponder a R\$ 213.600,00.

O consumo extra da palha que passa pelo processo de preparo para queima na caldeira aumenta conforme diminui a eficiência de ventilação da colhedora, ocorrendo um maior consumo quando a colhedora trabalha sem ventilação e com o SLCS Ligado.

Analisando o consumo total por meio desses indicativos, verifica-se que a melhor solução é trabalhar com a colhedora totalmente ventilada e o SLCS

Desligado. A diferença para o pior caso chega ao final da safra à aproximadamente R\$ 1.040.000,00.

A partir do consumo total de energia necessário para o funcionamento da usina (eq. 4.45) e a geração total energia (eq. 4.42), encontra-se a exportação total de energia (eq. 4.46). Estes dados são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Geração total e exportação de energia por safra em MWh / safra (Caso 1).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Geração Total de Energia	Exportação de Energia
SLCS Ligado	Ventilada	187.904	140.497
	Parcialmente Ventilada	216.660	166.124
	Sem Ventilação	258.832	203.710
SLCS Desligado	Ventilada	182.592	136.131
	Parcialmente Ventilada	203.372	154.130
	Sem Ventilação	233.863	180.528
Colheita Manual (Queimada)		168.734	124.132

Como pode ser analisada na Tabela 19 a geração de energia aumenta com uma maior introdução de palha na indústria e, conseqüentemente, a quantidade de energia para exportação também aumenta. Assim, a Figura 5.1 apresenta a produção energética global (eq. 4.47) dos indicadores estudados. Pode-se observar que, quando a colhedora trabalha com sua eficiência de ventilação baixa, a geração de energia aumenta relacionado a quantidade de cana que entra na indústria, isso ocorre por ter uma maior quantidade de palha sendo queimada na caldeira sendo que seu PCI é quase o dobro do bagaço. A melhor eficiência de exportação de energia por quantidade de cana ($135 \text{ kW/t}_{\text{cana}}$) ocorre com o SLCS ligado e com a colhedora sem ventilação. A menor eficiência da indústria ocorre quando a colheita é totalmente manual através de queimada, devido a não utilização da palha como combustível suplementar para queima na caldeira, pois através das análises nota-se que o aproveitamento da palha melhora a produção energética.

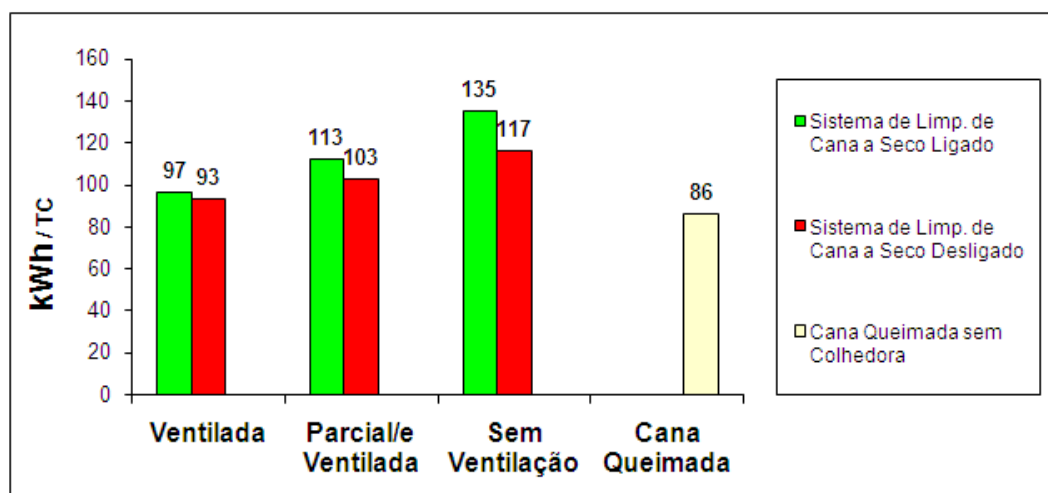


Figura 5.1 – Produção energética global para o Caso 1.

5.1.2 Resultados Econômicos

As Figuras 5.2 e 5.3 demonstram as perdas de ART para cada tipo de indicador estudado relacionado à produção de Álcool Hidratado e Anidro, respectivamente. A base para realizar esta análise é em cima da cana queimada, ou seja, quanto de produção de álcool se perde com a introdução da palha na indústria sucroalcooleira levando em consideração o *mix* de produção de álcool (30 % hidratado e 70 % anidro).

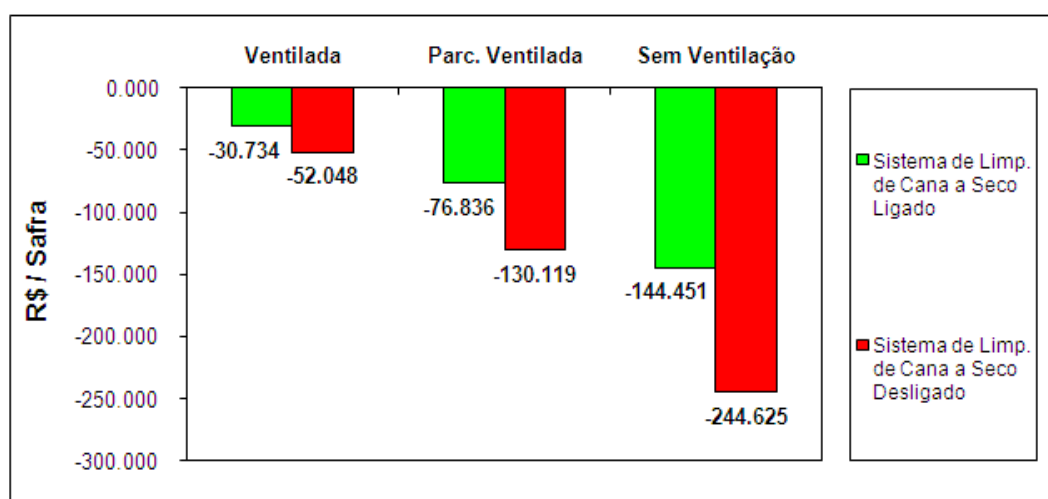


Figura 5.2 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 1).

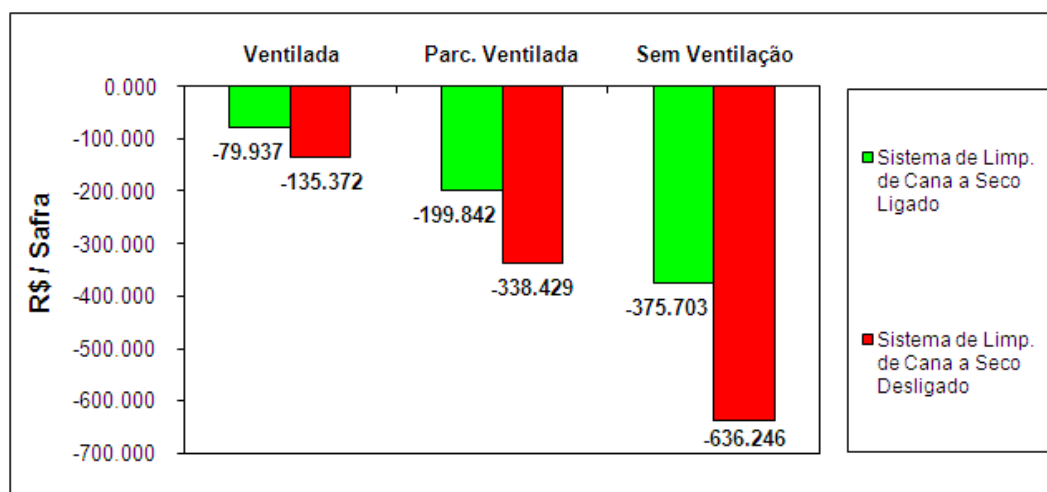


Figura 5.3 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 1).

Em ambas as Figuras 5.2 e 5.3, verifica-se que a maior perda de produção de álcool ocorre quando a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa, sendo que para álcool hidratado a maior perda é de R\$ 244.625,00 e para álcool anidro é de R\$ 636.246,00 por safra, resultando uma perda total de R\$ 880.871,00 por safra.

A Figura 5.4 apresenta a perda com a venda de energia (em R\$ / safra) que a usina possui quando ela realiza a queima da cana antes do corte deixando de utilizar a palha como combustível suplementar na caldeira. Pode-se observar que quando o SLCS está ligado, ocorre à maior perda na venda de energia, pois a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa (teoricamente, maior quantidade de palha na indústria), ou seja, a usina deixa de ganhar aproximadamente R\$ 9.549.405,00 por safra.

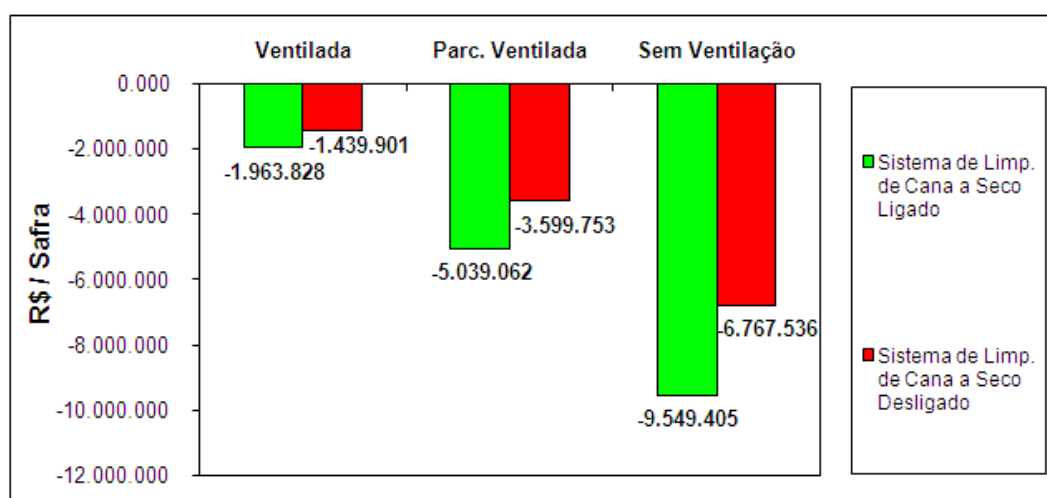


Figura 5.4 – Perdas de energia com a queima da palha no Caso 1 (Base cana queimada).

Desta forma, pode-se chegar a Figura 5.5, que representa a receita final da utilização da palha como combustível suplementar na caldeira, considerando-se a venda de energia através do acréscimo de palha queimado na caldeira (Figura 5.4), as respectivas perdas com a venda de álcool através do seqüestro de ART pela palha (Figura 5.2 e 5.3) e o custo do investimento total para a implantação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco para a primeira safra da usina (custo encontrado na Tabela 12).

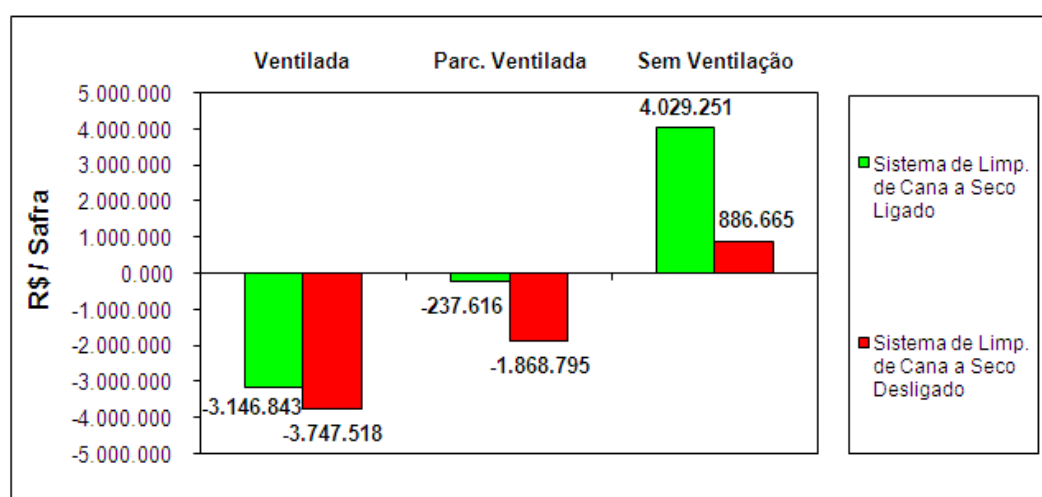


Figura 5.5 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra (Caso 1).

Observa-se que para a primeira safra a usina terá o maior déficit, próximo a R\$ 3.748.000,00, quando o SLCS está desligado e a colhedora trabalhando com sua eficiência máxima de limpeza de palha no campo, porém com o SLCS ligado e com uma maior quantidade de palha entrando na indústria a usina pode pagar o seu investimento com o sistema e ainda ter um superávit de aproximadamente R\$ 4.030.000,00.

A Figura 5.6 apresenta a rentabilidade da energia excedente exportada com a introdução da palha na caldeira em safras.

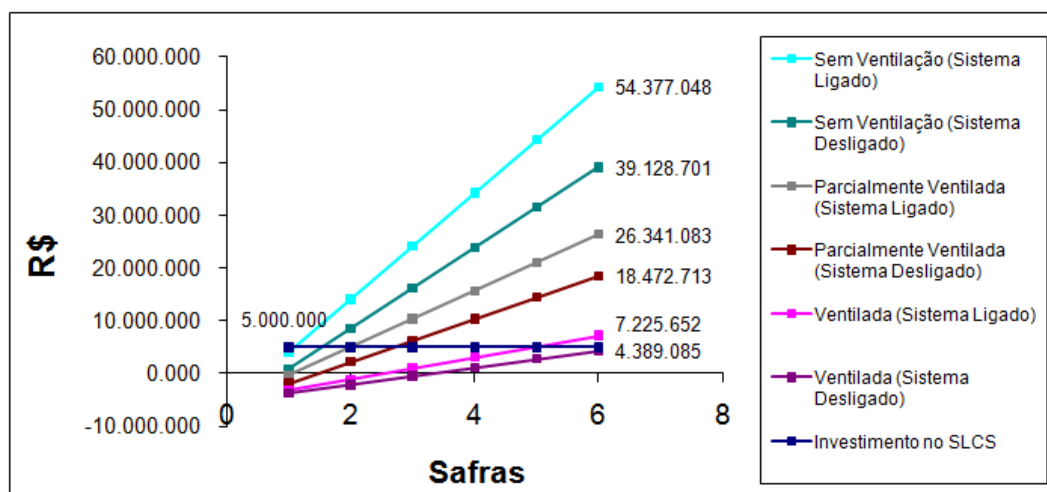


Figura 5.6 – Rentabilidade da energia excedente exportada no Caso 1 (Base cana queimada).

Quando as colhedoras trabalham com sua eficiência máxima de limpeza de palha no campo, sendo com o SLCS ligado ou desligado, a usina só irá conseguir pagar seus investimentos, considerando apenas a lucratividade da energia excedente exportada pelo acréscimo da palha, no decorrer do sexto ano de safra. Assim, pode-se dizer que, com uma maior introdução de palha na indústria, com equipamentos bem preparados para essa queima na caldeira, os lucros da usina podem ser bem altos, como no caso onde no final da sexta safra a usina terá uma receita de aproximadamente de R\$ 54.377.000,00 trabalhando com as colhedoras em baixa rotação de seu ventilador e o SLCS ligado.

Para incremento do primeiro caso estudado é adicionada uma comparação considerando que 100 % da colheita seja mecanizada, e, desta forma, pode-se estimar se ocorrerá uma melhora ou não na produção energética global da usina ($\text{kWh}/t_{\text{cana}}$), além de saber quanto a usina poderá gerar a mais de eletricidade em uma safra.

Como pode ser analisado na Figura 5.7, com 100 % da colheita mecanizada a quantidade de palha que entra na indústria é maior e, sendo assim, trabalhando com o SLCS a quantidade de palha preparada para a queima na caldeira também é maior, comprovando o que já havia sido comentado anteriormente que a queima da palha como combustível suplementar aumenta a produção energética global da usina, sendo que, com o SLCS ligado e considerando a colhedora Sem Ventilação, o aumento pode chegar a 22 % a mais na produção energética global comparada com apenas 60 % da colheita mecanizada.

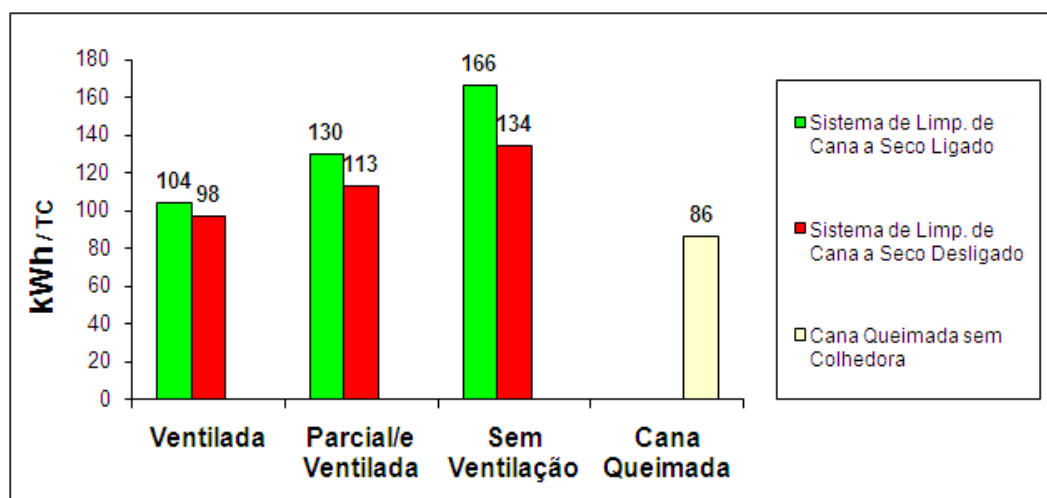


Figura 5.7 – Produção energética global no Caso 1 (100 % da colheita mecanizada).

Vale a pena comentar que, com esse aumento na mecanização da colheita, a receita final da usina com a introdução da palha, considerando apenas a exportação de energia, aumenta para todos os índices analisados, conforme mostra a Figura 5.8, sendo que, com o SLCS ligado e considerando a colhedora Sem Ventilação, o aumento pode chegar a 150 % a mais na receita, ou seja, aproximadamente R\$ 6.090.000,00.

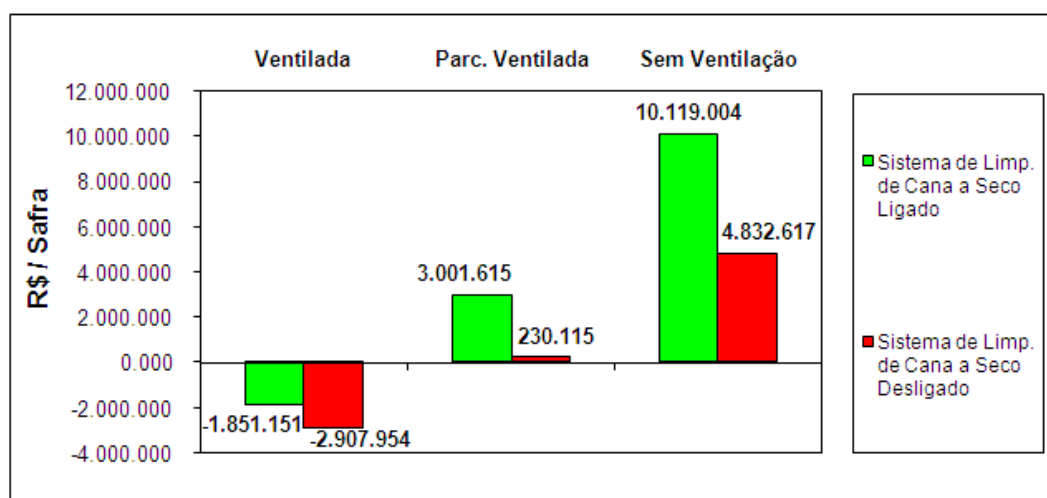


Figura 5.8 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra do Caso 1 (Base cana queimada – 100 % da colheita mecanizada).

5.2 Caso 2

No segundo caso estudado é considerada uma usina com uma moagem média de 4.750.000 toneladas de cana. Como já dito anteriormente, é considerada uma moagem média, pois a quantidade de cana que passa pelo Setor de Extração é diretamente ligada com a eficiência de ventilação das colhedoras.

Na safra de 2008/2009 a Usina Alta Mogiana (São Joaquim da Barra / SP) moeu uma quantidade bem próxima à analisada, tendo ficado em 9º lugar no *ranking* de produção da região centro-sul com uma moagem de aproximadamente 4.751.584 toneladas de cana. Sua produção de álcool anidro foi de 72.533 m³ e de hidratado 92.387 m³, sendo que a produção de açúcar chegou a 354.500 toneladas (UNICA, 2009).

O *mix* de produção considerada foi de 60 % para álcool, sendo deste total 60 % álcool hidratado e 40 % álcool anidro, e os outros 40 % para açúcar, sendo deste total 70 % açúcar VHP e 30 % açúcar branco. Os dados do SLCS (Sistema de Limpeza de Cana a Seco) foram obtidos através de fornecedores do sistema e os custos de venda de energia e de álcool da UNICA, sendo os custos líquidos de álcool uma média do valor recebido no ano de 2008 pelos produtores, sem contabilizar frete e impostos.

A Tabela 20 apresenta os dados de entrada necessários para início dos cálculos.

Tabela 20 – Dados de entrada para cálculos (Caso 2).

Dados da Cana de açúcar	
Porcentagem de Palha	12 %
Porcentagem de Cana Colmo	88 %
PCI Bagaço	7.243 kJ/kg
PCI Palha	12.905 kJ/kg
Fibra da Palha	85 %
% Fibra Colmo	12 %
% Fibra do Bagaço	47 %
% ART	16 %
% Caldo	71 %
% Bagaço (51% umidade)	26 %
Sistema de Lavagem de Cana a Seco	
Eficiência da Lavagem	63 %
Taxa de Utilização do Equipamento	65 %
Investimento	R\$ 5.000.000,00
Eficiência da Indústria	
Eficiência de Extração (Moenda)	97 %
Custos de Venda do Álcool e Energia	
Álcool Hidratado	R\$ 720,00 / m ³
Álcool Anidro	R\$ 840,00 / m ³
Açúcar Branco	R\$ 40,00 / sacas 50 kg
Açúcar VHP	R\$ 25,00 / sacas 50 kg
Energia	R\$ 120,00 / MW

Na Tabela 21 pode-se observar que com uma produtividade de 80 t/ha e uma área de plantio de aproximadamente 56.100 ha (eq. 4.3) a quantidade de cana disponível no canavial, incluindo a palha, é de 5.100.000 t.

Tabela 21 – Rendimento do canavial (Caso 2).

Rendimento do Canavial	
Área de plantio (ha)	56.100
Produtividade (t/ha)	80
Cana com palha (t)	5.100.000

De acordo com explicações anteriores as colhedoras de cana apresentam 3 tipos de variação na ventilação para a separação de palha já no campo (Tabela 7), sendo assim, considerando 80 % da colheita mecanizada e o restante manual através de queimadas (20 %), chega-se a um valor disponível no canavial de 4.980.000 toneladas de cana de açúcar a ser colhida, deste total cerca de 4.490.000 toneladas são referentes a colmo e 490.000 toneladas referentes a palha (ver Figura 4.1), considerando que 20 % da palha já foi queimada. Assim a Tabela 22 mostra a quantidade de cana (colmo + palha) que chega a indústria.

Tabela 22 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 2).

Colhedora de Cana (Ventilação)	Quantidade de Colmo e Palha
Ventilada	4.490.000 t_colmo
	97.920 t_palha
Parcialmente Ventilada	4.490.000 t_colmo
	244.800 t_palha
Sem Ventilação	4.490.000 t_colmo
	460.224 t_palha

Com a colhedora trabalhando sem ventilação aproximadamente 6 % da palha fica no campo, quase que 5 vezes mais de palha acaba entrando na indústria comparado com a colhedora trabalhando com sua potência máxima de ventilação, ou seja, 80% da palha ficando no campo.

Após a cana ser descarregada na Mesa Alimentadora que possui o Sistema de Limpeza de Cana a Seco (Figura 3.16) a quantidade de cana que chega ao setor de Preparo e Extração da indústria é mostrada na Tabela 23.

Tabela 23 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 2).

SLCS	Tipo de Ventilação	Colmo (t)	Palha (t)	Total (t)
Ligado	Ventilada	4.490.000	57.820	4.547.820
	Parcialmente Ventilada	4.490.000	144.554	4.634.554
	Sem Ventilação	4.490.000	271.762	4.761.762
Desligado	Ventilada	4.490.000	97.920	4.587.920
	Parcialmente Ventilada	4.490.000	244.800	4.734.800
	Sem Ventilação	4.490.000	460.224	4.950.224

A Tabela 23 apresenta a situação do SLCS Desligado como critério de comparação com uma usina que não possui este sistema. Comparando a quantidade de palha que segue para os setores de preparo e extração com a colhedora ventilada e sem ventilar podendo o SLCS estar Ligado ou Desligado observa-se que a diferença é elevada de impureza vegetal que adentra na indústria. Desta forma aumenta a possibilidade de paradas indústrias (buchas) no setor conseqüentemente diminuindo a eficiência industrial.

A Tabela 24 apresenta a quantidade de palha que é separada com o SLCS Ligado.

Tabela 24 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 2).

Tipo de Ventilação	Palha (t)
Ventilada	40.098
Parcialmente Ventilada	100.245
Sem Ventilação	188.461

De acordo com o tipo de sistema de ventilação das colhedoras e respectivamente as quantidades de cana moídas de acordo com a Tabela 23 obtêm-se as quantidades de bagaço apresentadas na Tabela 25, que são destinadas à queima na caldeira. Considera-se que a palha já esteja preparada para a devida queima em uma caldeira de alta pressão.

Tabela 25 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 2).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Bagaço Derivado da Moagem (t)	Palha Preparada para Queima (t)	Total (t)
SLCS Ligado	Ventilada	1.238.874	40.098	1.278.973
	Parcialmente Ventilada	1.325.607	100.245	1.425.853
	Sem Ventilação	1.452.815	188.461	1.641.272
SLCS Desligado	Ventilada	1.278.973	0,00	1.278.973
	Parcialmente Ventilada	1.425.853	0,00	1.425.853
	Sem Ventilação	1.641.272	0,00	1.641.272
Colheita Manual (Queimada)		1.181.053	0,00	1.181.053

Como pode ser observado na Tabela 24, a quantidade de combustível para queima na Caldeira é a mesma quando comparada o SLCS Ligado ou Desligado, mas o grande diferencial é que para o SLCS Ligado existe palha preparada com um PCI quase que o dobro comparado com o bagaço advindo do Setor de Moagem.

5.2.1 Resultados Termodinâmicos

Com um rendimento da caldeira de 86 %, a entalpia da água de alimentação da caldeira e do vapor gerado igual a 440 kJ/kg e 3.483 kJ/kg, respectivamente, e outros dados já informados anteriormente nas Tabelas 23, 24 e 25, chega-se aos consumos da moenda, interno do processo e do preparo da palha para queima na caldeira (em MWh / safra) apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 2).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Consumo Moenda	Consumo Extra Palha	Consumo Processo	Consumo Total
SLCS Ligado	Ventilada	68.187	9.088	136.374	213.651
	Parcialmente Ventilada	69.488	19.355	138.976	227.820
	Sem Ventilação	71.396	34.412	142.793	248.602
SLCS Desligado	Ventilada	68.788	4.632	137.578	210.998
	Parcialmente Ventilada	70.992	11.580	141.984	224.556
	Sem Ventilação	74.223	21.770	148.447	244.440
Colheita Manual (Queimada)		67.320	0	134.640	201.960

Como pode ser analisado na Tabela 26 o consumo da moenda não varia muito com a diferença no tipo de ventilação da colhedora.

O consumo do processo já apresenta certa variação no consumo de energia, diferentemente do primeiro caso estudado.

O consumo extra da palha que passa pelo processo de preparo para queima na caldeira aumenta conforme se diminui a eficiência de ventilação da colhedora,

ocorrendo um maior consumo quando a colhedora trabalha sem ventilação e com o SLCS Ligado, já no consumo total a maior diferença é de aproximadamente 4.160 MWh/safra (comparação entre SLCS Ligado e Desligado – Sem Ventilação), sem considerar a colheita manual, porém, no final da safra essa diferença pode corresponder a R\$ 500.000,00.

Analisando o consumo total por meio desses indicativos, verifica-se que a melhor solução é trabalhar com a colhedora totalmente ventilada e o SLCS Desligado, pois o consumo de energia da indústria é menor (210.998 MWh/safra), sendo que, assim, uma maior quantidade de energia pode ser exportada.

A partir do consumo total de energia (eq. 4.45) necessário para o funcionamento da usina e a geração total energia (eq. 4.42), encontra-se a exportação total de energia (eq. 4.46). Estes dados são apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Geração total e exportação de Energia MWh / safra (Caso 2).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Geração Total de Energia	Exportação de Energia
SLCS Ligado	Ventilada	633.327	419.677
	Parcialmente Ventilada	760.640	532.820
	Sem Ventilação	947.366	698.765
SLCS Desligado	Ventilada	609.643	398.645
	Parcialmente Ventilada	701.430	476.874
	Sem Ventilação	836.050	591.610
Colheita Manual (Queimada)		548.452	346.492

Como pode ser visto na Tabela 27, a geração de energia aumenta com a maior introdução de palha na indústria e, conseqüentemente, a exportação de energia também aumenta. Assim, a Figura 5.9 apresenta a produção energética global (eq. 4.47) dos indicadores estudados. Pode-se observar que, quando a colhedora trabalha com sua eficiência de ventilação baixa (Sem Ventilação), a geração de energia aumenta com relação à quantidade de cana que entra na indústria, isso ocorre por ter uma maior quantidade de palha preparada sendo queimada na caldeira com PCI que é quase o dobro do bagaço, obtendo-se, assim, uma melhor eficiência de exportação de energia por quantidade de cana ($147 \text{ kW/t}_{\text{cana}}$). Portanto, sem a utilização da palha, tem-se que a menor eficiência

global ocorre quando a colheita é totalmente manual através de queimadas na lavoura ($77 \text{ kWh/t}_{\text{cana}}$).

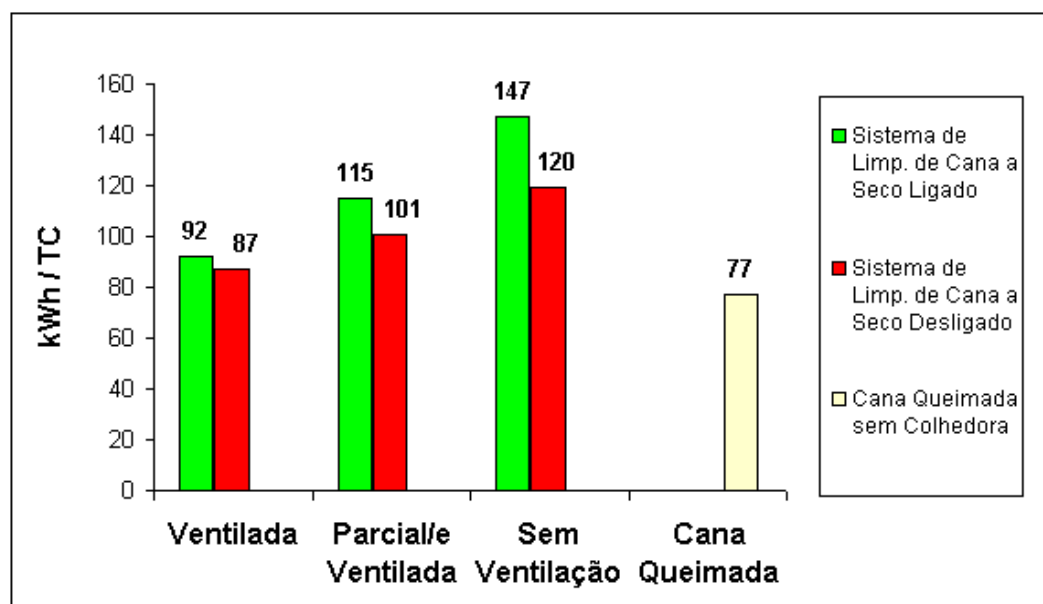


Figura 5.9 – Produção energética global para o Caso 2.

Comparando os resultados obtidos na Figura 5.9 com os da Figura 5.1 (Caso 1 – pag. 100), na situação na qual a colhedora opera com sua ventilação de limpeza de palha Parcialmente Ventilada, a diferença na produção energética global é muito pequena ($2 \text{ kWh/t}_{\text{cana}}$), sendo indiferente o SLCS Ligado ou Desligado. Isso ocorre devido à quantidade de palha que fica no campo e que entra na indústria ser praticamente a mesma e a eficiência ser calculada com base na moagem da usina (eq. 4.47). A maior diferença ocorre quando o SLCS está ligado e a colhedora opera no modo Sem Ventilação ($12 \text{ kWh/t}_{\text{cana}}$).

5.2.2 Resultados Econômicos

As Figuras 5.10 e 5.11 demonstram as perdas de ART para cada tipo de indicador estudado relacionado à produção de álcool hidratado e anidro, respectivamente. A base para realizar esta análise é a cana queimada, ou seja, quanto de produção de álcool se perde com a introdução da palha na indústria

sucroalcooleira levando em consideração o *mix* de produção de álcool (60 % hidratado e 40 % anidro).

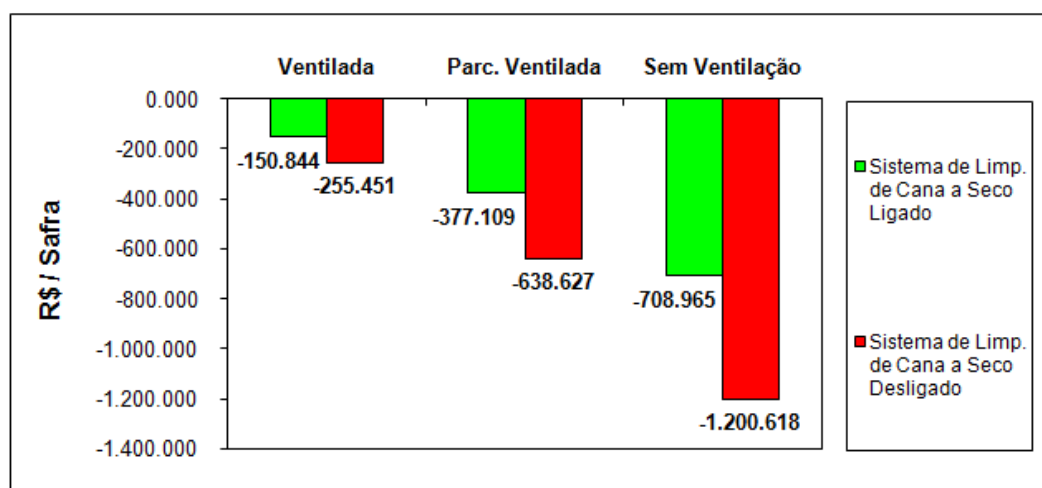


Figura 5.10 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 2).

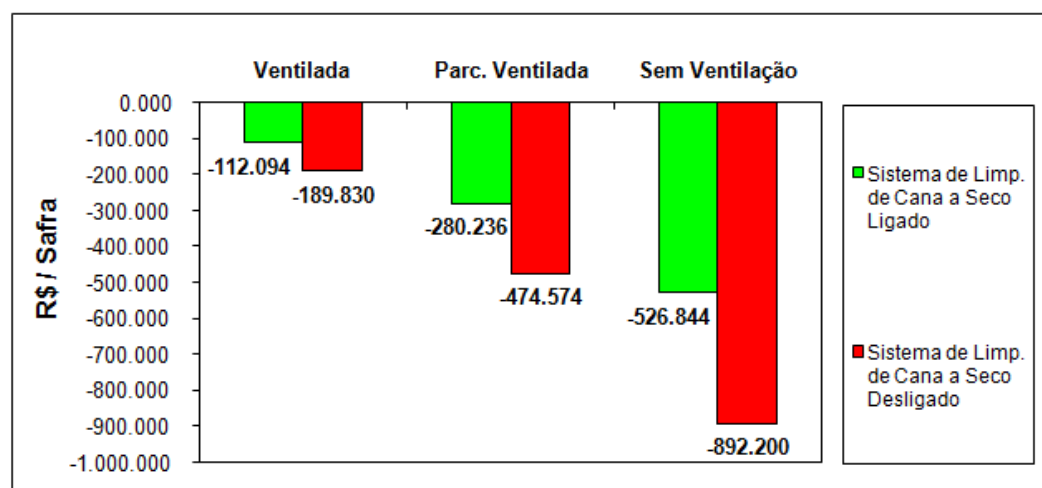


Figura 5.11 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 2).

Em ambas as Figuras 5.10 e 5.11, a maior perda de produção de álcool ocorre quando a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa, sendo que para álcool hidratado a maior perda é de R\$ 1.200.618,00, ou seja, deixam de ser produzidos aproximadamente 1.670 m³ de álcool hidratado por safra. Por outro lado, mantida a proporção, deixam de ser produzidos 1.060 m³ de álcool anidro, o que equivale a uma perda de R\$ 892.200,00 por safra. Assim, é contabilizada uma perda total de R\$ 2.092.818,00 na produção de álcool. Observa-se que, mesmo sendo o

preço do álcool anidro para venda maior que o do hidratado, a perda (R\$) é menor com o seqüestro de ART pela palha que passa pela moenda devido ao *mix* de produção ser muito mais voltado para a produção de álcool hidratado.

As Figuras 5.12 e 5.13 demonstram as perdas de ART para cada tipo de indicador estudado relacionado à produção de açúcar branco e VHP, respectivamente. A base para realizar este análise também é a cana queimada, ou seja, quanto de produção de açúcar se perde com a introdução da palha na indústria levando em consideração o *mix* de produção de açúcar (30 % Branco e 70 % VHP).

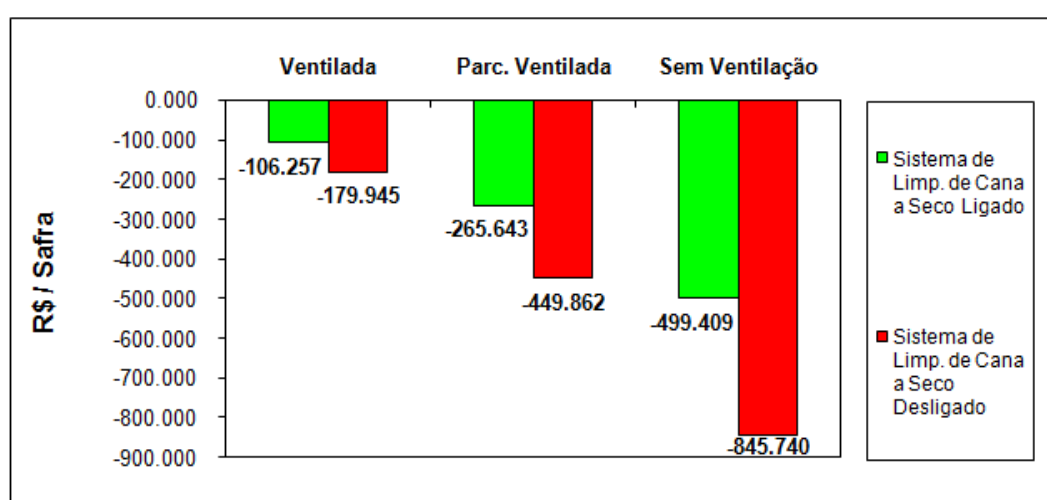


Figura 5.12 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar branco (Caso 2).

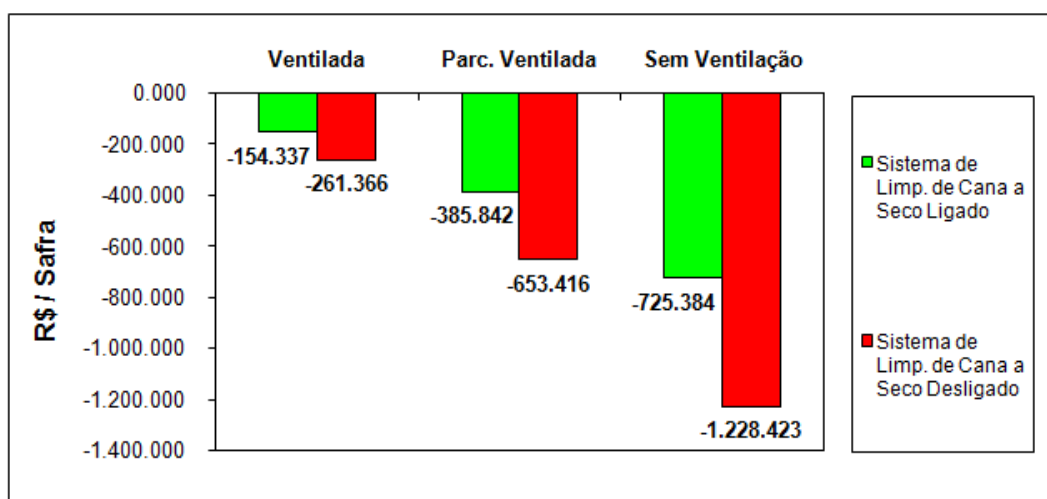


Figura 5.13 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar VHP (Caso 2).

Em ambas as Figuras 5.12 e 5.13, a maior perda de produção de açúcar ocorre quando a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa, sendo que para

açúcar branco a maior perda é de R\$ 845.740,00, que representa aproximadamente 21.143 sacas de 50 kg, e para açúcar VHP, 49.143 sacas de 50 kg, ou seja, R\$ 1.228.423,00 por safra totalizando uma perda de R\$ 2.074.163,00. Observa-se que a perda total tanto para álcool como para açúcar são bem próximas, com uma diferença de aproximadamente R\$ 18.655,00 apenas.

A Figura 5.14 apresenta a perda com a venda de energia (em R\$ / safra) que a usina possui quando ela realiza a queima da cana antes do corte deixando de utilizar a palha como combustível suplementar na caldeira.

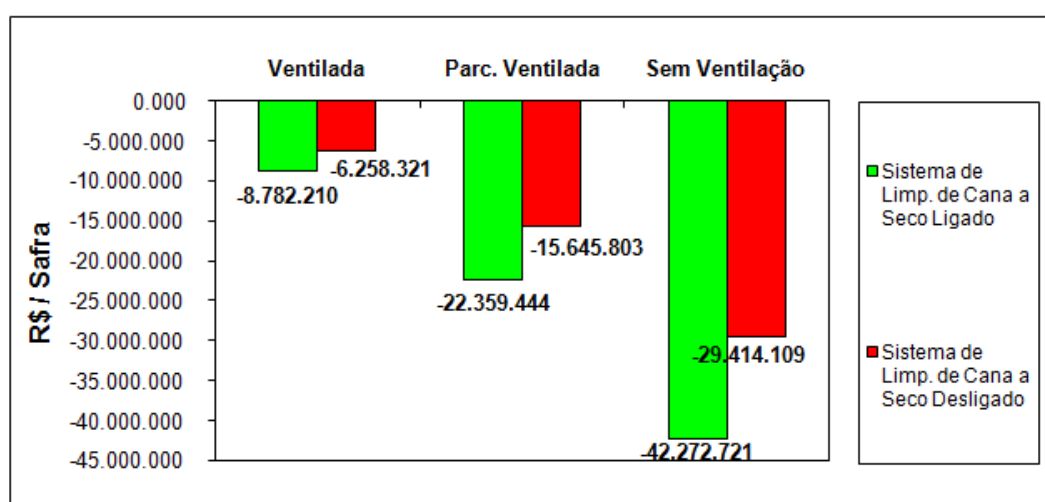


Figura 5.14 – Perdas de energia com a queima da palha (Caso 2).

Pode-se observar na Figura 5.14 que, quando o SLCS está ligado, ocorre a maior perda na venda de energia, além disso, com a eficiência de ventilação das colhedoras baixa (teoricamente, maior quantidade de palha na indústria), a usina deixa de ganhar aproximadamente R\$ 42.272.721,00 por safra, o que significa uma receita muito maior que a de muitas usinas sucroalcooleiras brasileiras.

Desta forma pode-se chegar a Figura 5.15, que representa a receita final da utilização da palha como combustível suplementar na caldeira. Para chegar a este gráfico foi considerada a venda de energia através do acréscimo de palha queimado na caldeira, as respectivas perdas com a venda de álcool e açúcar através do seqüestro de ART pela palha (Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13) e o custo do investimento total para a implantação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco para a primeira safra da usina (custo encontrado na Tabela 12).

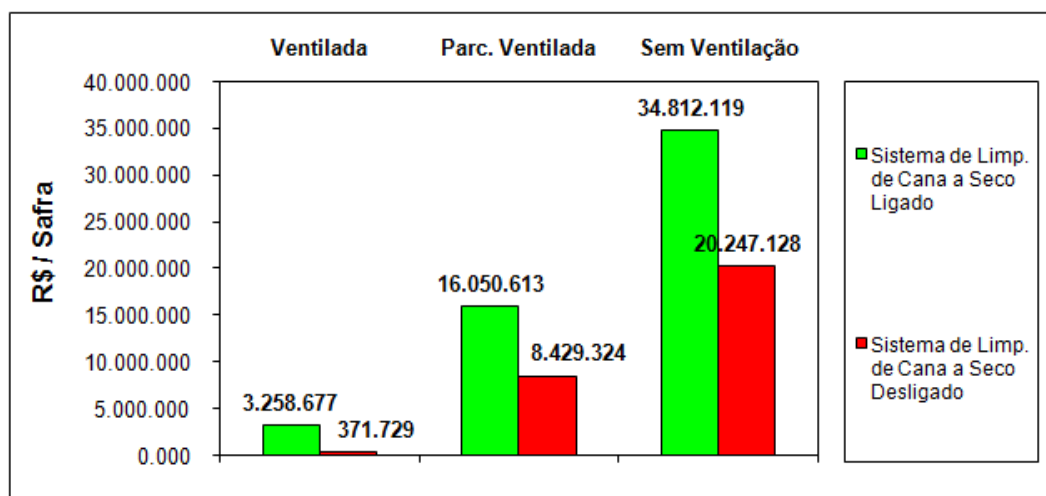


Figura 5.15 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra (Caso 2).

Observa-se na Figura 5.15 que, para a primeira safra, a usina terá lucratividade em todos os índices analisados, sendo o maior deles com o SLCS ligado e com uma maior quantidade de palha entrando na indústria utilizando para queima na Caldeira a usina pode pagar o seu investimento com o sistema e ainda ter um superávit de aproximadamente R\$ 34.812.000,00.

A Figura 5.16 apresenta a rentabilidade da energia excedente exportada com a introdução da palha na caldeira em safras.

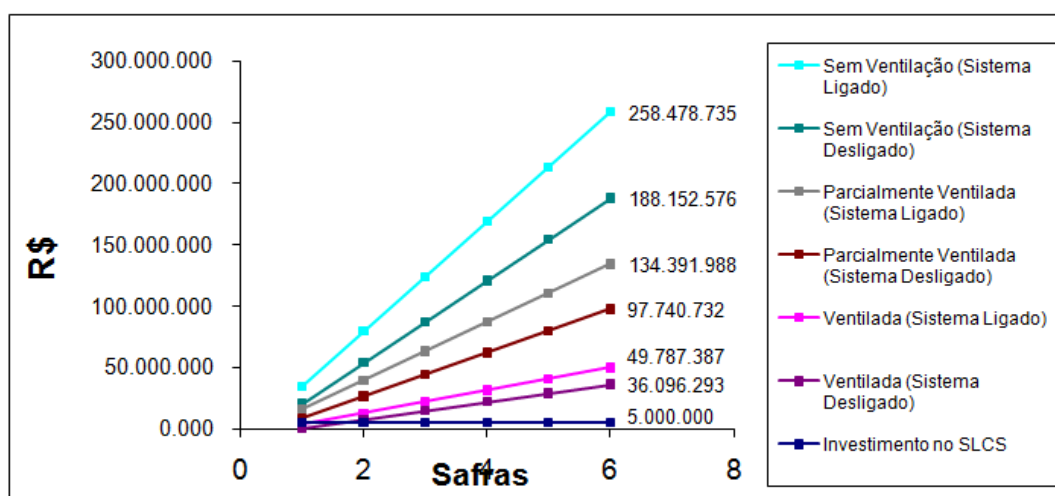


Figura 5.16 – Rentabilidade da energia excedente exportada no Caso 2 (Base cana queimada).

Como pode ser observado na Figura 5.16, a partir da segunda safra a usina já terá quitado o investimento realizado com o Sistema de Limpeza de Cana a Seco

para todos os índices analisados, sendo que até a sexta safra o superávit pode chegar próximo a R\$ 260.000.000,00.

Para incremento do segundo caso estudado é adicionada uma comparação considerando que apenas 20 % da colheita é mecanizada, sendo que, desta forma, pode-se estimar se ocorrerá uma melhora ou não na produção energética global da usina ($\text{kWh}/t_{\text{cana}}$), além de comparar o quanto a usina deixa de ganhar com a queima prévia da palha no campo.

Como pode ser analisado na Figura 5.17, com 20 % da colheita mecanizada, a quantidade de palha que entra na indústria é menor e, conseqüentemente, trabalhando com o SLCS a quantidade de palha preparada para a queima na Caldeira também é menor, sendo que a usina no melhor dos seus casos sai de $147 \text{ kWh}/t_{\text{cana}}$ para $95 \text{ kWh}/t_{\text{cana}}$ (SLCS Ligado – Sem Ventilação), ou seja, um decréscimo de aproximadamente 65 % na produção energética global comparada com 80% da colheita mecanizada.

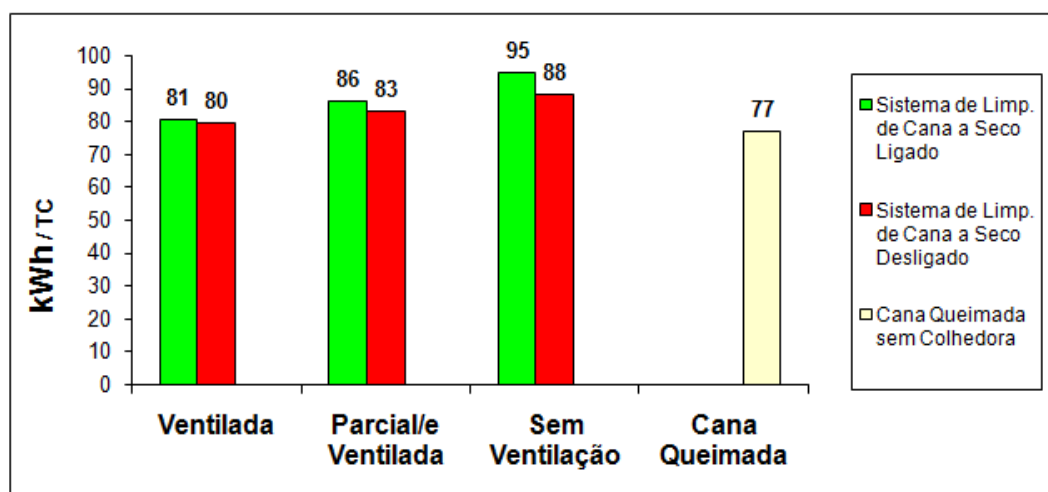


Figura 5.17 – Produção energética global no Caso 2 (100% da colheita mecanizada).

Vale a pena comentar que, com essa diminuição na mecanização da colheita, a receita final da usina com a introdução da palha, considerando apenas a exportação de energia, diminui para todos os índices analisados sendo que, com o SLCS ligado e considerando a colhedora Sem Ventilação, a redução pode chegar a aproximadamente R\$ 30.000.000,00.

Isso prova que investimentos em equipamentos que conseguem utilizar a palha como combustível suplementar em caldeiras de bagaço contribuem para a usina ter uma maior receita no final da safra.

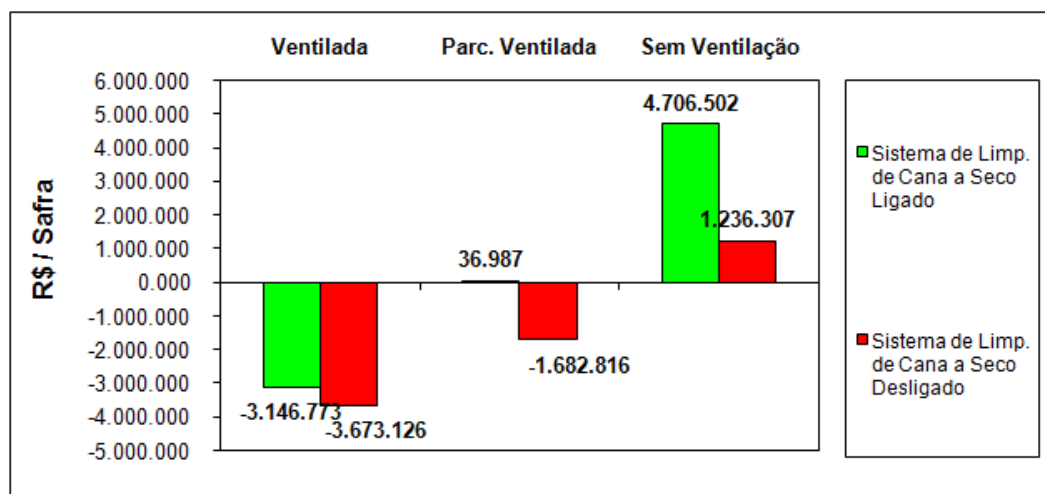


Figura 5.18 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra no Caso 2 (Base cana queimada – 100% da colheita mecanizada).

5.3 Caso 3

No terceiro e último caso estudado é analisado um caso real para a possibilidade de utilização da palha como combustível suplementar na caldeira de alta pressão da Usina Pioneiros Bioenergia S/A, sendo que os dados necessários para os cálculos foram extraídos da safra 2008/2009.

Nesta safra, a moagem da referida usina foi de 1.817.674 toneladas de cana, tendo com isso ficado em 83º lugar no *ranking* de produção da região centro-sul, sendo que sua produção de álcool anidro e hidratado foram, respectivamente, 37.120 m³ e 61.196 m³, e a produção de açúcar chegou a 114.472 toneladas (UNICA, 2009).

O *mix* de produção foi de 58,6 % para álcool (63 % hidratado e 37 % anidro) e os outros 41,4 % para açúcar (87 % VHP, já que a usina possui um sistema de descarregamento e transporte do VHP via fluvial economizando em transporte terrestre, e 13 % açúcar branco).

Os dados do SLCS (Sistema de Limpeza de Cana a Seco) foram obtidos através de fornecedores do sistema e os custos de venda de energia e de álcool através da UNICA, sendo os custos líquidos de álcool uma média dos valores recebidos pelos produtores no ano de 2008, sem contabilizar frete e impostos.

A Tabela 28 apresenta os dados de entrada necessários para início dos cálculos.

Tabela 28 – Dados de entrada para cálculos (Caso 3).

Dados da Cana de açúcar	
Porcentagem de Palha	10,38 %
Porcentagem de Cana Colmo	89,62 %
PCI Bagaço	7.243,00 kJ/kg
PCI Palha	12.905,00 kJ/kg
Fibra da Palha	85 %
% Fibra Colmo	13,10 %
% Fibra do Bagaço	48,14 %
% ART	15,40 %
% Caldo	71,50 %
% Bagaço (51 % umidade)	27,21 %
Sistema de Lavagem de Cana a Seco	
Eficiência da Lavagem	63 %
Taxa de Utilização do Equipamento	65 %
Investimento	R\$ 5.000.000,00
Eficiência da Indústria	
Eficiência de Extração (Moenda)	96,80 %
Custos de Venda do Álcool, Açúcar e Energia	
Álcool Hidratado	R\$ 720,00 / m ³
Álcool Anidro	R\$ 840,00 / m ³
Açúcar Branco	R\$ 40,00 / sacas 50 kg
Açúcar VHP	R\$ 25,00 / sacas 50 kg
Energia	R\$ 115,00 / MW

Na Tabela 29 pode-se observar que, com uma produtividade de 80 t/ha e uma área de plantio de aproximadamente 21.570 ha (eq. 4.3), a quantidade de cana disponível no canavial, incluindo a palha, é de 1.925.000 t.

Tabela 29 – Rendimento do canavial (Caso 3).

Rendimento do Canavial	
Área de plantio (ha)	21.570
Produtividade (t/ha)	80
Cana com palha (t)	1.925.000

De acordo explicações anteriores, as colhedoras de cana apresentam 3 tipos de variação na ventilação para a separação de palha no campo, sendo assim, considerando 45 % da colheita mecanizada e o restante manual através de queimadas (55 %), chega-se a um valor disponível no canavial de 1.815.000 toneladas de cana de açúcar a ser colhida, deste total cerca de 1.725.185 toneladas são referentes a colmo e 89.815 toneladas referentes a palha (ver Figura 4.1.), considerando que 55 % da palha já foi queimado. Assim, a Tabela 30 mostra a quantidade de cana (colmo + palha) que chega a indústria.

Tabela 30 – Quantidade de cana entrando na indústria (Caso 3).

Colhedora de Cana (Ventilação)	Quantidade de Colmo e Palha
Ventilada	1.725.185 t_colmo
	17.980 t_palha
Parcialmente Ventilada	1.725.185 t_colmo
	44.960 t_palha
Sem Ventilação	1.725.185 t_colmo
	84.520 t_palha

Com a colhedora trabalhando sem ventilação, aproximadamente 6% da palha fica no campo, quase que 5 vezes mais de palha acaba entrando na indústria comparado com a colhedora trabalhando com sua potência máxima de ventilação, ou seja, 80% da palha fica no campo.

Após a cana ser descarregada na Mesa Alimentadora que possui o Sistema de Limpeza de Cana a Seco (Figura 3.16) a quantidade de cana que chega ao setor de Preparo e Extração da indústria é dada na Tabela 31.

Tabela 31 – Quantidade de cana na entrada do setor de extração e moagem (Caso 3).

SLCS	Tipo de Ventilação	Colmo (t)	Palha (t)	Total (t)
Ligado	Ventilada	1.725.185	10.620	1.735.805
	Parcialmente Ventilada	1.725.185	26.550	1.751.735
	Sem Ventilação	1.725.185	49.910	1.775.095
Desligado	Ventilada	1.725.185	17.980	1.743.165
	Parcialmente Ventilada	1.725.185	44.960	1.770.145
	Sem Ventilação	1.725.185	84.520	1.809.705

A Tabela 31 apresenta a situação do SLCS Desligado, para poder comparar com uma usina que não possui este sistema. Comparando a quantidade de palha que segue para os setores de preparo e extração, com a colhedora ventilada e sem ventilar, podendo o SLCS estar Ligado ou Desligado, observa-se que a diferença de impureza vegetal que adentra na indústria é elevada. Desta forma, aumenta-se a possibilidade de paradas industriais (buchas) no setor, diminuindo, conseqüentemente, a eficiência da indústria.

A Tabela 32 apresenta a quantidade de palha que é separada com o SLCS Ligado.

Tabela 32 – Quantidade de palha separada pelo SLCS Ligado (Caso 3).

Tipo de Ventilação	Palha (t)
Ventilada	7.364
Parcialmente Ventilada	18.410
Sem Ventilação	34.611

De acordo com o tipo de sistema de ventilação das colhedoras e as respectivas quantidades de cana moídas, de acordo com a Tabela 31, obtêm-se as quantidades de bagaço apresentadas na Tabela 33, que são destinadas à queima na caldeira. Considera-se que a palha já esteja preparada para a devida queima em uma caldeira de alta pressão.

Tabela 33 – Quantidade de bagaço destinado à queima em uma caldeira de alta pressão (Caso 3).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Bagaço Derivado da Moagem (t)	Palha Preparada para Queima (t)	Total (t)
SLCS Ligado	Ventilada	480.082	7.364	487.446
	Parcialmente Ventilada	496.010	18.410	514.420
	Sem Ventilação	519.372	34.611	553.984
SLCS Desligado	Ventilada	487.446	0,00	487.446
	Parcialmente Ventilada	514.420	0,00	514.420
	Sem Ventilação	553.984	0,00	553.984
Colheita Manual (Queimada)		469.462	0,00	469.462

Como pode ser observado na Tabela 33, a quantidade de combustível para queima na caldeira é a mesma quando o SLCS está Ligado ou Desligado, mas o grande diferencial é que, para o SLCS Ligado, existe palha preparada com um PCI quase o dobro do bagaço advindo do setor de Moagem.

5.3.1 Resultados Termodinâmicos

Com um rendimento da caldeira de 86 %, a entalpia da água de alimentação da caldeira e do vapor gerado igual a 440 kJ/kg e 3.483 kJ/kg, respectivamente, e outros dados já informados anteriormente nas Tabelas 31, 32 e 33, chega-se aos consumos da moenda, interno do processo e do preparo da palha para queima na caldeira (em MWh / safra) apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 – Consumo da moenda e da palha em MWh / safra (Caso 3).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Consumo Moenda	Consumo Extra Palha	Consumo Processo	Consumo Total
SLCS Ligado	Ventilada	26.037	2.078	58.496	86.611
	Parcialmente Ventilada	26.275	3.902	59.033	89.210
	Sem Ventilação	26.626	6.576	59.820	93.022
SLCS Desligado	Ventilada	26.146	838	58.745	85.729
	Parcialmente Ventilada	26.552	2.096	59.654	88.302
	Sem Ventilação	27.145	3.942	60.987	92.074
Colheita Manual (Queimada)		25.877	0	58.138	84.015

Como pode ser analisado na Tabela 34, os consumos da moenda e do processo não variam muito com a diferença no tipo de ventilação da colhedora, sendo que a maior diferença no consumo total não ultrapassa 950 MWh/safra, sem considerar a colheita manual, porém, no final da safra, essa diferença pode corresponder a R\$ 109.250,00.

O consumo extra da palha que passa pelo processo de preparo para queima na caldeira aumenta conforme se diminui a eficiência de ventilação da colhedora, ocorrendo um maior consumo quando a colhedora trabalha sem ventilação e com o SLCS Ligado.

Analisando o consumo total por meio desses indicativos, nota-se que a melhor solução é trabalhar com a colhedora totalmente ventilada e o SLCS Desligado, pois o consumo de energia da indústria é menor. A diferença para o pior caso chega ao final da safra a aproximadamente R\$ 838.700,00.

A partir do consumo total de energia necessário para o funcionamento da usina (eq. 4.45) e a geração total energia (eq. 4.42), encontra-se a exportação total de energia (eq. 4.46). Estes dados são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 – Geração total e exportação de energia no Caso 3 (MWh / safra).

Tipo de Colheita	Tipo de Ventilação	Geração Total de Energia	Exportação de Energia
SLCS Ligado	Ventilada	236.964	150.352
	Parcialmente Ventilada	260.345	171.134
	Sem Ventilação	294.638	201.614
SLCS Desligado	Ventilada	232.614	146.883
	Parcialmente Ventilada	249.471	161.168
	Sem Ventilação	274.195	182.120
Colheita Manual (Queimada)		221.376	137.360

Como pode ser visto na Tabela 35, a geração de energia aumenta com a maior introdução de palha na indústria e, conseqüentemente, a exportação de energia também aumenta. Assim, a Figura 5.19 apresenta a produção energética global (eq. 4.47) dos indicadores estudados. Pode-se observar que, quando a colhedora trabalha com sua eficiência de ventilação baixa (Sem Ventilação), a geração de energia aumenta com o aumento da quantidade de cana que entra na indústria, isso ocorre por ter uma maior quantidade de palha preparada sendo queimada na caldeira sendo que seu PCI é quase o dobro do bagaço, obtendo-se, assim, uma melhor eficiência de exportação de energia por quantidade de cana ($114 \text{ kW}/t_{\text{cana}}$). A menor eficiência da indústria ocorre quando a colheita é totalmente

manual através de queimada da cana devido a não utilização da palha como combustível suplementar para queima na caldeira.

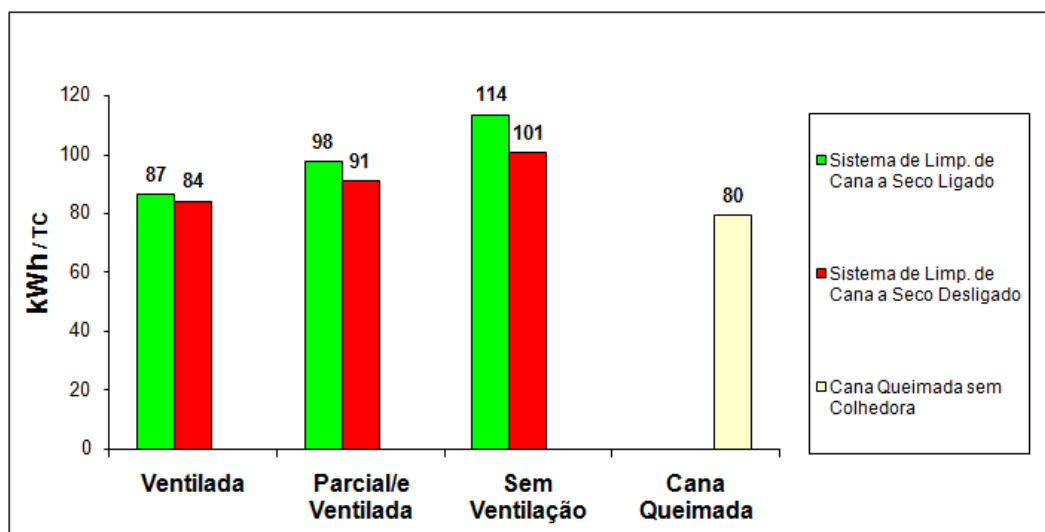


Figura 5.19 – Produção energética global para o Caso 3.

5.3.2 Resultados Econômicos

As Figuras 5.20 e 5.21 demonstram as perdas de ART para cada tipo de indicador estudado relacionado à produção de álcool hidratado e anidro, respectivamente. A base para realizar esta análise é a cana queimada, ou seja, quanto de produção de álcool se perde com a introdução da palha na indústria sucroalcooleira levando em consideração o *mix* de produção de álcool (63 % hidratado e 37 % anidro).

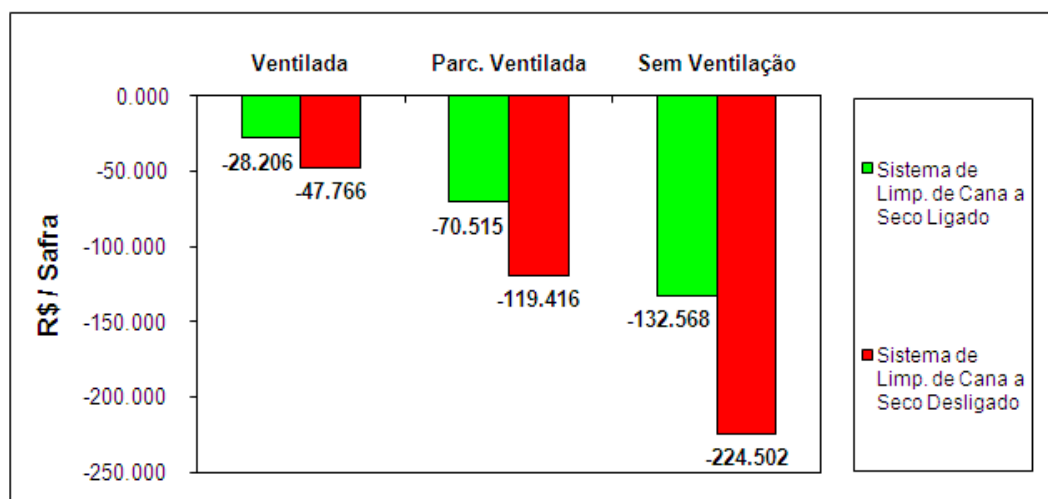


Figura 5.20 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool hidratado (Caso 3).

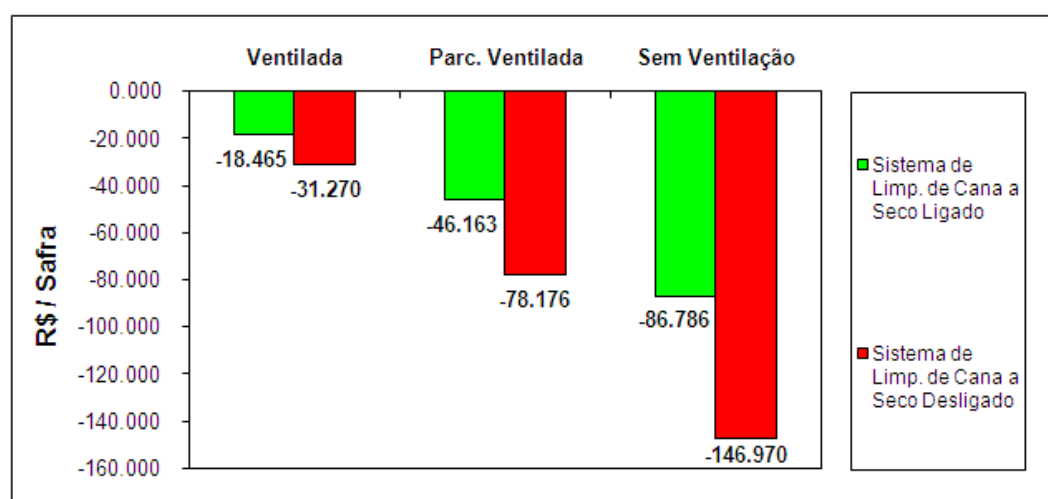


Figura 5.21 – Perdas de ART convertidas em perdas de álcool anidro (Caso 3).

Em ambas as Figuras 5.20 e 5.21, a maior perda de produção de álcool ocorre quando a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa, sendo que para álcool hidratado a maior perda é de R\$ 224.502,00 e para álcool anidro é de R\$ 146.970,00 por safra totalizando numa perda de R\$ 371.472,00 por safra. Observa-se que, mesmo sendo o preço do álcool anidro para venda maior que o do hidratado, a perda (R\$) é menor com o seqüestro de ART pela palha que passa pela moenda devido ao *mix* de produção ser mais voltado para a produção de álcool hidratado.

As Figuras 5.22 e 5.23 demonstram as perdas de ART para cada tipo de indicador estudado relacionado à produção de açúcar branco e VHP, respectivamente. A base para realizar este análise também é a cana queimada, ou

seja, quanto de produção de açúcar se perde com a introdução da palha na indústria levando em consideração o *mix* de produção de açúcar (13 % Branco e 87 % VHP).

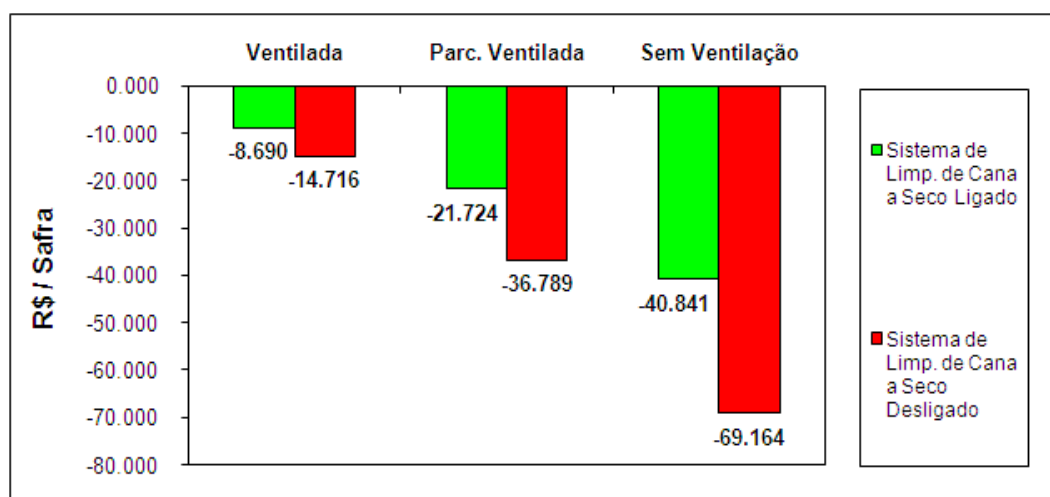


Figura 5.22 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar branco (Caso 3).

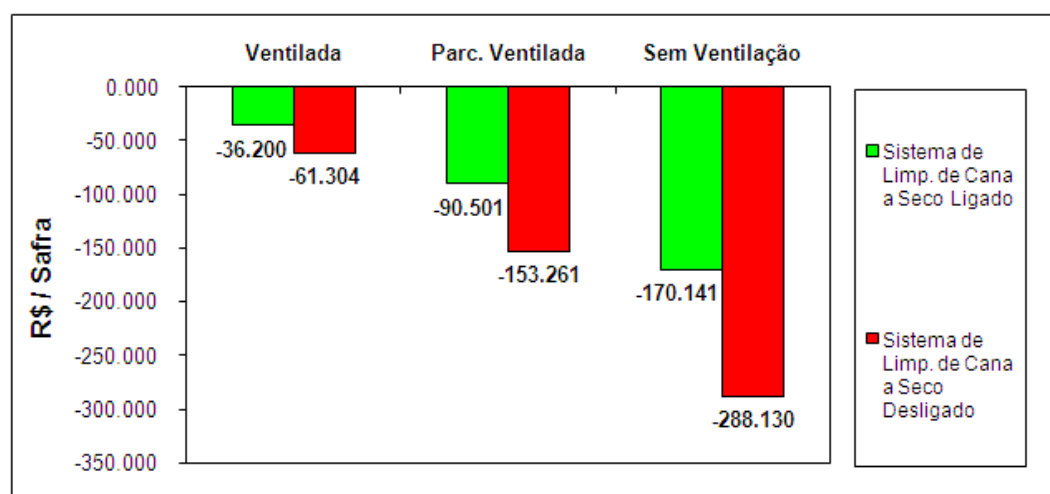


Figura 5.23 – Perdas de ART convertidas em perdas de açúcar VHP (Caso 3).

Em ambas as Figuras 5.22 e 5.23, a maior perda de produção de açúcar ocorre quando a eficiência de ventilação das colhedoras é baixa, sendo que para açúcar branco a maior perda é de R\$ 69.164,00 e para açúcar VHP é de R\$ 288.130,00 por safra, totalizando uma perda de R\$ 357.294,00 por safra. Observa-se que a perda total, tanto para álcool como para açúcar, são bem próximas, com uma diferença de aproximadamente R\$ 14.000,00, porém a tendência para a safra de 2009/2010 é de um *mix* de produção voltado mais para o açúcar, já que o preço no mercado externo está bem melhor do que na safra passada, sem contar com a queda de exportação do álcool combustível.

A Figura 5.24 apresenta a perda com a venda de energia (em R\$ / safra) que a usina possui quando ela realiza a queima da cana antes do corte, deixando de utilizar a palha como combustível suplementar na caldeira. Pode-se observar que, quando o SLCS está ligado, ocorre a maior perda na venda de energia, além disso, com a eficiência de ventilação das colhedoras baixa (teoricamente, maior quantidade de palha na indústria), a usina deixa de ganhar aproximadamente R\$ 7.390.000,00 por safra.

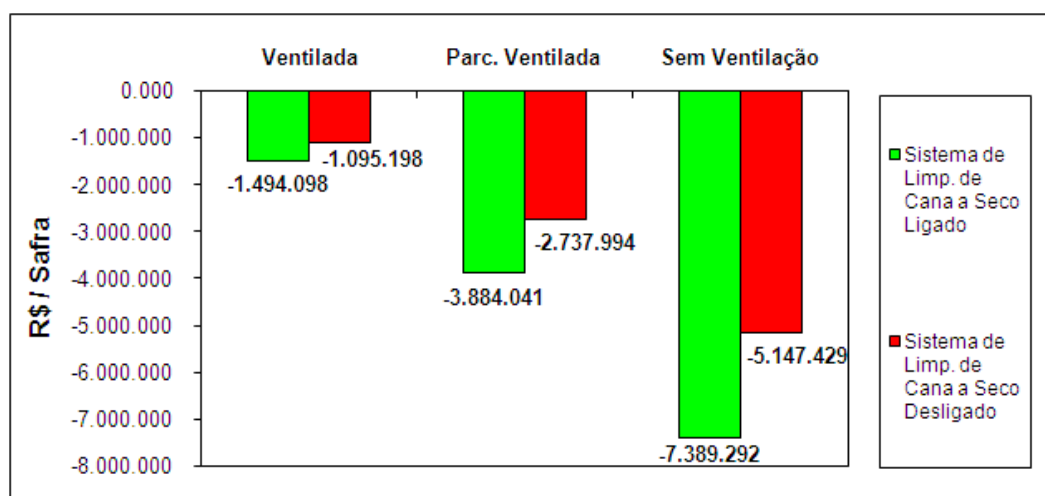


Figura 5.24 – Perdas de energia com a queima da palha (Caso 3).

Desta forma pode-se chegar a Figura 5.25, que representa a receita final da utilização da palha como combustível suplementar na caldeira. Para chegar a este gráfico foi considerada a venda de energia através do acréscimo de palha queimado na caldeira, as respectivas perdas com a venda de álcool e açúcar através do seqüestro de ART pela palha (Figura 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23) e o custo do investimento total para a implantação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco para a primeira safra da usina (custo encontrado na Tabela 12).

Observa-se na Figura 5.25 que, para a primeira safra, a usina terá o maior déficit, próximo a R\$ 4.060.000,00 quando o SLCS está desligado e a colhedora trabalhando com sua eficiência máxima de limpeza de palha no campo, porém com o SLCS ligado e com uma maior quantidade de palha entrando na indústria para queima na caldeira, a usina pode pagar o investimento com o sistema e ainda ter um superávit de aproximadamente R\$ 1.960.000,00.

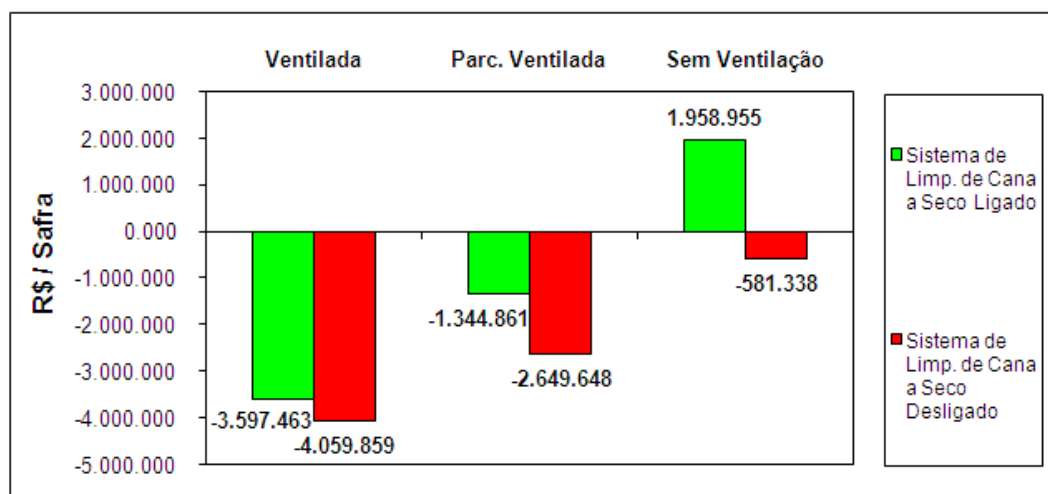


Figura 5.25 – Receita final com a venda de energia excedente na primeira safra (Caso 3).

A Figura 5.26 apresenta a rentabilidade da energia excedente exportada com a introdução da palha para queima na caldeira em safras.

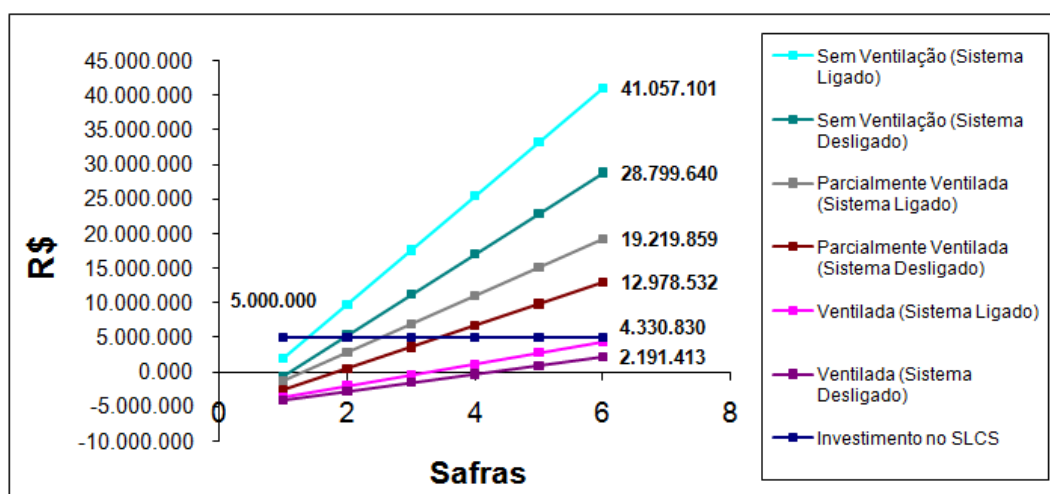


Figura 5.26 – Rentabilidade da energia excedente exportada (Caso 3).

Portanto, como pode ser observado nos dados analisados, a utilização da palha como combustível suplementar em caldeiras de alta pressão a bagaço pode ser financeiramente vantajosa para a empresa, aumentando consideravelmente a receita final da usina, além gerar uma energia limpa e renovável, colaborando para suprir eventuais déficits de energia no Brasil.

5.4 Tabela Comparativa entre os Casos

Na Tabela 36 são apresentados os dados comparativos dos principais índices analisados em cada um dos casos considerados.

Tabela 36 – Comparação entre os casos analisados.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Área de Plantio (ha)	16.000	56.100	21.570
Moagem de Cana (t)	1.500.000	4.750.000	1.800.000
Colheita Mecanizada (%)	60	80	45
Geração de Energia (MWh/safra) - melhor situação	258.832	947.366	294.638
Exportação de Energia (MWh/safra) - melhor situação	203.710	698.765	201.614
Produção Energética Global (kWh/tc) - melhor situação	135	147	114
Receita Final (R\$) - melhor situação	4.030.000	34.800.000	1.960.000

Como pode ser observado na Tabela 36, a melhor receita final (R\$) nem sempre é relativa à maior moagem da usina. Por exemplo, o Caso 1, mesmo com uma moagem menor que a do Caso 3, apresenta uma receita final mais que o dobro. Isso ocorre devido a porcentagem de colheita mecanizada ser maior e, conseqüentemente, uma maior quantidade de palha é transportada para a indústria e aproveitada como combustível suplementar na Caldeira de alta pressão e, assim, a quantidade de energia comercializada também é maior, gerando uma maior receita.

6 Conclusões

Neste trabalho foi analisada a possibilidade de utilização da palha como combustível suplementar em Caldeiras de Alta Pressão a bagaço com turbinas de extração-condensação, sendo a planta industrial totalmente eletrificada proporcionando um aumento da geração de energia e a possibilidade de exportação da mesma. Os estudos foram feitos com base em duas plantas hipotéticas (Casos 1 e 2) e um caso real da usina Pioneiros Bioenergia S/A (Caso 3). Foram consideradas variações na quantidade de cana de açúcar moída, produção de álcool e/ou açúcar, porcentagem de mecanização da colheita, utilização ou não do Sistema de Limpeza de Cana a Seco, entre outros parâmetros. Através de análises termodinâmicas da geração de energia, produção de álcool e açúcar e investimentos com equipamentos, foram obtidos resultados do ganho financeiro (R\$) com a adição da palha para queima na caldeira.

Foi verificado que o uso da palha como combustível complementar ao bagaço em caldeiras de alta pressão convencionais é uma boa opção para aumentar a geração de energia na usina. Porém, pode ocorrer um problema operacional com a introdução da palha, pois dentro da caldeira o processo ocorre com uma pressão negativa devido à entrada de ar através dos ventiladores (pressão positiva) e a saída de ar (gases de exaustão) pela chaminé através dos exaustores (pressão negativa). A saída dos gases de exaustão passa entre tubos em um local chamado de Pré-Ar e aquece o ar atmosférico que entra na caldeira (fornalha) pelos ventiladores, onde ocorre a queima do bagaço e da palha. Devido a essa pressão negativa para liberar esses gases de exaustão, parte da palha é sugada para dentro do conjunto de Pré-Ar, onde acaba entrando em combustão e queimando tubulações e chapas. Este mesmo tipo de problema ocorre quando a umidade do bagaço está alta, pois nesta situação também é necessária uma maior quantidade de ar para combustão e, conseqüentemente, uma maior exaustão dos gases, aumentando a pressão negativa dentro da caldeira e facilitando, desta forma, a ida do bagaço para a área do Pré-Ar. No entanto, em ambos os casos este problema pode ser evitado com operadores de caldeiras bem treinados. De qualquer maneira, é recomendável que as caldeiras convencionais a bagaço passem por algumas modificações para que

possam utilizar a palha como combustível suplementar e, desse modo, possa ser incrementada a geração de energia elétrica, inclusive no período de entressafra, sem que seja prejudicada sua operação durante o período de safra.

Por fim, verifica-se que o bagaço, antes resíduo inconveniente devido a dificuldade de armazenamento, e agora a palha, estão se tornando opções de lucratividade para as usinas, além de serem uma opção para solução de problemas de falta de energia, como ocorrido em 2001 (“apagão”) e, mais recentemente, com a crise do gás natural.

Embora tenha sido mostrado neste trabalho que o aproveitamento da palha é viável e aumenta consideravelmente a produção de energia elétrica, devem ser buscadas tecnologias ainda mais avançadas, ainda em desenvolvimento, que permitam um melhor aproveitamento energético do combustível. Como exemplos disso, podem ser citados a gaseificação da biomassa da cana de açúcar e até mesmo o uso do gás natural como combustível complementar (*co-firing*) para elevar o poder calorífico do gás combustível resultante da gaseificação, aumentando, assim, o potencial para geração de energia. Além dessas opções, existe ainda a possibilidade do aproveitamento da ponta da cana e do bagaço para fabricação de ração para ruminantes, desde que seja removida a sua toxicidade. Vale destacar que várias dessas opções têm ainda que passar por uma análise de viabilidade técnica-econômica, antes da implantação.

Como proposta de incremento deste trabalho podem ser inseridas técnicas de enfardamento da palha e o custo de transporte, mas isso deve ser objeto de estudos futuros a serem conduzidos no Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia (NUPLEN) da Faculdade de Engenharia da UNESP de Ilha Solteira.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, J. S. **Código computacional para análise de cogeração com turbinas a gás**. 1999. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1999.

BALEOTTI, L. O lixo que vira luz. **Revista AlcoolBras**, Sertãozinho, n. 113, 2008. Disponível em: <http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_113/mc_1.html>. Acesso em: 25 maio 2009.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração**: geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis: EDUFSC, 2002.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL - BNDES. **Ampliação da produção de etanol e cogeração de energia**. Brasília, 25 jul. 2003. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/seminario/alcool_discussao.pdf>. Acesso em: 10 maio 2009.

BARREDA DEL CAMPO, E. R. **Análise termoeconômica do sistema de cogeração da usina Vale do Rosário**. 1999. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

BARREDA DEL CAMPO, E. R.; LLAGOSTERA, J. Estudo de possibilidades de incremento da cogeração em usinas açucareiras cubanas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 6., 1996, Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: ENCIT, 1996, p. 447-452.

BARREDA DEL CAMPO, E. R.; ROXO, R., NEBRA, S. A.; BORDONAL, A. F. Análises energética e exergética do sistema de cogeração da Usina Vale do Rosário. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 7., 1998, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: ENCIT, 1998. v. 1, p. 307-312.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. New York: John Wiley & Sons, 1988.

BOHÓRQUEZ, W. O. I.; HORTA NOGUEIRA, L. A.; LORA, E. E. S. Análise exergoeconômica da repotenciação de uma planta de cogeração na indústria açucareira equatoriana. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., 2006, Recife, PE. **Anais...** Recife: CONEM, 2006. 1 CD-ROM

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia: PNE 2030**. Brasília, 2008. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 15 maio 2009.

BRIGHENTI, C. R. F. **Integração do cogrador de energia do setor sucroalcooleiro com o Sistema Elétrico**. 2003. 169 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

COELHO, S. T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa**: um modelo para o Estado de São Paulo. 1999. 275 f. Tese (Doutorado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

COELHO, S. T.; OLIVEIRA JR., S.; ZYLBERSTAJN, D. Análise termoeconômica da cogeração de eletricidade a partir do bagaço da cana em uma usina. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 14., 1997, Bauru. **Anais...** Bauru: COBEM, 1997. 1 CD-ROM.

COMBUSTÍVEL para a consolidação. **Revista AlcoolBras**, Sertãozinho, n. 116, 2008. Disponível em: <http://www.editoravalete.com.br/site_alcoolbras/edicoes/ed_116/mc_2.html>. Acesso em: 25 maio 2009.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucro-alcooleiro**. Brasília: SETAP, 2002.

DE BEER, A.G.; HUDSON, C.; MEYER, E.; SIEGMUND, B. Green cane harvesting and trash management. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 22., 1995, Cartagena, Colombia. **Proceedings...** Cali: Tecnicana, 1996. v. 2, p. 133-141.

FIOMARI, M. C. **Análise energética e exérgica de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão**. 2004. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

HASSUANI, S. J. Atividade 2.3.1 - Summary of Bailing Tests. In: COOPERSUCAR. **Projeto BRA/96/G31 Geração de Energia por Biomassa: bagaço de cana de açúcar e resíduos.** Piracicaba: COOPERSUCAR, 1998.

HORLOCK, J. H. **Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP).** Florida: Krieger, 1997.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Geração de vapor, sistemas de potência, refrigeração e recuperação de calor.** São Paulo: IPT, 1996. p. 3.2-3.38.

JAGUARIBE E. F.; LOBO, P. C.; NETO, J. R. L.; SOUZA, W. L.; ROCHA, F. A. A. Estudo termodinâmico e análise de custos da ampliação de um sistema de cogeração de energia em uma destilaria de cana de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 9. , 2002, Caxambu. **Anais...** Caxambu: ENCIT, 2002. 1 CD-ROM.

KADAM, R. S.; JADHAV, S. B. Sugarcane trash as a source of energy. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 22., 1995, Cartagena. **Proceedings...** Cali: Tecnicaña, 1995. p. 345-348.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis.** Florida: Krieger, 1985.

MACEDO, I. C. **Greenhouse gas emission and avoided emissions in the production and utilization of sugar cane, sugar and ethanol in Brazil: 1990-1994: Report for MCT, Coordenação de Pesquisa em Mudanças Globais.** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1997. (RT-CTC-002/97).

MELLO, J. C. O. **Geração de eletricidade a partir de biomassa e biogás: minuta do Termo de Referência 8 (TR-8).** São Paulo: ANDRADE & CANELLAS Consultoria e Engenharia 2007.

MOAGEM: a transformação da cana em riqueza: o prestígio do açúcar. **Revista Rural**, São Paulo, n. 86, abr. 2005. Disponível em: <http://www.revistarural.com.br/Edicoes/2005/artigos/rev86_moagem.htm>. Acesso em: 12 jun. 2009.

OLIVEIRA, C. E. L.; HALMEMAN, M. C. R. Implicações do novo modelo do setor elétrico brasileiro no processo de geração distribuída com a utilização do bagaço da cana de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11., 2006, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. 1 CD-ROM.

OMETTO, A. R. **Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia**. 2005. 210 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

PIERCE, M. A. A history of cogeneration before PURPA. **ASHRAE Journal**, v. 37, n. 5, p. 53-60, 1995.

RIPOLI, T. C.; MOLINA JR., W. F.; STUPIELLO, J. P. NOGUEIRA, M. C. S.; SACCOMANNO, J. B. Potencial energético de resíduos de cosecha de la caña verde. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 1, p. 22-28, 1991.

SÁNCHEZ PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria sucroalcooleira: estudo de caso**. 2003. 255 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SÁNCHEZ PRIETO, M. G. S.; CARRIL, T. P.; NEBRA, S. A. Análise do custo exergético do sistema de geração de vapor da Usina Cruz Alta. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 16., 2001, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: COBEM, 2001. v. 4, p. 196-205.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process**. New York: Hemisphere, 1988.

TOLMASQUIM, M. T.; SZKLO, A.; SUGIYAMA, A.; SOARES, J.; CORRÊA NETO, V. **Avaliação dos potenciais técnicos e econômicos e identificação das principais barreiras à implementação da cogeração no Brasil e em setores selecionados**. Rio de Janeiro: PROCEL/COPPE/PPE, 1999.

UNICA. **Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região Centro-Sul: safra 2007/2008**. São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 09 out. 2009.

UNICA. **Ranking da produção de cana, açúcar e etanol das unidades da Região Centro-Sul: safra 2008/2009.** São Paulo, 2009. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 09 out. 2009.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica.** São Paulo: Edgard Blücher, 1995.

WALTER, A. C. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucro-alcooleiro.** 1994. 283 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

ZULAUF, W. E.; CAPORALI, S. A.; VIDEIRA, R. M. Cálculo preliminar da energia liberada anualmente na queima dos canaviais brasileiros. In: SIMPÓSIO SOBRE QUEIMA DE PALHA DE CANAVIAIS, 2., 1985, Araraquara. **Anais...** Araraquara, 1985.

APÊNDICE A

Informações sobre o Programa Desenvolvido

APÊNDICE A

Informações sobre o Programa Desenvolvido

O propósito inicial do desenvolvimento deste programa foi para analisar a possibilidade de instalação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco (SLCS) na nova unidade da Pioneiros Bioenergia S/A que seria instalada na cidade de Ilha Solteira (SP). Devido às proporções e riquezas de informações que o programa gera o mesmo acabou se tornando parte da dissertação de mestrado.

Para os cálculos da viabilidade da implantação do SLCS, e posterior aproveitamento da palha separada por este sistema para queima em caldeiras convencionais de alta pressão, foi utilizado o programa Microsoft Office – Excel[®].

Os dados iniciais necessários são os dados da composição da cana de açúcar (Tabela 6); as eficiências de limpeza da palha das colhedoras (Tabela 7); as eficiências do Sistema de Limpeza de Cana a Seco; o *mix* de Produção (Açúcar e Álcool); o *mix* de Produção de Álcool (Anidro e Hidratado); o *mix* de Produção de Açúcar (Branco e VHP); os custos de venda e investimento (álcool, açúcar, energia e SLCS), porcentagem de mecanização da colheita da cana de açúcar, rendimento do canavial, ou seja, quantidade de cana a ser moída e a eficiência de extração de caldo das moendas.

A Figura B.1 apresenta a tela inicial do programa onde os dados de entrada devem ser inseridos.

	B	C	D	E	F
1					
2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS PARA DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA				
3					
4	CANA COLMO + PALHA		Custos		
5					
6	Porcentagem de Palha	12,28%	R\$/m3 Alcool Hidratado	R\$	670,00
7	Porcentagem de Cana Colmo	87,72%	R\$/m3 Alcool Anidro	R\$	750,00
8	PCI Bagaço (51% U) - [kJ/kg]	7,243	R\$/Sacac Açúcar Branco		
9	PCI Palha (15% U) - [kJ/kg]	12.905,26	R\$/Sacac Açúcar VHP		
10	Fibra da Palha	85,00%	R\$/MW	R\$	120,00
11	% Fibra Colmo	12,50%			
12	% Fibra do Bagaço	47,50%	Mecanização do Corte da Cana		
13	% ART	16,27%			
14	% Caldo	71,23%	Mecanizada		60,00%
15	% Bagaço (51% U)	26,32%	Manual		40,00%
16	Quantidade de Bagaço	430.263,16 ton			
17					
18					
19	Eficiência da Colhedora		Rendimento do Canavial		
20	Palha no Campo				
21	Ventilada	80,00%	Área de plantio (ha)		15935,8
22	Parcialmente Ventilada	50,00%	Produtividade (ton/ha)		90
23	Sem Ventilador	6,00%	Cana (Colmo + Palha)		1.635.000 ton
24					
25	Sistema de Lavagem de Cana a Seco		Investimento no Sistema de Limpeza de Cana a Seco		
26					
27	Eficiência da Lavagem	62,50%	R\$		5.000.000,00
28	Taxa de Utilização do Equipamento	65,00%			
29					
30	MIX de Produção		Eficiência da Indústria		
31	Produção de Alcool	100,00%			
32	Produção de Açúcar	0,00%	Eficiência de Extração (Moenda)		97,00%
33					
34	MIX de Produção de Alcool		MIX de Produção de Açúcar		
35	Alcool Hidratado	30,00%	Açúcar Branco		100,00%
36	Alcool Anidro	70,00%	Açúcar VHP		0,00%
37					
38					
39					
40	 < > \ Dados de Entrada / Principal / Produção de Alcool e Açúcar / Balanço Energético / Sequestro de ART				

Figura B.1 – Tela de dados de entrada do programa.

A Figura B.2 demonstra parte da tela principal do programa, onde todos os resultados são apresentados.

Nesta primeira etapa é apresentada a quantidade total de cana disponível no campo e, conseqüentemente, a quantidade de colmo e de palha existente em certa quantidade de cana. Após a determinação da porcentagem da colheita mecanizada o próximo indicador mostra a quantidade real de colmo e palha no campo, ou seja, quanto maior for a porcentagem de colheita manual (queimadas), menor será a quantidade de palha. Em seguida é gerada a quantidade de palha que fica no campo através das três eficiências de limpeza de palhiço das colhedoras (Ventilada, Parcialmente Ventilada e Sem Ventilação).

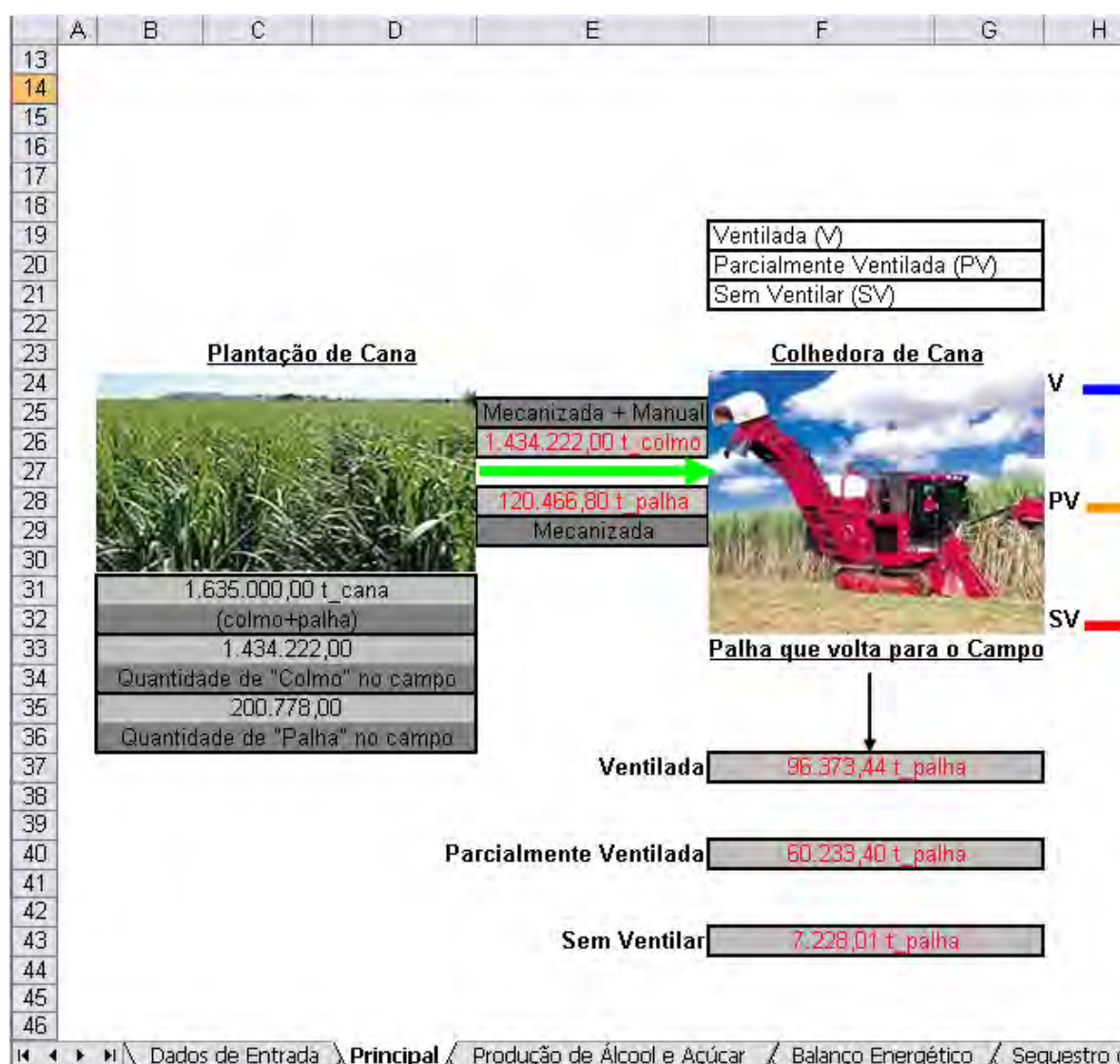


Figura B.2 – Tela principal do programa (Parte 1).

A Figura B.3 é continuação da tela principal do programa gerando dados como, quantidade de colmo e palha que entra na indústria e que é descarregada na Mesa Alimentadora, e a quantidade de palha que é separada pelo SLCS e desta forma seguindo para a caldeira sendo preparada antes para a correta queima (picador de palha).

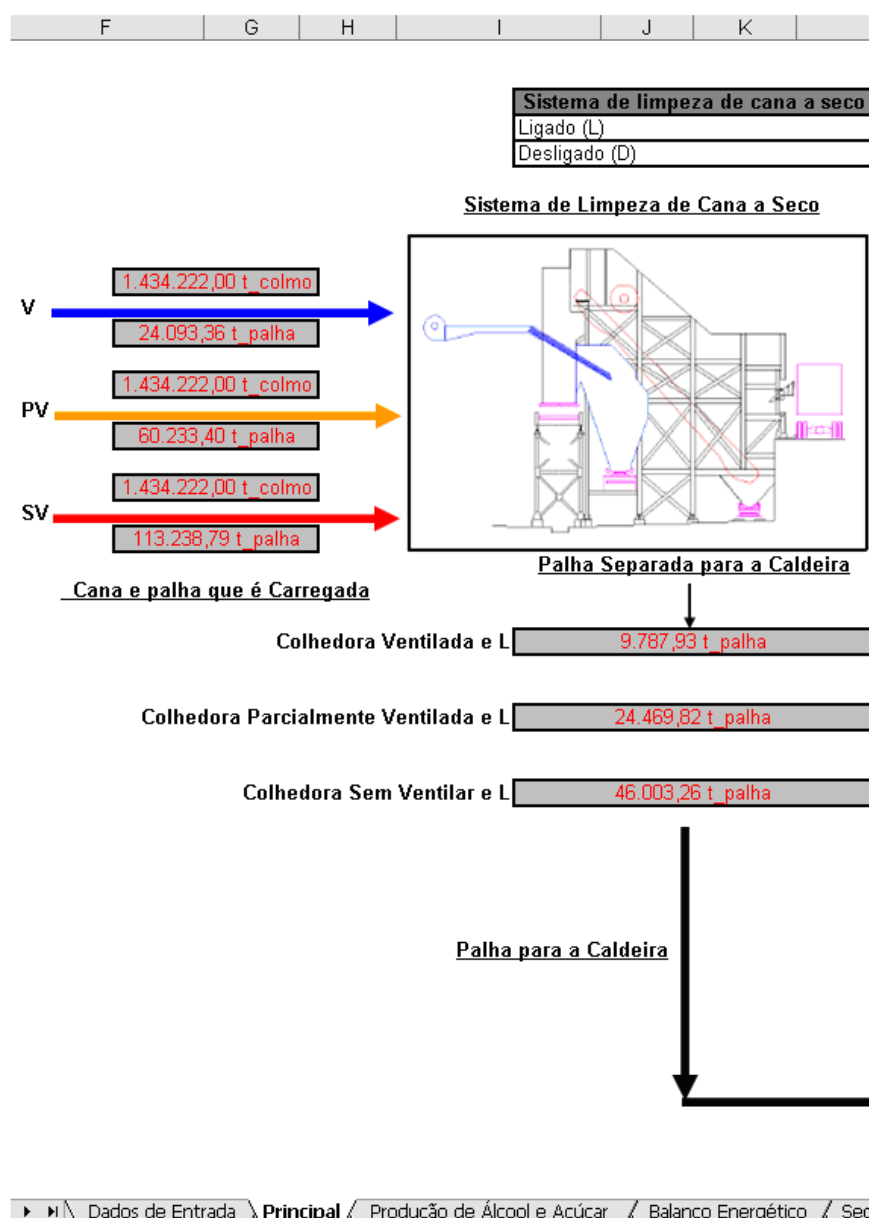


Figura B.3 – Tela principal do programa (Parte 2).

A Figura B.4 mostra outra parte da tela principal do programa na qual é demonstrada a quantidade de Cana (Colmo + Palha) que segue para o setor de extração de caldo (Moendas), além do picador de palha.

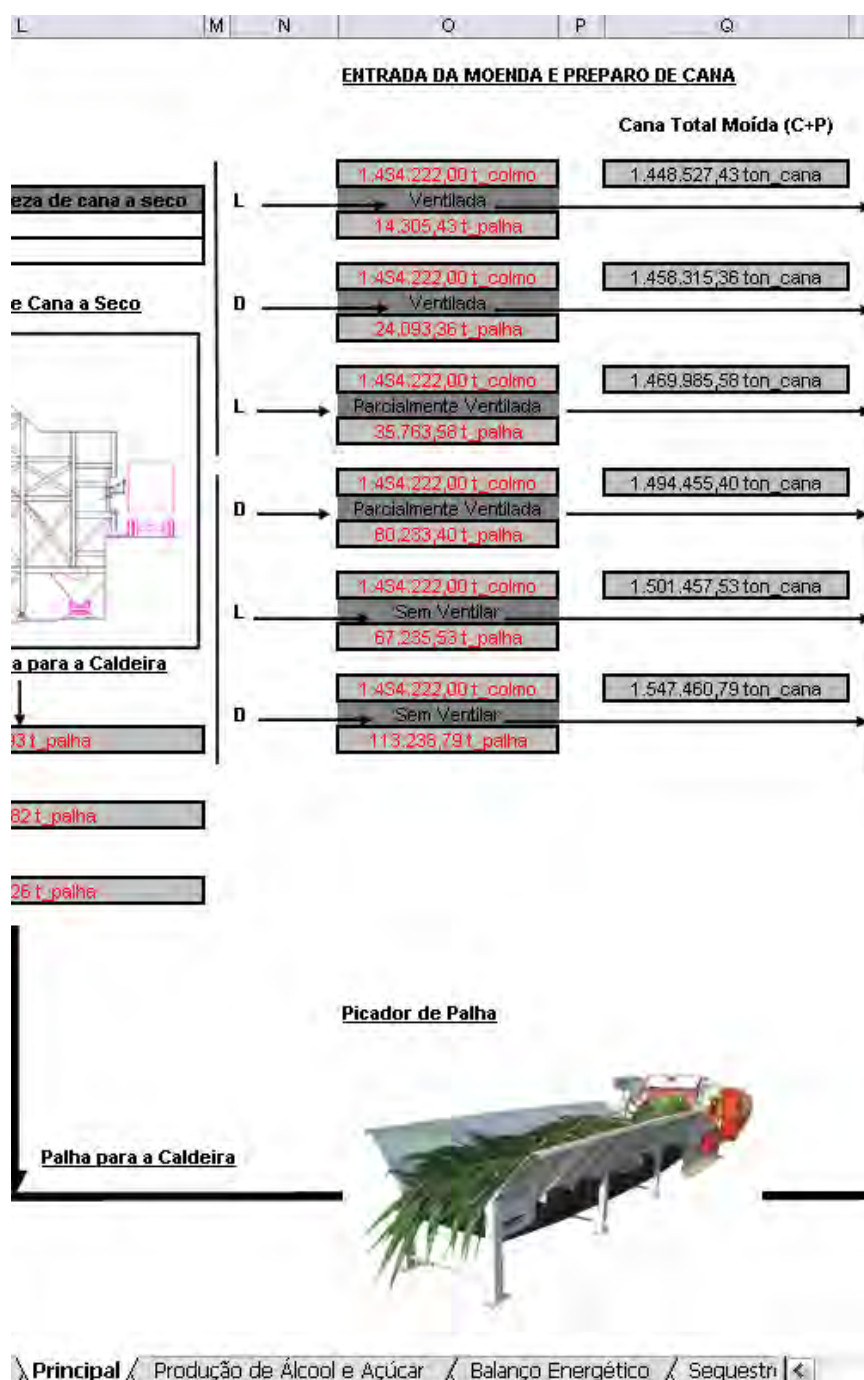
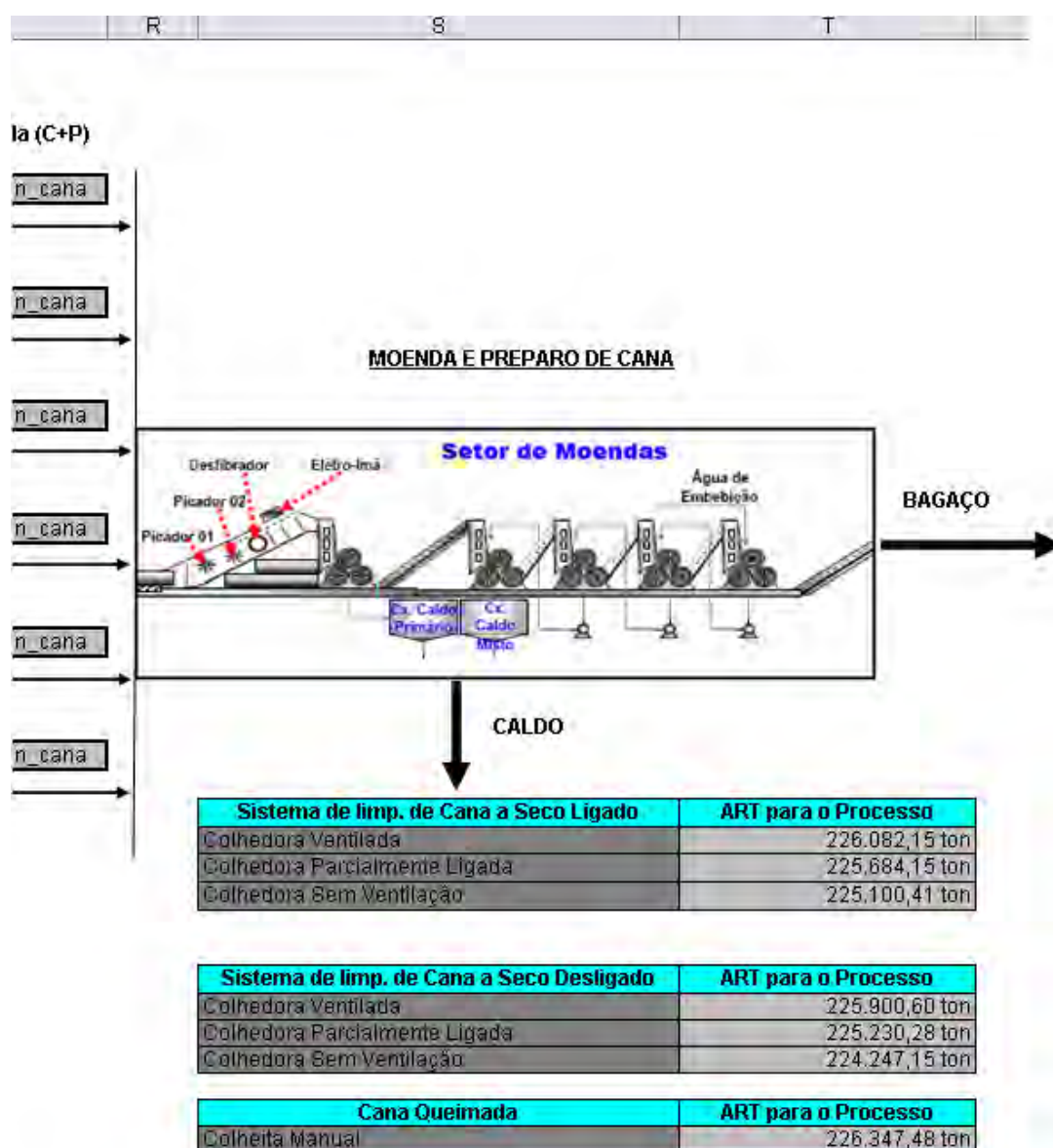


Figura B.4 – Tela principal do programa (Parte 3).

A Figura B.5 apresenta o setor de Preparo da Cana e Extração do Caldo com as respectivas quantidades de ART disponível para o processo, ou seja, para a produção de álcool e/ou açúcar dependendo o caso analisado, através da variação de limpeza da palha das colhedoras.



trada \ Principal / Produção de Álcool e Açúcar / Balanço Energético / Sequestro de ART / A.En

Figura B.5 – Tela principal do programa (Parte 4).

A Figura B.6 gera a quantidade de bagaço disponível para a queima na caldeira de alta pressão e a quantidade de ART seqüestrado a partir da introdução da palha na moagem da cana. Na mesma figura na parte inferior é gerado o lucro real com a exportação de energia para a primeira safra de moagem sendo contabilizado também o custo do investimento do SLCS e da perda de produção com álcool e/ou açúcar.



Figura B.6 – Tela principal do programa (Parte 5).

Com a quantidade de bagaço que sai dos ternos de moagem, mais a quantidade de palha que é separada pelo SLCS e preparada para a queima a Figura B.7 apresenta o total de combustível (bagaço + palha) para a caldeira de alta pressão. A partir desta quantidade é possível iniciar os cálculos da geração de energia da usina e, conseqüentemente, a sua comercialização.

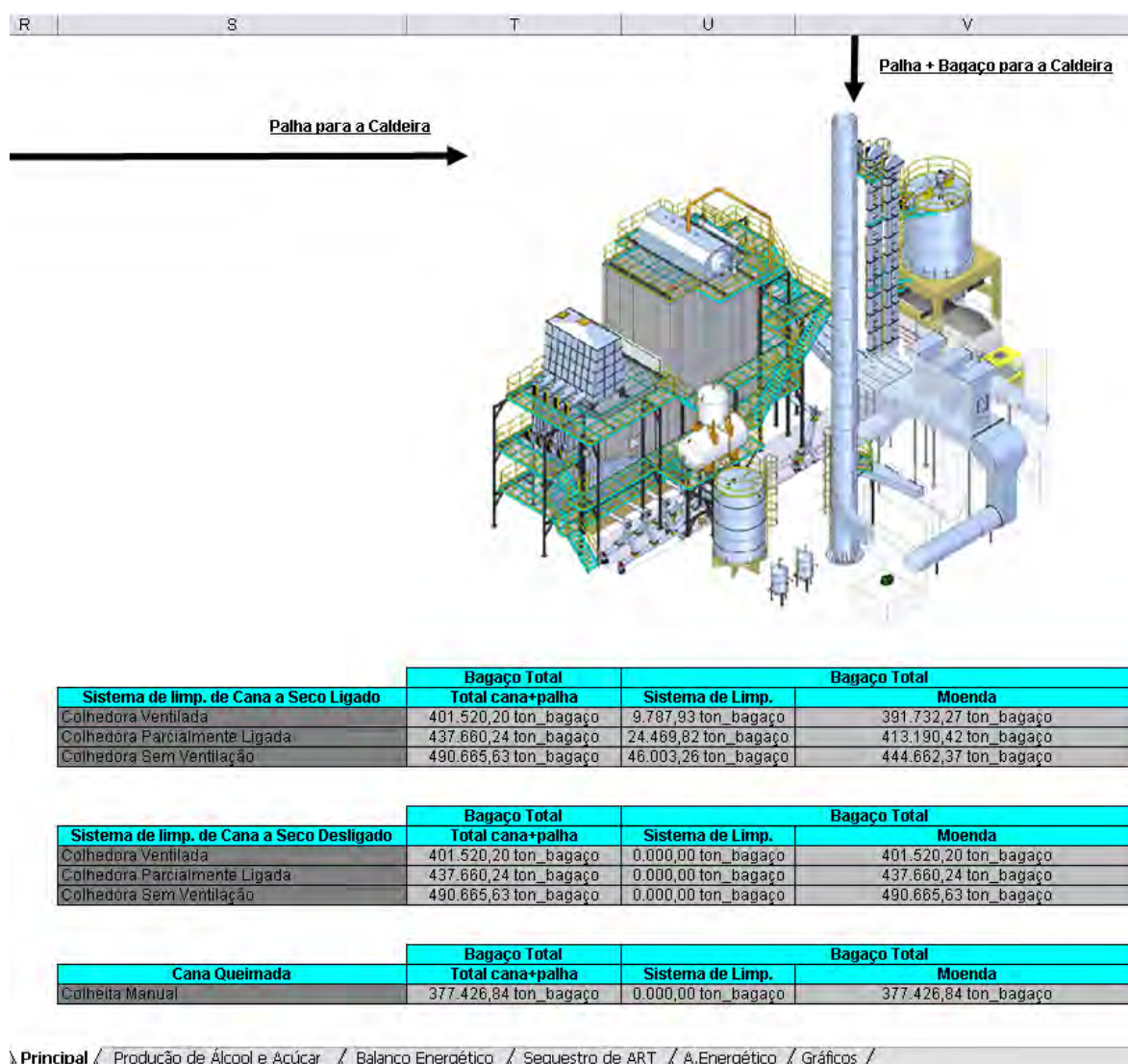


Figura B.7 – Tela principal do programa (Parte 6).

Finalizando o programa (tela principal), é apresentada na Figura B.8 a quantidade de álcool (m³) e de açúcar (sacas) que são perdidos com a introdução da palha na moagem da cana utilizando para esses cálculos como base a colheita 100% manual da cana na lavoura, ou seja, toda a área de plantio foi queimada antes da colheita.

	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
	Perda de ART Convertida em Perda de Álcool Hidratado			Perda de ART Convertida em Perda de Álcool Anidro				
	REAL	RELATIVO	RELATIVO	REAL	RELATIVO	RELATIVO		
Sistema de limp. de Cana a Seco Ligado	m3 de Hidratado			m3 de Anidro				
			R\$/safra perdido			R\$/safra perdido		
Colhedora Ventilada	1.202,76 m3	43,92 m3	R\$ 29.428,31	2.681,37 m3	97,92 m3	R\$ 73.439,58		
Colhedora Parcialmente Ligada	1.268,64 m3	109,81 m3	R\$ 73.570,77	2.828,25 m3	244,80 m3	R\$ 183.598,95		
Colhedora Sem Ventilação	1.365,27 m3	206,44 m3	R\$ 138.313,04	3.043,68 m3	460,22 m3	R\$ 345.166,03		
Sistema de limp. de Cana a Seco Desligado								
Colhedora Ventilada	1.232,81 m3	073,98 m3	R\$ 49.563,46	2.748,37 m3	164,92 m3	R\$ 123.687,71		
Colhedora Parcialmente Ligada	1.343,78 m3	184,94 m3	R\$ 123.908,66	2.995,75 m3	412,29 m3	R\$ 309.219,29		
Colhedora Sem Ventilação	1.506,52 m3	347,68 m3	R\$ 232.948,28	3.358,56 m3	775,11 m3	R\$ 581.332,26		
Cana Queimada sem sist. de limpeza								
Colheita Manual	1.158,84 m3	0,00 m3	R\$ -	2.583,45 m3	0,00 m3	R\$ -		
	Perda de ART Convertida em Perda de Açúcar Branco			Perda de ART Convertida em Perda de Açúcar VHP				
	REAL	RELATIVO	RELATIVO	REAL	RELATIVO	RELATIVO		
Sistema de limp. de Cana a Seco Ligado	Sacas de Açúcar Branco			Sacas de Açúcar VHP				
			R\$/safra perdido			R\$/safra perdido		
Colhedora Ventilada	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Colhedora Parcialmente Ligada	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Colhedora Sem Ventilação	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Sistema de limp. de Cana a Seco Desligado								
Colhedora Ventilada	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Colhedora Parcialmente Ligada	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Colhedora Sem Ventilação	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
Cana Queimada sem sist. de limpeza								
Colheita Manual	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -	0,00 sacas	0,00 sacas	R\$ -		
	Perda de Energia com a Queima da Palha							
	REAL	RELATIVO	RELATIVO					
Sistema de limp. de Cana a Seco Ligado	Potencial Exportação (MW)			R\$/safra perdido				
Colhedora Ventilada	140.462,03 MW	16.724,99 MW	R\$ 2.006.998,84					
Colhedora Parcialmente Ligada	166.625,19 MW	42.888,14 MW	R\$ 5.146.577,08					
Colhedora Sem Ventilação	204.997,81 MW	81.260,77 MW	R\$ 9.751.291,84					
Sistema de limp. de Cana a Seco Desligado								
Colhedora Ventilada	136.016,20 MW	12.279,16 MW	R\$ 1.473.499,01					
Colhedora Parcialmente Ligada	154.434,94 MW	30.697,90 MW	R\$ 3.683.747,53					
Colhedora Sem Ventilação	181.449,09 MW	57.712,04 MW	R\$ 6.925.445,36					
Cana Queimada sem sist. de limpeza								
Colheita Manual	123.737,04 MW	000,00 MW	R\$ -					

Principal / Produção de Álcool e Açúcar / Balanço Energético / Sequestro de ART / A.Energético / Gráficos /

Figura B.8 – Tela principal do programa (Parte 7).

Para se obter os resultados apresentados na Figura B.8 são necessários alguns cálculos como: rendimentos da produção de álcool e açúcar; quantidade de ART disponível para o processo, entre outros itens, como pode ser visto na tela secundária do programa mostrada na Figura B.9. Os conceitos e metodologias aplicadas estão nos Itens 4.2 e 4.3 desta dissertação.

A Figura B.10 apresenta uma tela secundária do programa para cálculos do balanço energético gerando dados da geração total de energia, exportação de energia, produção energética da planta industrial entre outros dados. Os conceitos e metodologias aplicadas estão no Item 4.4 desta dissertação.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2	Sistema de Limpeza de Cana a Seco Ligado							
3	Colhedora Ventilada							
4								
5						Dados de Entrada		
6								
7	Rendimentos Destilaria							
8						Valores		Unidade
9	Rendimento estequiométrico					0,5111		kg/Kg ART
10	Densidade do álcool absoluto					0,7943		kg/l
11	Teor alcoólico do álcool anidro					99,30		% peso
12	Rendimento teórico - álcool anidro					0,6470		l/kg ART
13	Teor alcoólico do álcool hidratado					93,80		% peso
14	Rendimento teórico - álcool hidratado					0,6772		l/kg ART
15	Rendimento pratico de fermentação					90,41		%
16	Rendimento de Destilação					99,84		%
17	Rendimento Global - álcool anidro					0,5841		l/kg ART
18	Rendimento Global - álcool hidratado					0,6113		l/kg ART
19	Produção de Álcool (ART para o processo)							
20	ART Disponível para o processo					226.082.147,52		kg de ART
21	Perdas de ART para o processo					22.008.319,34		kg de ART
22	ART Recuperado					204.073.828,18		kg de ART
23	Produção Final de Álcool Hidratado					37.425.132,35		litros
24	Produção Final de Álcool Anidro					83.433.756,46		litros
25	Produção de Alcool (ART perdido na palha)							
26	ART Disponível para o processo					7.265.771,88		kg de ART
27	Perdas de ART para o processo					707.297,90		kg de ART
28	ART Recuperado					6.558.473,98		kg de ART
29	Produção Final de Álcool Hidratado					1.202.759,60		litros
30	Produção Final de Alcool Anidro					2.681.373,33		litros
31	Produção de Açúcar (ART para o processo)							
32	ART Disponível para o processo					0.000,00		kg de ART
33	Perdas de ART para o processo					0.000,00		kg de ART
34	ART Recuperado					0.000,00		kg de ART
35	Eficiência de Recuperação de ART % ART da Cana					85,00%		%
36	Somente produção de açúcar					83 a 85		%
37	Açúcar e Álcool					86 a 90		%
38	Pol - Produção de Açúcar Branco					99,70%		%
39	Pol - Produção de Açúcar VHP					99,30%		%
40	Produção Final de Açúcar Branco					0,00		sacas
41	Produção Final de Açúcar VHP					0,00		sacas
42	Produção de Açúcar (ART perdido na Palha)							
43	ART Disponível para o processo					0.000,00		kg de ART
44	Perdas de ART para o processo					0.000,00		kg de ART
45	ART Recuperado					0.000,00		kg de ART
46	Eficiência de Recuperação de ART % ART da Cana					85,00%		%
47	Pol - Produção de Açúcar Branco					99,70%		%
48	Pol - Produção de Açúcar VHP					99,30%		%
49	Produção Final de Açúcar Branco					0,00		sacas
50	Produção Final de Açúcar VHP					0,00		sacas

◀ ▶ \ Dados de Entrada \ Principal \ **Produção de Álcool e Açúcar** \ Balanço Energé

Figura B.9 – Tela secundária do programa para cálculo da produção de álcool e açúcar.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2			Balanco Energético - Geração de Energia							
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36										
37										

Figura B.10 – Tela secundária do programa para cálculo do balanço energético da usina.

Na tela secundária do programa apresentada na Figura B.11 é possível quantificar a quantidade de ART que é perdido no bagaço, ou seja, o seqüestro de kg de ART por kg de bagaço produzido. Os conceitos e a metodologia aplicados para quantificar este valor estão explicados no Item 4.5 desta dissertação.

	A	B	C	D	E	F	G
1							
2			Cálculo do Seqüestro de kg ART / kg Bagaço produzido				
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							

Figura B.11 – Tela secundária do programa para cálculo do seqüestro de ART pelo bagaço produzido.

Nas Figuras B.12 e B.13 são apresentadas telas secundárias do programa nas quais são realizadas análises energéticas dos equipamentos relacionados ao setor de preparo e moagem de cana, assim como para o preparo da palha para queima na caldeira.

Na Figura B.12 são realizados cálculos do consumo de energia por tonelada de cana (kWh/tc) do picador e desfibrador de cana (modelo COP 5 e COP 8 respectivamente), assim como dos 6 ternos de moenda (30 x 64"), além disso é apresentado a energia total consumida do conjunto de sistema que envolve o acréscimo de palha como combustível suplementar na Caldeira variando o tipo de ventilação das colhedoras de cana e se o SLCS está em funcionamento ou não.

Na Figura B.13 são realizados cálculos do consumo de energia por tonelada de cana do conjunto de equipamentos que realizam o preparo da palha para queima na caldeira, ou seja, dos ventiladores que fazem a separação da cana, do triturador de palha, da peneira rotativa que realiza a separação da palha em relação às impurezas minerais e das esteiras que realizam o transporte da palha até a esteira elevadora da caldeira.

	A	B	C	D	E	F
1						
2		Análise Energético para os Equipamentos de Preparo e Moagem de Cana e Preparo da Palha				
3						
4						
5		Preparo e Moagem de Cana				
6		Picador				
7		Capacidade Máxima	600,00 tch			
8		Potência do Motor	4.200,00 cv	3.087,00 kW		
9		Cte de Potência	0,6			
10		Potência Útil	1.852,20 kW			
11		Cte de Consumo	24,70 kWh/tc			
12						
13						
14		Desfibrador				
15		Capacidade Máxima	600,00 tch			
16		Potência do Motor	4.200,00 cv	3.087,00 kW		
17		Cte de Potência	0,7			
18		Potência Útil	2.160,90 kW			
19		Cte de Consumo	28,81 kWh/tc			
20						
21						
22		Ternos de Moenda				
23		Capacidade Máxima	600,00 tch			
24		Potência do Motor	2.000,00 cv	1.470,00 kW		
25		Cte de Potência	0,7			
26		Potência Útil	1.029,00 kW			
27		Cte de Consumo	2,86 kWh/tc			
28						
29						
30		Energia Total Consumida		56,37 kWh/tc		
31						
32						
33		Energia Consumida com o Acréscimo da Palha				
34		Sistema de Limpeza Ligado	Energia no Ventilador	Energia no SLCS	Energia na moenda palha	Energia Total Consumida
35		Colhedora Ventilada	729,16 MWh	991,07 MWh	685,39 MWh	2405,62 MW/safra
36		Colhedora Parcialmente Ligada	747,23 MWh	2477,68 MWh	1713,48 MWh	4938,39 MW/safra
37		Colhedora Sem Ventilação	773,73 MWh	4658,04 MWh	3221,35 MWh	8653,11 MW/safra
38						
39		Sistema de Limpeza Desligado	Energia no ventilador	Energia no SLCS	Energia na moenda palha	Energia Total Consumida
40		Colhedora Ventilada	0,00 MWh	0,00 MWh	1154,35 MWh	1154,35 MW/safra
41		Colhedora Parcialmente Ligada	0,00 MWh	0,00 MWh	2885,87 MWh	2885,87 MW/safra
42		Colhedora Sem Ventilação	0,00 MWh	0,00 MWh	5425,43 MWh	5425,43 MW/safra

Figura B.12 – Tela secundária do programa para análise energética dos equipamentos do preparo e moagem de cana e preparo da palha (Parte 1).

Moagem de Cana e Preparo da Palha		
Sistema de Limpeza de Cana a Seco		
Picador de Palha		
Capacidade Máxima	25,00 tph	
Potência do Motor	400,00 cv	294,00 kW
Cte de Potência	0,9	
Potência Util	264,60 kW	
Cte de Consumo	84,67 kWh/tc	
Esteiras Transportadoras		
Capacidade Máxima	25,00 tph	
Potência do Motor	40,00 cv	29,40 kW
Cte de Potência	0,9	
Potência Util	26,46 kW	
Quantidade de Esteiras	4,0	
Cte de Consumo	30,48 kWh/tc	
Peneira Rotativa		
Capacidade Máxima	20,00 tph	
Potência do Motor	15,00 cv	11,03 kW
Cte de Potência	0,9	
Potência Util	9,92 kW	
Cte de Consumo	3,97 kWh/tc	
Energia Total Consumida		119,12 kWh/tc
Ventiladores		
Cte de Consumo	0,50 kWh/tc	
Energia Consumida nos Ventiladores		
Colhedora Ventilada	C. P. Ventilada	C. Sem Ventilação
1.434.222,00 t_colmo	1.434.222,00 t_colmo	1.434.222,00 t_colmo
24.093,36 ton_palha	60.233,40 ton_palha	113.238,79 ton_palha
1.458.315,36 ton_cana	1.494.455,40 ton_cana	1.547.460,79 ton_cana
729,16 MWh	747,23 MWh	773,73 MWh

Figura B.13 – Tela secundária do programa para análise energética dos equipamentos do preparo e moagem de cana e preparo da palha (Parte 2).

As próximas telas a serem apresentadas mostram os resultados finais obtidos em forma gráfica com as metodologias aplicadas no Capítulo 4.

As Figuras B.14 e B.15 mostram telas secundárias do programa onde são demonstradas as perdas de ART com o acréscimo da palha na indústria utilizando como base a cana totalmente queimada nos canaviais convertidas em perdas de álcool (hidratado e anidro) e açúcar (brando e VHP) variando a ventilação das colhedoras de cana e trabalhando com o SLCS ligado ou não.



Figura 14 – Tela secundária do programa para cálculo das perdas de ART convertidas em perdas de álcool e açúcar (Parte 1).

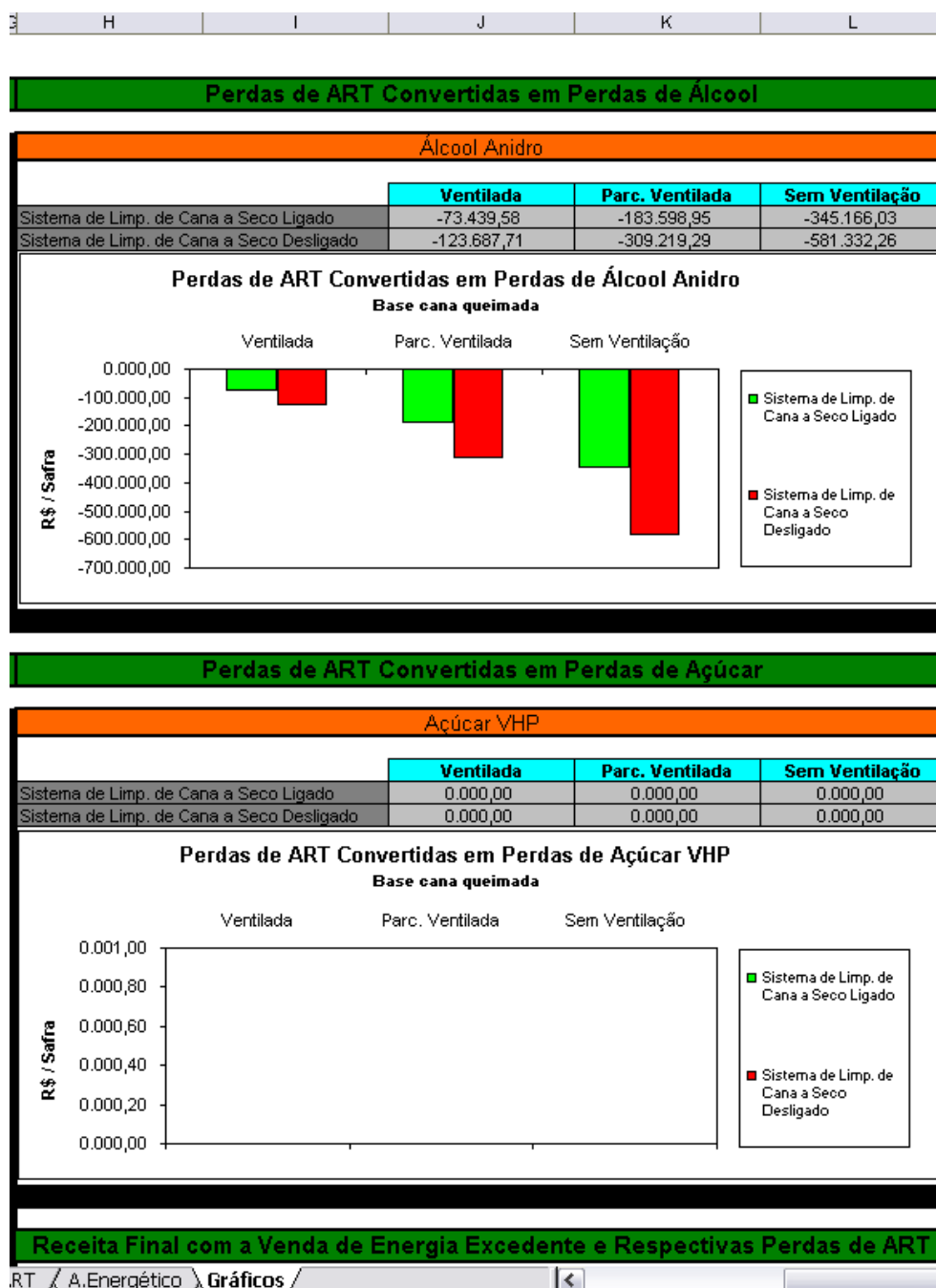


Figura B.15 – Tela secundária do programa para cálculo das perdas de ART convertidas em perdas de álcool e açúcar (Parte 2).

A Figura B.16 apresenta o valor (R\$/safra) que a usina deixa de ganhar não aproveitando o potencial energético da palha, o qual acaba deixando no campo aproximadamente um terço da “energia” da cana de açúcar.

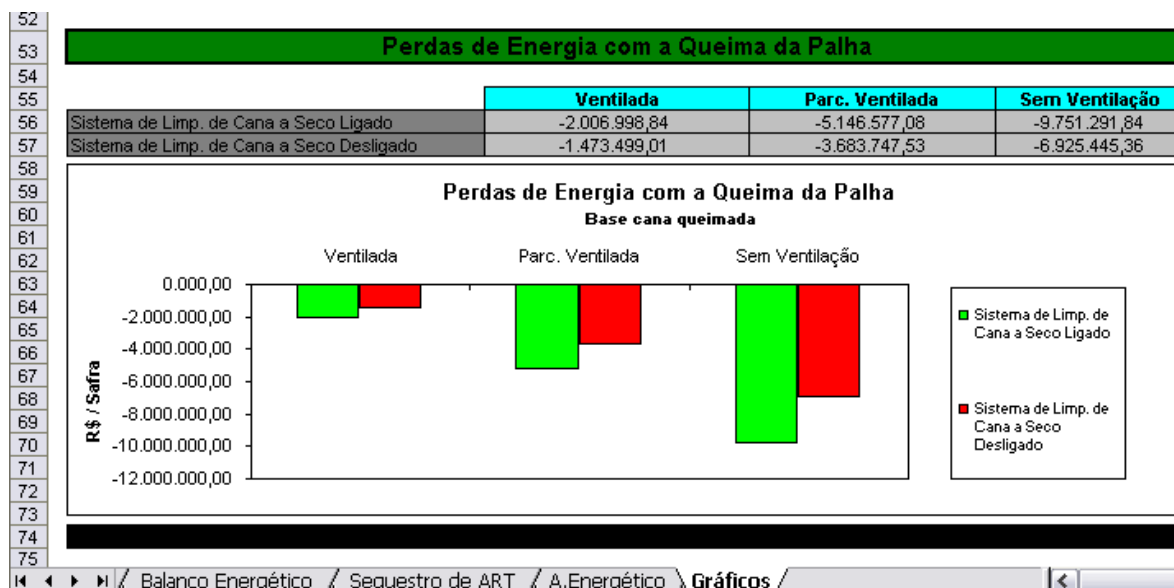


Figura B.16 – Perdas de energia com a queima da palha nos canaviais.

A Figura B.17 apresenta a receita final com a venda de energia através do acréscimo de palha queimado na Caldeira, as respectivas perdas com a venda de álcool e açúcar através do seqüestro de ART pela palha e o custo do investimento total para a implantação do Sistema de Limpeza de Cana a Seco para a primeira safra da usina.

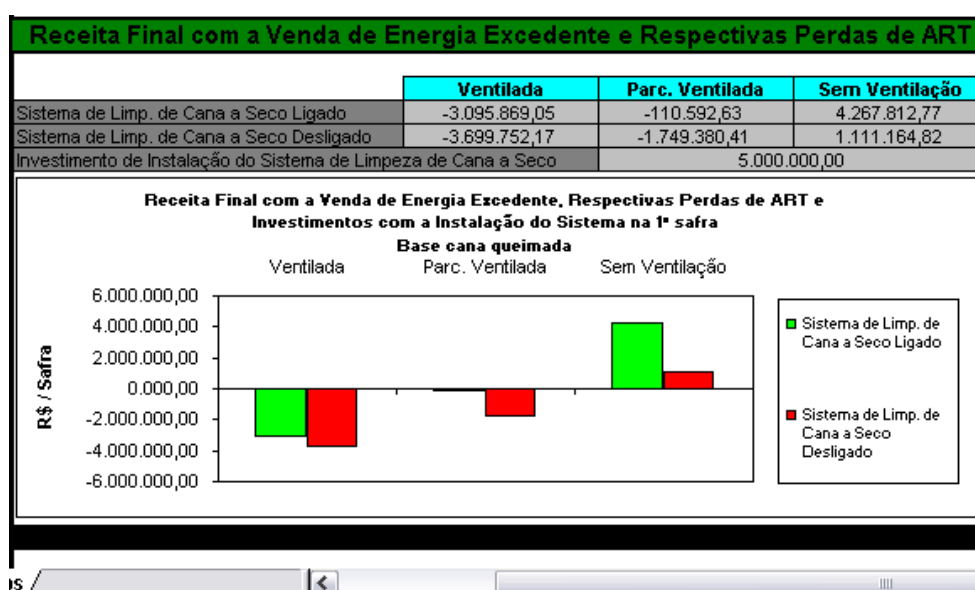


Figura B.17 – Receita final com acréscimo da palha na indústria.

A Figura B.18 é relativa à produção energética (eficiência) global dos indicadores analisados.

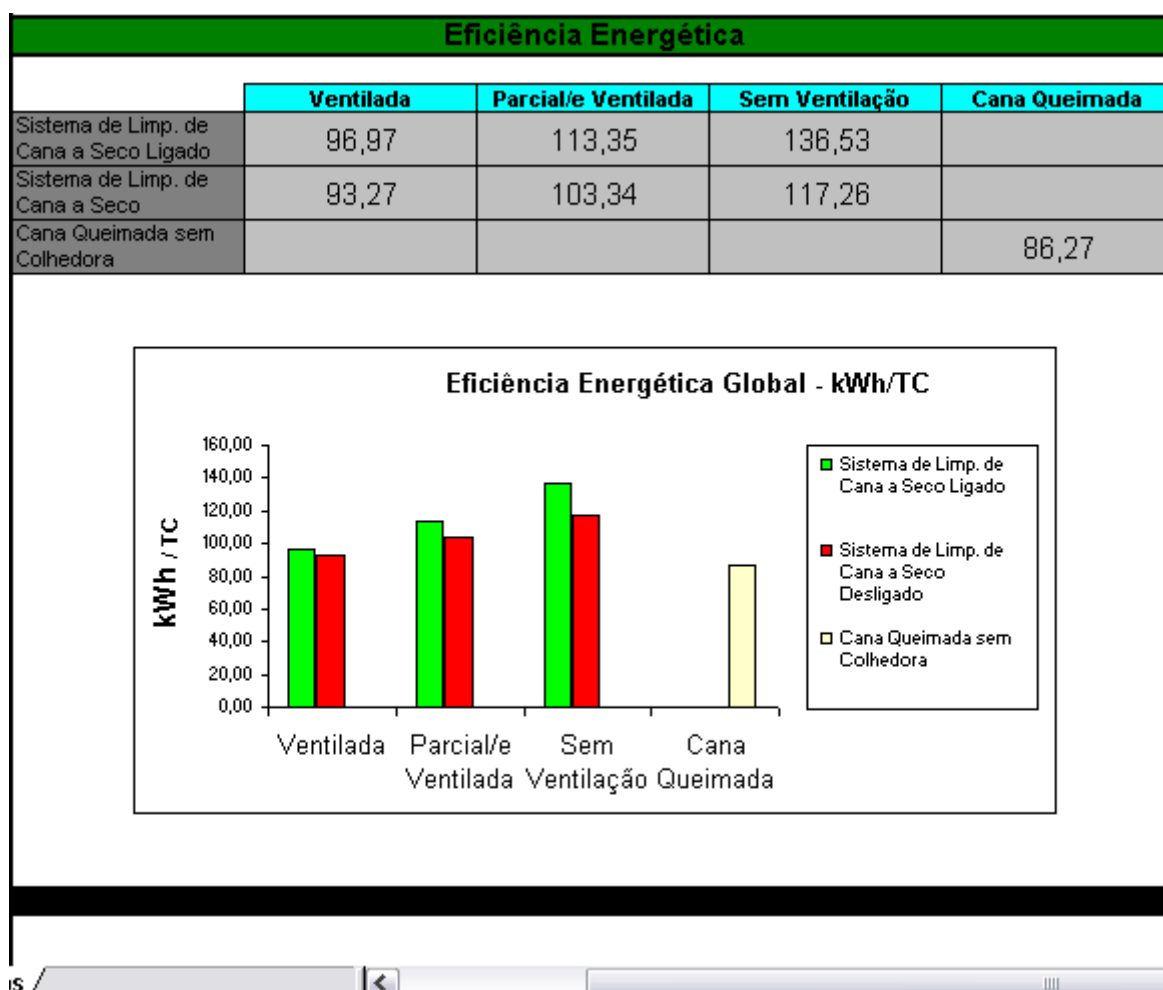


Figura B.18 – Produção energética.

A Figura B.19 apresenta a rentabilidade da energia excedente exportada com a introdução da palha na caldeira em safras.

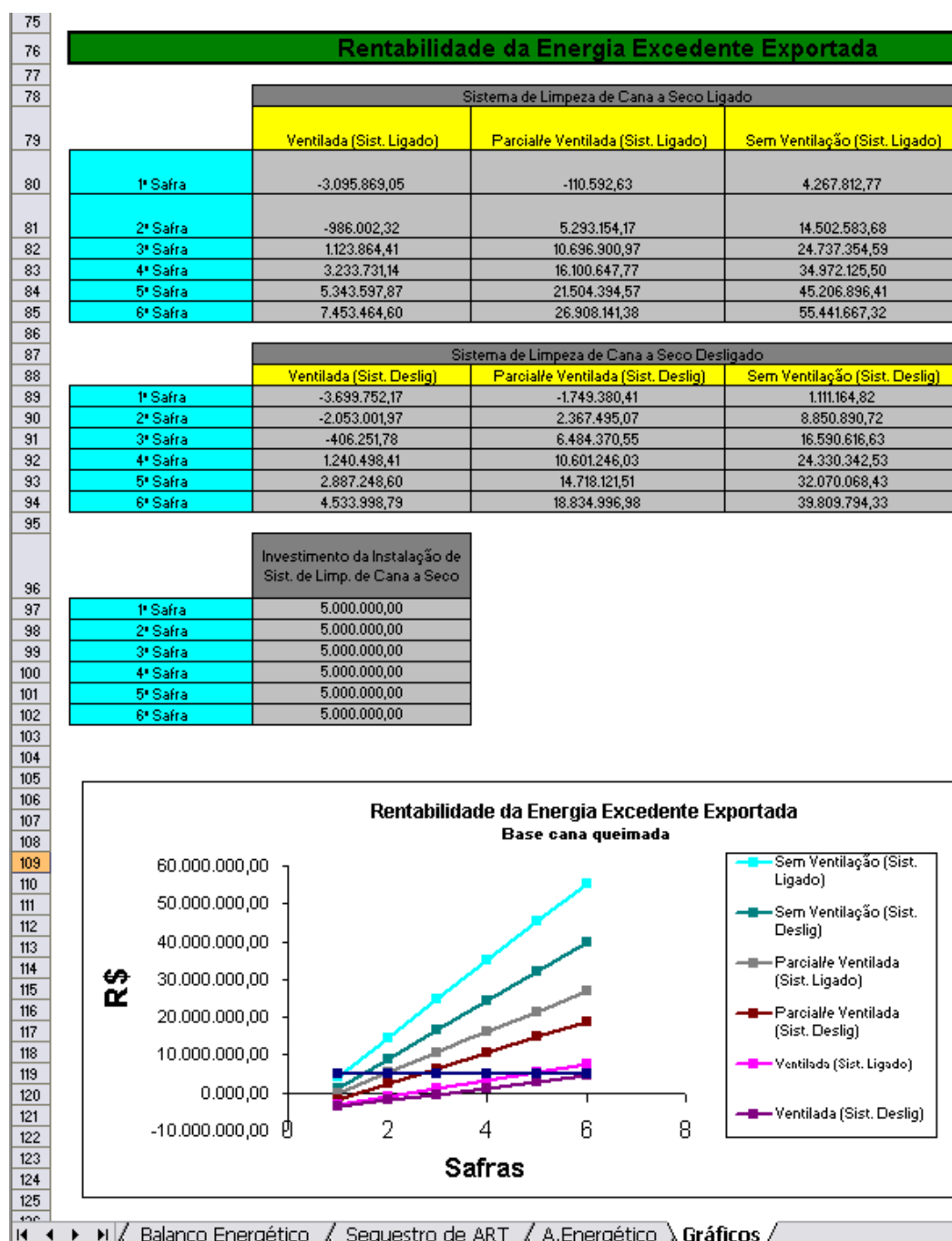


Figura B.19 – Rentabilidade da energia comercializada com a introdução da palha na indústria.

Desta forma finaliza-se o programa desenvolvido para a análise da viabilidade do aproveitamento da palha como combustível complementar na cogeração de energia em uma usina sucroalcooleira.

ANEXO A

Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista

ANEXO A

Protocolo Agro-Ambiental do Setor Sucroalcooleiro Paulista

A.1 Definição

O Protocolo Agroambiental assinado pelo Governador de São Paulo, pelos Secretários de Estado de Meio Ambiente e de Agricultura e pelo presidente da União da Indústria Sucroalcooleira (UNICA), faz parte do Programa Etanol Verde, um dos 21 projetos estratégicos da Secretaria do Meio Ambiente (SMA).

O Protocolo visa premiar as boas práticas do setor sucroalcooleiro através de um certificado de conformidade e outros benefícios através de sua publicidade ao mercado do certificado concedido ao produtor e renovável periodicamente, o Protocolo determina um padrão positivo a ser seguido.

Em fase de operacionalização e aplicação em larga escala em todo o Estado, o instrumento cobre alguns dos principais pontos de redução de impactos da cultura, como a antecipação dos prazos de eliminação da queima da palha da cana, a proteção de nascentes e dos remanescentes florestais, o controle das erosões e o adequado gerenciamento das embalagens de agrotóxicos.

A.2. Objetivos

O objetivo principal do Projeto Ambiental Estratégico Etanol Verde é desenvolver tratativas com o setor sucroalcooleiro de forma diferenciada da imposta pelo órgão ambiental em seu histórico. Estimulando a produção sustentável de etanol respeitando os recursos naturais, controlando a poluição, com responsabilidade social; certificar empresas sucroalcooleiras, que aderirem a protocolo de conduta agroambiental, com acompanhamento periódico.

Definindo de forma clara e concisa padrões positivos possíveis e monitoráveis a serem seguidos pelos produtores de açúcar e álcool, diferentemente das ações de comando e controle utilizadas pelos órgãos ambientais sem muito sucesso nas últimas décadas. Também são ações do projeto, articular e subsidiar o órgão licenciador nos procedimentos de licenciamento e na padronização de dados sobre a biodiversidade e informações enviadas nos estudos ambientais.

O Protocolo define diretrizes técnicas ambientais a serem implementadas pelas Unidades Agroindustriais aderentes, sendo muitas das diretrizes impostas aos aderentes mais restritivas que a legislação ambiental aplicável no Estado de São Paulo.

A.3 Benefícios Esperados

Estima-se que no ano 2014 haverá no Estado de SP cerca de 7 milhões de hectares de cana plantada. Dessa área, cerca de 5,9 milhões de hectares serão em áreas mecanizáveis. Os restantes 1,1 milhões de hectares estarão em áreas não-mecanizáveis, com declividade acima de 12 %. Sem o Protocolo e atendendo à Lei 11.241 de 2002, teríamos no ano 2014 ainda 3,83 milhões de hectares sendo queimados. Com o Protocolo, toda a área mecanizável será colhida crua, sem queima. Da área total, haverá queima em apenas 440 mil hectares, ou menos.

O protocolo também induz em conjunto com os outros instrumentos da SMA-SP uma redução na utilização de água no processo industrial normatizando o uso de água para no máximo 1 m³ de água por tonelada de cana de açúcar moída.

Outro ponto positivo desencadeado pelo Protocolo Agroambiental é o compromisso das unidades agroindustriais quanto à recuperação de suas áreas de mata ciliar, juntos, os aderentes do Protocolo Agroambiental somam uma área de 140 mil hectares de mata ciliar a ser recuperada até 2017, essa somatória significa uma proteção de mais de 23 mil quilômetros de cursos d'água e equivale ao plantio de mais de 22 milhões de mudas, algo nunca antes proposto por nenhum setor agropecuário.

A.4 Diretrizes para os Produtores e Agroindústrias

Os produtores agrícolas e indústrias de cana de açúcar, para a obtenção do Certificado de Conformidade Agro-Ambiental, devem aderir aos termos do Protocolo de Cooperação e atenderem as Diretivas Técnicas abaixo descritas e esclarecidas.

Diretiva a: *Antecipar, nos terrenos com declividade até 12 %, o prazo final para a eliminação da queimada da cana de açúcar, de 2021 para 2014, adiantando o percentual de cana não queimada, em 2010, de 30 % para 70%.*

Diretiva b: *Antecipar, nos terrenos com declividade acima de 12 %, o prazo final para a eliminação da queimada da cana de açúcar, de 2031 para 2017, adiantando o percentual de cana não queimada, em 2010, de 10 % para 30 %.*

As áreas correspondentes aos percentuais mínimos de redução da queima da palha de cana, em áreas próprias, arrendadas ou em parceria, devem ser calculadas separadamente, respectivamente, para as áreas com declividade de até 12 % e as áreas com declividade superior a 12 %. Até 2014, será permitida que a área total de redução, correspondente à soma das duas áreas calculadas separadamente, seja alocada livremente, independentemente da declividade do terreno. A partir de 2014, por outro lado, a redução da queima em áreas com declividade até 12 % deverá, necessariamente, corresponder a 100 %.

Diretiva c: *Não utilizar a prática da queima da cana de açúcar para fins de colheita nas áreas de expansão de canaviais.*

Consideram-se áreas de expansão as novas áreas de cultivo de cana de açúcar cujo plantio for efetuado a partir de 1º de novembro de 2007 e que implique aumento de área em relação à safra anterior, ou seja, somente será computada como expansão a área incremental de cana em relação à área cultivada pela unidade produtora na safra anterior. Assim, não serão consideradas áreas de expansão os novos plantios que forem realizados apenas para substituir áreas que

deixaram de produzir cana para a unidade produtora.

Diretiva d: *Adotar ações para que não ocorra a queima a céu aberto, do bagaço de cana, ou de qualquer outro subproduto da cana de açúcar.*

Implantar procedimentos internos visando a garantir o cumprimento dessa determinação.

Diretiva e: *Proteger as áreas de mata ciliar das propriedades canavieiras, devido à relevância de sua contribuição para a preservação ambiental e proteção à biodiversidade.*

Adotar medidas de caráter preventivo e corretivo, para evitar e combater a queima acidental das matas ciliares sob domínio da usina, tais como: manter aceiros com no mínimo 6 metros de largura, entre a cultura e as matas ciliares, conforme Artigo 5º do Decreto Estadual nº 47.700, de 11 de março de 2003. Inspeccionar e manter os aceiros isentos de matérias carburantes, mantendo-se cobertura vegetal rasteira onde for necessário.

Manter brigada de combate a incêndio no momento da queima da palha da cana com no mínimo um veículo equipado com tanque de combate a incêndios e equipe treinada para essa finalidade. Vigiar a área de cana, e as matas ciliares próximas, para acionamento rápido de brigada própria de combate a incêndio e do corpo de bombeiro municipal para combater eventual fogo acidental.

Além dessas medidas, adotar outras de natureza preventiva como colocação de placas visando à orientação e educação ambiental e de alerta sobre a proibição de caça e captura de animais silvestres. Por ocasião da SIPAT, realizar palestras visando à educação ambiental de proteção da fauna e flora e da importância da proteção e recuperação das matas ciliares.

Apresentar o mapeamento das áreas de matas ciliares existentes nas áreas próprias e arrendadas. Informar, ainda, se a indústria possui algum plano ou projeto, voluntário, de recuperação de matas ciliares em andamento ou em planejamento.

Diretiva f: *Proteger as nascentes de água das áreas rurais do empreendimento canavieiro, recuperando a vegetação ao seu redor.*

Adotar as medidas de proteção já descritas na Diretiva 'e' para a proteção das matas ciliares. No caso de nascentes em áreas próprias da usina, cuja vegetação das APPs estejam degradadas, favorecer a regeneração dessas num raio mínimo de 50 metros das nascentes e "olhos d'água", mesmo que intermitentes, conforme definido no Código Florestal, de forma a recuperá-las num percentual mínimo recomendado de 10 % ao ano.

Diretiva g: *Implementar Plano Técnico de Conservação do Solo, incluindo o combate à erosão e a contenção de águas pluviais nas estradas internas e carreadores.*

O plano de combate à erosão deverá considerar o tipo de solo, a declividade do local, a época de preparo do solo e de plantio, as práticas de cultivo e as condições climáticas em termos de distribuição e intensidade das chuvas. O plano deve identificar os tipos de terraços utilizados (embutido, invertido, base larga, etc.) e os espaçamentos adotados. O espaçamento entre terraços poderá ser flexibilizado em função da adoção de práticas vegetativas de conservação do solo, dentre elas, o cultivo de cultura de rotação e a cobertura do solo com palhiço de cana. Os terraços deverão ser dimensionados para receber e direcionar águas de estradas internas e de carreadores.

Como base para o planejamento sugere-se seguir as recomendações gerais apresentadas nos manuais de microbacias elaborados pela Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI) da Secretaria Estadual da Agricultura e Abastecimento (SAA).

Diretiva h: *Implementar Plano Técnico de Conservação de Recursos Hídricos, favorecendo o adequado funcionamento do ciclo hidrológico, incluindo programa de controle da qualidade da água e reuso da água utilizada no processo industrial.*

O Plano Técnico de Conservação de Recursos Hídricos deverá considerar as possibilidades de reuso da água e o fechamento dos circuitos principais visando uma captação mínima, tendo ainda como fato, a cobrança pelo uso de água, que impõe um valor econômico para este insumo. Além disto, deve prever o reuso dos efluentes líquidos na lavoura de cana, de modo a promover a irrigação de

salvamento das soqueiras, evitando-se novas captações de água para este fim. O plano deve prever a medição de vazão e o controle da qualidade da água captada e utilizada.

No plano deverá ser informado o consumo específico de água, em metros cúbicos de água por tonelada de cana processada e a caracterização dos efluentes, incluindo a carga orgânica eventualmente lançada nos corpos d'água.

Diretiva i: *Adotar boas práticas para descarte de embalagens vazias de agrotóxicos, promovendo a tríplice lavagem, armazenamento correto, treinamento adequado dos operadores e uso obrigatório de equipamentos de proteção individual.*

Implementar as medidas de minimização de embalagem, e no caso de embalagens rígidas, promover a tríplice lavagem. Manusear e aplicar os defensivos com pessoas devidamente treinadas utilizando os EPIs específicos, conforme recomendado pela NR-31 do Ministério do Trabalho e Emprego.

Proceder ao armazenamento e destinação final adequada das embalagens de agrotóxico, enviando as tríplexes lavadas para unidade de recebimento de embalagens de defensivos agrícola para reciclagem licenciada pela CETESB, e também, conforme o caso, o reenvio das embalagens e produtos vencidos num prazo de um ano aos respectivos fabricantes ou distribuidores, conforme regulamenta a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, alterado pela Lei nº 9.974 de 06 de junho de 2000.

Diretiva j: *Adotar boas práticas destinadas a minimizar a poluição atmosférica de processos industriais e otimizar a reciclagem e o reuso adequados dos resíduos gerados na produção de açúcar e etanol.*

As caldeiras cujas Licenças de Instalação forem solicitadas após 01 de janeiro de 2007 devem obedecer à Resolução CONAMA nº 382 de 26 de dezembro de 2006 no que se refere à emissão de poluentes. Os poluentes controlados para as caldeiras a bagaço de cana são materiais particulados (MP) e óxidos de nitrogênio (NOx). O monitoramento deverá ser realizado bi-anualmente, conforme Termo de Referencia para o PMEA (Plano de Monitoramento de Emissões Atmosféricas) da CETESB – Março 2005. Para as caldeiras existentes, informar o sistema de controle

adotado para redução das emissões de particulados e outros poluentes atmosféricos regulamentados e os planos estratégicos de redução dessas emissões, se existirem.

Implementar o uso racional da vinhaça visando a fertirrigação da lavoura de cana, atendendo plenamente a NT CETESB P4.231. Adotar o uso dos resíduos orgânicos e inertes para adubação e condicionamento do solo agrícola, aplicando a torta de filtro as cinzas da caldeira e a fuligem do controle de emissões atmosféricas da combustão do bagaço, que propiciam a reciclagem de nutrientes (N P K) e melhoria das condições do solo. Retornar a terra de lavagem de cana ou da limpeza a seco para o solo agrícola. Proceder ao armazenamento e destino adequado dos resíduos perigosos (classe I) e de óleos lubrificantes.

Vale destacar que uma cópia (PDF) do documento original do protocolo, com as assinaturas das autoridades pode ser encontrada no site da SMA de São Paulo no link: <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/oquee/protocolo.pdf>.