

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Danielo José
Carvalho E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 25 / 02 / 2011

A. Walter
.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Danielo José Carvalho

**Estudo da Viabilidade Técnica de Sistemas de
Cogeração Operando Exclusivamente com
Palha de Cana**

28/2011

Danilo José Carvalho

Estudo da Viabilidade Técnica de Sistemas de Cogeração Operando Exclusivamente com Palha de Cana

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. ° Dr. Arnaldo César da Silva Walter.

Campinas

2011

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

C253e Carvalho, Danilo José
Estudo da viabilidade técnica de sistemas de
cogeração operando exclusivamente com palha de cana /
Danilo José Carvalho. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Arnaldo César da Silva Walter.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Palha - Utilização. 2. Incrustações. 3. Energia
elétrica - Cogeração. I. Walter, Arnaldo César da Silva.
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Technical assessment of cogeneration systems using only
sugarcane trash as fuel

Palavras-chave em Inglês: Straw - Utilization, Fouling, Electricity - Cogeneration

Área de concentração: -

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Joaquim Eugênio Abel Seabra, Ricardo Alan Verdú Ramos

Data da defesa: 25/02/2011

Programa de Pós Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

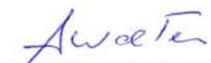
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Estudo da Viabilidade Técnica de Sistemas de
Cogeração Operando Exclusivamente com
Palha de Cana**

Autor: Danilo José Carvalho
Orientador: Arnaldo C. S. Walter

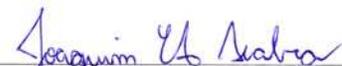
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter, Presidente.
Instituição: FEM-UNICAMP



Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos.
Instituição: FEIS-UNESP – Ilha Solteira



Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
Instituição: FEM-UNICAMP

Campinas, 25 de fevereiro de 2011

Dedico este trabalho a minha querida mãe.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me manter sempre perseverante diante dos desafios da vida.

Aos meus pais, a minha mãe e querida irmã Danúbia, pelo apoio e amor incondicional ao longo de toda vida.

Ao professor Arnaldo César da Silva Walter, pela orientação, confiança e pelo exemplo de profissionalismo e generosidade ao longo deste trabalho.

Aos amigos queridos que estiveram me apoiando ao longo desses anos, em especial aos amigos de todos os dias: Hugo-Pinto, Flávio, Chris, Bigato, Louis, Jhow, Luiz Gómez, Brady, Mormaço, Pedu, Baca, Kéteri, Edilene, Gabi, Yara, e Mari. E também aos amigos: Jéssica, Ana Carolina, Marco Antônio, Glauber, Gustavo, Alex, Jonathan, Alaíse, Bruna, Elisa, Regiane e Neusa, que estiveram presentes de forma especial em diversos momentos.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

A Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio e financiamento da pesquisa.

Resumo

Atualmente, os sistemas de cogeração das usinas de açúcar e etanol operam com o bagaço de cana disponível, mas há perspectivas de que no futuro seja possível a produção de etanol a partir da sua hidrólise, devido à grande disponibilidade nas usinas e a seu baixo custo. Há, então, interesse na análise da operação dos sistemas de cogeração utilizando apenas a palha da cana, cuja disponibilidade aumenta na medida em que avança a colheita mecanizada. Ocorre que a palha é uma biomassa potencialmente problemática se a geração de vapor ocorrer a temperaturas elevadas, podendo haver a formação de depósitos, incrustações e corrosão das superfícies de troca térmica. Os pré-tratamentos convencionais impõem a lavagem da biomassa, para redução da concentração de alguns inorgânicos críticos, mas tal alternativa não é adequada dos pontos de vista ambiental, econômico e energético. Nesta dissertação foram consideradas duas configurações alternativas dos sistemas de cogeração. No Caso 1, que corresponde a uma solução elementar e mais segura, a geração de vapor ocorre a temperaturas abaixo de 400°C, e a pressões compatíveis. Já no Caso 2, a geração de vapor só com queima da palha ocorre a pressões elevadas, mas sempre com temperaturas abaixo de 400°C, e o superaquecimento externo do vapor é feito com queima do biogás produzido no processo de biodigestão da vinhaça. Em ambos os casos foram impostas condições de contorno que correspondem à disponibilidade máxima de palha de cana (50% da existente no campo), necessidade de atendimento da demanda de vapor de processo, e geração de eletricidade para, no mínimo, garantir a auto-suficiência da unidade industrial. O Caso 2 tem vantagens em um contexto em que há necessidade de produção de eletricidade excedente e quando a opção é economicamente viável. A análise de viabilidade econômica não era objetivo desta dissertação. A produção de eletricidade excedente no Caso 2 é considerável, tendo em conta a baixa disponibilidade de biomassa, mas os resultados podem ser melhorados, já que não foi feita a otimização do sistema do ponto de vista termodinâmico.

Palavras chave: palha da cana, depósitos, incrustações, cogeração, hidrólise.

Abstract

Currently, the cogeneration systems installed in sugarcane mills operate only burning sugarcane bagasse but in the future this biomass can be used as raw material for the production ethanol through the hydrolysis. Sugarcane bagasse has been considered for hydrolysis due to its availability at the mill site and to its lower cost. As consequence, there is interest on assessing cogeneration systems only burning sugarcane trash, also because its availability is increasing due to the continuous growth of the mechanized harvesting. However, burning sugarcane trash could be problematic if steam is raised at high temperatures, and operational problems as slagging, fouling and corrosion of the heat transfer surfaces are predicted. The conventional pre-treatment for reducing the concentration of critical inorganic components are mostly based on leaching; this process seems inadequate from an environmental, economic and energetic point of view. In this dissertation two alternative cogeneration systems were analyzed. The so-called Case 1 is a basic solution that allows the reduction of operational risks, in which steam is raised at temperatures below 400°C and at compatible pressures. In Case 2 steam is raised at temperatures below 400°C but at high pressures, and is subsequently superheated outside the boiler, using as fuel the biogas produced from vinasse biodigestion. In both cases the conditions imposed are: maximum sugarcane trash availability corresponds to 50% of the amount available at the field, before harvesting; steam demand shall be always matched; and electricity production should be enough, at least, for matching the industrial demand. Case 2 has advantages in case surplus electricity is necessary and in case of economic feasibility, but this was not an aim in this dissertation. Surplus electricity in Case 2 can be considered significant, taking into account the constraints regarding sugarcane availability. Case 2 results could be improved as the analyzed cogeneration system was not optimized from a thermodynamic point of view.

Keywords: sugarcane trash, fouling, slagging, corrosion, hydrolysis.

Lista de Figuras

2.1. Sistema de recolhimento e embalagem da palha no campo avaliado pelo CTC	06
2.2. Câmaras de sopragem instaladas para separação de folhas ao longo das esteiras de transporte da cana	07
2.3. Esquema simplificado de operação da planta de cogeração de BIOWANZE	39
3.1. Esquema do sistema de cogeração do caso 1 modelado no programa Cycle-Tempo	44
3.2. Janela de entrada de dados de aparelho	45
3.3. Visualização dos parâmetros termodinâmicos calculados no <i>software</i> Cycle-Tempo	51
4.1. Resultados da simulação – Fluxo de vapor disponível na entrada do processo	57
4.2. Resultados da simulação – Temperatura do fluxo de vapor de baixa pressão a 2,5 bar na entrada do processo	57
4.3. Resultados da simulação – Potência elétrica gerada	59
4.4. Resultados da simulação – Temperatura do fluxo de vapor resultante da expansão a 2,5 bar	65
4.5. Resultados da simulação – Caso 2, consumo de biogás em função da temperatura do vapor gerado	67
4.6. Resultados comparativos da geração de potência elétrica obtida com a utilização do biogás como combustível auxiliar na geração de vapor	69
4.7. Potencial de geração de potência elétrica e de excedente para diferentes níveis de produção, com geração de vapor a 100 bar/430 °C	70
4.8. Comparativo entre a geração de potência no caso 1 e no caso 2	71
4.9. Comparativo entre a geração de vapor no caso 1 e no caso 2	72

Lista de Tabelas

2.1	Dados de umidade, teor de cinzas e poder calorífico superior de algumas biomassas	8
2.2	Análise elementar e teor de cinzas de amostras de carvão e de algumas biomassas	9
2.3	Análise mineral da cinza em peso (%) de alguns combustíveis	10
2.4	Análise imediata dos componentes da palha da cana e do bagaço em base seca	12
2.5	Análise elementar para cada parte constituinte da palha e para o bagaço de cana	13
2.6	Composição da cinza dos constituintes da palha e do bagaço de cana em base seca	13
2.7	Análise elementar e teor de cinzas de amostras de palha e bagaço de cana em base seca	14
2.8	Composição das cinzas de diferentes amostras de palha em base seca	15
2.9	Composição das cinzas de alguns combustíveis herbáceos	16
2.10	Constituição química das cinzas e valores a partir das correlações de fusibilidade das cinzas para queima da mistura de palha de trigo e carvão mineral	22
2.11	Composição química da cinza e valores calculados a partir das correlações de fusibilidade para queima da palha da cana	23
2.12	Índices de fusibilidade da cinza comparando o comportamento de palha de cana e de outras biomassas	24
2.13	Índice de álcalis calculado para diferentes composições de palha de cana	26
2.14	Comparativo entre os índices de álcalis calculados para composições da palha de cana e outras biomassas críticas	27
2.15	Composição química de amostras de cinza em suspensão e cinza de fundo de palha de trigo	29
2.16	Concentração de cinzas em amostras de palha tratadas e não tratadas	33
2.17	Composição elementar das cinzas de palha tratada e não tratada	34
2.18	Características dos pré-tratamentos realizados em amostras de palha de cana de açúcar	35
2.19	Resultados dos diferentes métodos de pré-tratamento de amostras de palha de cana	36
2.20	Parâmetros operacionais da planta de cogeração de BIOWANZE	38
3.1	Parâmetros considerados na caracterização de uma unidade típica do sucro-alcooleiro	40
3.2	Parâmetros operacionais da planta de hidrólise	43
3.3	Parâmetros adotados no procedimento de simulação	47
3.4	Poder calorífico de bagaço e palha de cana de acordo com umidade absoluta	49
3.5	Parâmetros do sistema de biodigestão de vinhaça	50
4.1	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 20 bar e temperaturas abaixo de 400°C	54
4.2	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 25 bar e temperaturas abaixo de 400°C	54

4.3	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 30 bar e temperaturas abaixo de 400°C	54
4.4	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 35 bar e temperaturas abaixo de 400°C	55
4.5	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 40 bar e temperaturas abaixo de 400°C	55
4.6	Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 45 bar e temperaturas abaixo de 400°C	55
4.7	Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 82 bar e temperaturas abaixo de 400°C	62
4.8	Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 90 bar e temperaturas abaixo de 400°C	63
4.9	Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 100 bar e temperaturas abaixo de 400°C	63
4.10	Resultados das simulações – Temperatura do vapor após o superaquecedor	63
4.11	Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 82bar	66
4.12	Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 90bar	66
4.13	Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 100bar	66
4.14	Resultados simulação – Comparativo entre os casos considerando a geração de vapor a partir da utilização de biogás como combustível extra	69

Lista de Abreviaturas e siglas

Letras Latinas

A – ácido

B – básico

R – razão

Z – fração térmica de biomassa na mistura de combustíveis

Y – fração em massa de biomassa na mistura de combustíveis.

.....

Subscritos

R – viscosidade da escória

s – teor de enxofre

.....

Abreviações

F-L-P_u – Água fria, longo tempo de tratamento, palha de cana pulverizada.

F-C-P_u – Água fria, curto tempo de tratamento, palha de cana pulverizada

F-L-P_i – Água fria, longo tempo de tratamento, palha de cana picada.

F-C-P_i – Água fria, curto tempo de tratamento, palha de cana picada.

LA – Índice de álcalis

PCS – Poder calorífico superior

Q-C-P_i – Água quente, curto tempo de tratamento, palha de cana picada.

Q-C-P_u – Água quente, curto tempo de tratamento, palha de cana pulverizada.

Q-L-P_i – Água quente, longo tempo de tratamento, palha de cana picada.

Q-L-P_u – Água quente, longo tempo de tratamento, palha de cana pulverizada.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Palha da Cana e seu Aproveitamento como Combustível	5
2.1.1 Propriedades da biomassa e suas características como combustível	8
2.1.2 Características da Palha da Cana	10
2.2 Problemas na Combustão	16
2.2.1 Formação de Escórias e Incrustações em Fornalhas	17
2.2.2 Fusibilidade das Cinzas e suas Correlações	18
2.2.3 Formação de depósitos e corrosão em superfícies de caldeiras a biomassa	27
2.3 Alternativas para redução dos problemas da combustão da palha	31
2.3.1 Processo de remoção de impurezas da palha	31
2.3.2 Geração de vapor em alta pressão e baixa temperatura com superaquecimento externo	36
3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	39
3.1 Unidade Convencional de Produção de Etanol	39
3.2 Procedimento de Simulação	42
3.3.1 Cycle-Tempo	42
3.3.2 Configurações	44
3.3 Caso estudado – uso exclusivo da palha de cana	47
Caso 1 – Redução da temperatura do vapor gerado	47
Caso 2 – Superaquecimento externo do vapor gerado	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Caso 1: Redução da temperatura do vapor gerado	51
4.2 Caso 2: Superaquecimento externo do vapor gerado	58
4.3 Resultados de ações de otimização do Caso 2	65
4.4 Comparativo entre o caso 1 e o caso 2	68
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	75
REFERÊNCIAS	78
ANEXO A	81

Capítulo 1

Introdução

Até o presente, o aproveitamento energético dos resíduos da cana-de-açúcar ocorre de forma pouco eficiente em relação ao potencial energético existente. No processamento da cana-de-açúcar é gerada uma expressiva quantidade de biomassa residual e há excelentes oportunidades para o uso dessa como combustível. Até o momento, apenas o bagaço da cana é utilizado energeticamente, e o uso tanto da palha quanto da vinhaça tem sido irrelevante.

A geração elétrica nas usinas de açúcar e álcool poderia ser ampliada pela utilização de sistemas de conversão de energia mais eficientes, e também pelo uso da palha da cana como combustível, a qual atualmente é queimada antes da colheita, ou é deixada no campo, para proteção da planta e do solo. Nos últimos anos houve avanços na colheita mecanizada da cana, como também nos procedimentos de coleta e transporte da palha da cana para a usina. Entretanto, ainda serão necessários desenvolvimentos adicionais e investimentos em novas tecnologias, inclusive de limpeza da cana.

Há ainda a necessidade de se ter técnicas mais adequadas para o adequado tratamento da palha. As técnicas empregadas visam a remoção de impurezas, principalmente terra que é transportada junto com a cana e a palha e, em alguns casos, a redução do teor de cinzas e o controle da umidade. As técnicas aplicadas com melhores resultados envolvem processos de separação e limpeza a seco (*Hassuani, 2005*).

O bagaço, que no presente é utilizado quase que totalmente como combustível nas usinas, no futuro poderá ser usado como matéria prima na produção de mais etanol via a hidrólise de sua celulose. A produção de etanol por hidrólise de biomassa celulósica é uma das rotas dos chamados biocombustíveis de segunda geração. Há pesquisas no Brasil objetivando a produção de etanol por hidrólise do bagaço de cana (*Dias, 2008*).

O processo de produção via hidrólise requer o pré-tratamento da biomassa, conversão da celulose em açúcares fermentescíveis, e a posterior produção de etanol pela rota tradicional, através da fermentação, conversão em etanol e destilação. No processo há a separação da lignina, material polimérico que apresenta boas propriedades como combustível. Como consequência, a lignina poderia ser aproveitada como combustível nas caldeiras, para geração de vapor, suprimindo

a demanda extra de vapor do processo e cobrindo o possível déficit de combustível para alimentação das caldeiras (Pitarello, 2007).

A produção de etanol a partir da hidrólise de materiais lignocelulósicos tem sido estudada com grande interesse há muitos anos, mas sua produção em escala comercial ainda não é economicamente viável. Estudos relativos à integração energética do novo processo ao processo convencional, a integração de operações unitárias, o aumento do rendimento das reações de hidrólise e o aproveitamento completo de todas as frações do bagaço são necessários para viabilizar a produção eficiente via hidrólise (Pitarello, 2007).

O foco desta dissertação é a análise da produção de eletricidade em uma planta convencional de etanol, integrada a uma planta de produção por hidrólise do bagaço de cana, operando apenas com palha de cana como combustível para geração de vapor. No caso, o bagaço seria empregado como matéria prima na produção de etanol por hidrólise e, em condições ideais, todo o bagaço seria destinado para essa finalidade. Como combustível, a palha tem propriedades bastante distintas das do bagaço, e há grande probabilidade de que problemas de formação de depósitos nas superfícies de troca térmica, e mesmo de corrosão, inviabilizem a geração de vapor nas mesmas condições em que ocorre a combustão do bagaço.

Nesta dissertação foram estudadas duas configurações dos sistemas de potência que queimariam exclusivamente palha de cana. As configurações foram concebidas para que os problemas acima mencionados possam ser evitados, e foram definidas a partir de informações obtidas na literatura, as quais indicam a alternativa de geração de vapor em menores níveis de temperatura como meio de se evitar a indesejável formação de depósitos nas superfícies de troca de calor. Foram considerados parâmetros de uma destilaria autônoma convencional de produção de etanol e parâmetros de uma unidade integrada de produção de etanol por hidrólise, que deveria operar anexa à primeira. Parâmetros de demanda térmica e elétrica, e de disponibilidade de biomassa (bagaço, palha e vinhaça) foram considerados na definição dos casos. Os sistemas de potência foram analisados a partir da simulação de sua operação, com uso do software Cycle-Tempo.

O principal objetivo da dissertação é analisar a viabilidade técnica de duas alternativas de geração de potência elétrica em sistemas de cogeração que usam unicamente palha como combustível. Como mencionado, as condições de operação impostas são tais que, em princípio,

seriam evitadas as formas mais severas de deposição nas superfícies de troca térmica dos geradores de vapor.

Na definição dos sistemas e nas simulações foram impostas algumas condições de contorno, tais como a quantidade máxima de palha que pode ser utilizada como combustível nas usinas, uma vez que uma fração deverá ser deixada no campo. Também foi imposta a necessidade de que a geração elétrica seja no mínimo suficiente para atender a demanda da própria indústria, e que a demanda de vapor de processo não precise ser drasticamente reduzida.

O primeiro caso considerado corresponde à redução da temperatura do vapor gerado, com o objetivo de impedir os problemas adversos acima mencionados. Tal procedimento é usual em geradores de vapor que queimam biomassa com alto teor de álcalis e, em geral, a temperatura do vapor gerado é inferior a 400°C. Na simulação dessa configuração foram considerados sistemas de cogeração com turbinas a vapor de contra pressão, com vapor gerado em pressões compatíveis com as temperaturas consideradas.

O segundo caso considerado consiste na geração de vapor a temperaturas iguais ou inferiores a 400°C no gerador de vapor, mas a pressões mais elevadas do que aquelas consideradas no primeiro caso. No gerador de vapor a palha da cana seria usada como combustível. Então, o vapor gerado seria superaquecido externamente ao gerador de vapor, até temperaturas compatíveis com o objetivo de se maximizar a geração de potência elétrica, empregando-se gás de biodigestão da vinhaça como combustível. O caso proposto tem como referência a operação da planta de cogeração da BioWanze, descrita em *Walter (2008)*.

Em todos os casos, a máxima disponibilidade de palha foi fixada em 50% da palha existente no campo, antes da colheita. A geração de potência elétrica deve ao menos assegurar a auto-suficiência da unidade industrial, e a demanda de vapor de processo, no processo convencional, não pode ser inferior a 300 kg de vapor por tonelada de cana,

Esta dissertação está dividida em quatro capítulos, descritos a seguir:

No Capítulo 2 é feita a revisão da literatura sobre as propriedades da biomassa como combustível, e da palha da cana, em particular. São apresentados estudos sobre a influência do teor de álcalis nas condições de queima da biomassa como combustível, e também a sua influência no processo de formação de incrustações e de corrosão das tubulações das caldeiras. Também são apresentadas algumas alternativas para redução dos efeitos adversos da combustão de biomassa de má qualidade em geradores de vapor.

No Capítulo 3 é feita a caracterização das soluções propostas e que são objeto de análise nesta dissertação. São apresentadas as hipóteses consideradas, e as configurações simuladas no programa computacional.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das simulações e esses são analisados segundo as condições de contorno impostas. Também é feita a análise comparativa dos dois casos objeto de estudo.

Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta dissertação, e sugestões para trabalhos futuros no tema.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1 Palha da cana-de-açúcar e seu aproveitamento como combustível

Dentre as atividades que compõem o pré-processamento da cana-de-açúcar, destacam-se os processos de colheita, limpeza e transporte da cana para a usina. Nesses processos podem ser geradas significativas quantidades de resíduos, que são rejeitados ou queimados na própria lavoura, configurando, do ponto de vista energético, uma perda de parte significativa da energia contida na biomassa.

A operação de colheita da cana pode ser feita manualmente ou utilizando-se colhedoras mecânicas. No caso da colheita manual é necessário realizar a prévia queima da cana, pois as folhas da planta podem ferir os trabalhadores rurais, além de aumentar a probabilidade de acidentes. Atualmente, em cerca de 40% da área plantada no estado de São Paulo ainda se utiliza a colheita manual da cana (*UDOP, 2010*).

Os canaviais são queimados como prática de pré-colheita, apesar de existir legislação que proíbe tal prática em locais próximos a centros urbanos (*Ripoli, 2002*). Abandonando-se essa prática, o palhiço (ou seja, ponteiros, folhas verdes e palhas) remanescente sobre o terreno, e decorrente da colheita mecanizada, poderia ser recolhido e utilizado como combustível em sistemas de cogeração de usinas e destilarias. O palhiço não recolhido será matéria vegetal remanescente no solo e permitirá a reposição de nutrientes e a proteção da planta e do solo.

De acordo com a lei estadual nº 11.241 de 19 de setembro de 2002 (São Paulo, 2002), estabeleceu-se a gradativa eliminação da queima da palha nos canaviais, potencialmente intensificando a quantidade de resíduos gerados na lavoura. Foi definido que a eliminação deve ser gradativa de modo que, até 2006, 30% da queima deveria ter sido eliminada. De acordo com a lei, a eliminação total da queima da palha da cana em áreas mecanizáveis deveria ocorrer até 2021, mas, em acordo firmado entre as usinas e o governo do estado, em 2007, a meta de eliminação da queima da palha da cana deve ocorrer até 2014 (*UDOP, 2010*).

A quantidade de palha disponível no campo varia com a idade da cana plantada, o número de cortes, a variedade da planta, e com as condições edafo-climáticas. Estima-se que em base

seca sua disponibilidade seja igual a do bagaço, ou seja, 12% a 18% da massa da parte aérea da planta. Considerada a umidade da palha, a quantidade varia de 15 a 30% da massa da planta (Ripoli, 2002).

Há diferentes alternativas para o recolhimento da palha no campo, durante ou após a colheita. Algumas técnicas preliminares para recuperação dos resíduos remanescentes da colheita da cana não queimada no campo foram propostas e avaliadas, através de pesquisas realizadas pelo Centro de Tecnologia Canavieira - CTC (Hassuani et al. 2005). Foram consideradas as vias de colheita, carregamento e transporte da cana e da palha não queimada para a usina, tanto da cana colhida manualmente quanto também da colheita mecanizada, com as alternativas de transporte da cana inteira e da cana picada.

No estudo do CTC foram analisadas duas vias de colheita e de transporte da cana inteira; (1) colheita da cana sem separação da palha no campo, transporte da cana e da palha até a usina, com separação em uma estação de limpeza; (2) colheita da cana realizando a limpeza e a separação da palha ainda no campo, transporte da cana limpa para a usina, sendo a palha embalada e transportada para a usina. Foram analisadas duas alternativas: (1) colheita da cana com limpeza no campo, transporte da cana limpa para a usina, empacotamento e transporte da palha para a usina; (2) colheita da cana com carregamento e transporte da palha juntamente com cana até a usina, efetuando a limpeza da cana e recuperação da palha na usina. Na Figura 2.1 são ilustrados sistemas de recolhimento e embalamento da palha no campo.



Fonte: (Hassuani et al. 2005).

Figura 2.1. Sistema de recolhimento e embalamento da palha no campo avaliado pelo CTC.

Os esforços para o desenvolvimento de uma unidade de separação e limpeza da cana a seco, nas instalações industriais, conduziram ao projeto de uma estação com a função principal de

separação das impurezas vegetais (palha) e das impurezas minerais (contaminação do solo). Testes indicaram que somente o processamento de cana originada da colheita mecanizada, ou cana picada, seria operacionalmente viável. Os resultados de eficiência apresentados pelo processo de limpeza e separação na estação indicaram que pode-se atingir uma redução de 55% a 60% do total das impurezas vegetais (palha) da cana em base seca, dependendo do tipo de cana processada, e redução de 45% a 72% do percentual total de impurezas minerais da cana (*Hassuani et al. 2005*). Na Figura 2.2 é apresentado o equipamento do sistema de separação e limpeza da cana na usina, desenvolvido e instalado pelo CTC.



Fonte: (*Hassuani et al. 2005*).

Figura 2.2. Câmaras de sopragem instaladas para separação de folhas ao longo das esteiras de transporte da cana.

Os sistemas de recuperação dos resíduos da colheita da cana têm restrições relacionadas aos custos de transporte e recolhimento e, também, devido aos potenciais benefícios agronômicos de se manter parte dos resíduos da colheita no campo, para a proteção e recuperação de nutrientes do solo. O desenvolvimento de equipamentos para viabilizar o recolhimento dos resíduos permitiu a compactação dos mesmos, através do enfardamento em unidades uniformes, reduzindo os custos de transporte. Melhorias e novos projetos conduziram a diferentes modelos de equipamentos e distintos padrões de desempenho. Aspectos importantes do sistema de compactação são a densidade do fardo, sua forma e suas dimensões, para que seja otimizado o transporte e facilitado o empilhamento (*Hassuani et al. 2005*).

Para que a palha possa ser utilizada como combustível nas usinas, principalmente em substituição ao bagaço, é preciso que seja pré-processada. A palha disponível na usina, antes do processamento, deve ter maiores dimensões e baixa densidade. Um sistema de alimentação convencional de geradores de vapor, que opera com bagaço, requer que o combustível esteja em

partículas de certas dimensões, e tenha densidade adequada. Isso sugere que a palha seja triturada. Assim, poderia ser utilizado o sistema convencional de alimentação, e o gerador de vapor poderia operar tanto com bagaço quanto com palha (*Hassuani et al., 2005*). Também é importante que os geradores de vapor de leito fluidizado operem adequadamente com a palha, pois são equipamentos de maior eficiência.

2.1.1 Propriedades da biomassa e suas características como combustível

Entre as biomassas que são comumente utilizadas como combustível existem significativas diferenças de composição quanto aos constituintes inorgânicos, que são responsáveis pela intensificação dos problemas críticos de formação de incrustações e de deposições, típicos em geradores de vapor. Metais alcalinos e alcalinos terrosos, em combinação com outros elementos do combustível, como a sílica e o enxofre, em processos que são intensificados pela presença de cloro, causam a formação de depósitos e o desgaste das superfícies de troca térmica (*Dermibas, 2005*).

Em comparação com outros combustíveis, a biomassa difere em muitos aspectos, incluindo as propriedades orgânicas, inorgânicas e o conteúdo energético. Em comparação com os combustíveis fósseis, a biomassa apresenta menor teor de carbono (C), maior teor de sílica e de potássio (K) e apresenta, também, menor poder calorífico, alto teor de umidade e menor densidade. Além disso, algumas biomassas, como a palha, possuem teor de cloro (Cl) superior ao do carvão mineral. Como ilustração, dados de composição química de algumas biomassas combustíveis são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Dados de umidade, teor de cinzas e poder calorífico superior de algumas biomassas combustíveis.

Biomassa	Umidade (%)	Cinzas (%)	PCS (MJ/kg)
Madeira de carvalho ¹	6,0	1,7	19,8
Casca de carvalho ¹	5,6	9,1	22,0
Palha de arroz ¹	11,2	19,2	18,7
Capim ¹	13,1	5,9	19,9
Palha de trigo ¹	6,4	8,1	19,3
Palha de cana ²	ND	9,02	17,4
Bagaço de cana ²	ND	2,2	18,1

Fonte: ¹(*Dermibas, 2005*); ²(*Hassuani, 2005*).

Nota: ND – Não definido

Como para qualquer combustível, as propriedades da biomassa podem ser classificadas em macroscópicas e microscópicas. As propriedades macroscópicas do combustível são obtidas tanto pela análise macroscópica quanto pela análise final, e incluem poder calorífico, teor de umidade, densidade, tamanho da partícula e temperatura de fusão das cinzas. As propriedades obtidas na análise microscópica incluem dados térmicos, cinéticos químicos e minerais. (Dermibas, 2005).

A título ilustrativo, dados da composição de alguns combustíveis sólidos são apresentados na Tabela 2.2. No caso das biomassas, deve ser notada a significativa diferença dos teores de cinzas, bem como de cloro. Ambos são determinantes na formação de incrustações e depósitos de cinzas transportadas pelos gases da combustão em geradores de vapor, que podem causar corrosão das superfícies.

Tabela 2.2. Análise elementar e teor de cinzas de amostras de carvão e de algumas biomassas.

Combustível	Composição (% base seca)						Cinzas
	C	H	N	O	S	Cl	
Carvão Mineral ¹	81,5	4,0	1,2	3,3	3,0	0,3	7,0
Linhito ¹	65,2	4,5	1,3	17,5	4,1	0,4	7,4
Palha de trigo ¹	42,8	5,5	0,7	35,5	0,0	1,5	15,5
Caroço de milho ¹	49,0	5,4	0,4	44,2	0,0	0,2	1,0
Haste de tabaco ¹	49,3	5,6	0,7	42,8	0,0	0,2	2,6
Casca de noz ¹	53,6	6,6	1,5	35,5	0,0	0,2	2,8
Palha de arroz ²	38,2	5,2	0,87	36,3	0,18	0,58	18,6
Bagaco de cana ²	48,6	5,8	0,16	42,8	0,04	0,03	2,4
Capim ²	46,7	5,8	0,7	37,4	0,19	0,19	8,9

Fonte: ¹(Dermibas, 2005); ²(Jenkins et al., 1998).

Em relação ao carvão mineral, a biomassa tem menos carbono (C) e mais oxigênio (O), além do alto teor de cloro (Cl) nas cinzas de algumas biomassas. O cloro é o elemento químico crítico, pois facilita a mobilidade de muitos componentes inorgânicos, em particular do potássio, que são responsáveis por reações indesejáveis. O teor de cloro afeta significativamente a formação de incrustações e a deposição de cinzas fundidas em altas temperaturas, principalmente nas superfícies de transferência de calor dos geradores de vapor. Como ilustração, a composição elementar das cinzas de algumas biomassas utilizadas como combustível é apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Análise das cinzas de alguns combustíveis, em peso (%).

(%) Óxidos	Carvão ¹	Bagaço de cana ²	Palha de arroz ²	Casca de amêndoa ²	Palha de trigo ²
SiO ₂	42,0	46,61	74,67	8,71	55,32
Al ₂ O ₃	20,0	17,69	1,04	2,72	1,88
TiO ₂	1,2	2,63	0,09	0,09	0,08
Fe ₂ O ₃	17,0	14,14	0,85	2,30	0,73
CaO	5,5	4,47	3,01	10,5	6,14
MgO	2,1	3,33	1,75	3,19	1,06
Na ₂ O	1,4	0,79	0,96	1,60	1,71
K ₂ O	5,8	0,15	12,30	48,70	25,6
SO ₃	5,0	2,08	1,24	0,88	4,40
P ₂ O ₅	-	2,72	1,41	4,46	1,26
CO ₂	-	-	-	17,38	-
Indeterminado	-	6,39	2,68	-0,53	1,82

Fonte: ¹(Dermibas, 2005), ²(Jenkins et. al, 1998)

Pode-se observar na Tabela 2.3 os elevados teores de óxido de silício (SiO₂) e de óxido de potássio (K₂O) nas composições da palha de trigo e da palha de arroz, como também são significativos os teores de óxido de sódio (Na₂O) e de enxofre (SO₃). Esses elementos estão fortemente relacionados com a formação de incrustações nas superfícies de troca térmica. As biomassas herbáceas, incluindo as palhas, apresentam como elementos inorgânicos principais o potássio, o silício, o enxofre e o cloro. A combinação desses elementos na composição do combustível potencializa a formação de depósitos fundidos nas superfícies, em temperaturas normais de operação dos geradores de vapor (Jenkins et al., 1996).

2.1.2 Características da palha da cana

A palha da cana apresenta composição bastante variável em função da variedade da cana, do solo no qual ocorre o plantio, do sistema de despalha e de colheita, das condições climáticas no local, e do estágio de desenvolvimento vegetativo da cultura, o que torna inviável a generalização de suas informações.

Alternativas de coleta e de processamento da palha têm sido investigadas, também nas usinas que processam o resíduo como combustível complementar ao bagaço de cana. As técnicas de colheita normalmente empregadas são: a colheita em fardos, a colheita em forrageiras, a colheita e o transporte junto com a cana e, no caso, a separação na indústria em sistemas de

limpeza a seco. A alternativa mais utilizada para a redução das dimensões é a trituração com trituradores de facas e martelos com e sem peneiramento, segundo o *CTC (2010)*.

A expansão do sistema de colheita da cana sem queima da palha, em função dos avanços tecnológicos da colheita mecanizada, tem resultado na crescente quantidade de resíduos da cana depositados sobre o solo.

A avaliação dos efeitos da disposição de resíduos da cana no solo, e a determinação das condições de remoção dos resíduos do campo foram desenvolvidas por *Hassuani et al. (2005)*. Os autores concluíram que ocorre importante relação entre a quantidade de resíduos deixados no campo e a efetividade no controle de infestações de pragas sem o uso de herbicidas. O controle de pragas depende da quantidade de resíduos deixados no solo: os estudos preliminares indicaram a possibilidade de se alcançar índices superiores a 90% de eficiência no controle da proliferação de pragas no solo, mantendo cerca de 65% dos resíduos na área de colheita como deixados no campo. Investigações posteriores indicaram um controle eficiente de pragas com a disposição de quantidades de resíduos abaixo de 50%. A avaliação dos efeitos da distribuição dos resíduos da colheita da cana sobre o solo indica que vários fatores combinados afetam os resultados, como as condições climáticas, variedade da cana, além da própria quantidade de resíduos sobre o solo.

Como dito, as propriedades da palha da cana como combustível, assim como outras biomassas apresentam significativas variações. O teor de cinzas pode variar de 3% até 45%, e o teor de umidade, geralmente acima de 27%, pode atingir 51%. A palha da cana apresenta altas porcentagens de cinzas, o que reduz o seu poder calorífico e aumenta o desgaste dos equipamentos que estão em contato com as cinzas transportadas pelos gases de combustão (*CTC, 2010*).

Por ser um material herbáceo, as cinzas da palha da cana têm entre seus componentes principais, a sílica, o potássio e o enxofre, sendo identificado também um teor de cloro mais elevado quando comparada com outras biomassas. Como dito, tais características indicam forte tendência à formação de incrustações e de depósitos de cinzas fundidas nas caldeiras. Essas propriedades tornam o uso da palha, como combustível, restrito a algumas condições de operação no gerador de vapor ou, então, exigem um pré-tratamento do combustível (*Jenkins et al., 1996*).

A caracterização de um combustível deve ser feita por procedimentos padronizados que resultam na determinação da análise aproximada, da análise elementar, da análise elementar das cinzas e do poder calorífico. Os estudos realizados por *Hassuani et al. (2005)* subclassificaram a

palha da cana em três categorias: as folhas verdes, as folhas secas e as pontas da planta. Esses materiais apresentam características distintas quanto à umidade e a concentração de metais alcalinos e de outros componentes.

Os ensaios descritos por *Hassuani et al. (2005)* foram aplicados a diferentes amostras de palha. As amostras coletadas passaram previamente por um processo de secagem a 65°C, em forno, por 72 horas. Após a secagem as amostras foram trituradas e peneiradas para se obter um material uniforme.

A análise imediata para determinação do teor de umidade, matéria volátil, cinzas e teor de carbono fixo, foi realizada para cada subclassificação mencionada. Os materiais apresentaram algumas variações em suas composições, principalmente em relação ao teor de umidade. Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados médios da análise aproximada obtidos para folhas secas, folhas verdes, pontas e para o bagaço (*Hassuani et al., 2005*).

Tabela 2.4. Análise imediata dos componentes da palha da cana e do bagaço, em base seca.

Parâmetro – (%) em peso	Folhas secas	Folhas verdes	Pontas	Bagaço
Teor umidade	13,5	67,7	82,3	50,2
Cinzas	3,9	3,7	4,3	2,2
Carbono fixo	11,6	15,7	16,4	18,0
Material volátil	84,5	80,6	79,3	79,9

Fonte: *Hassuani et al. (2005)*.

As amostras dos componentes da palha apresentaram praticamente o mesmo teor de cinzas, com aproximadamente 4%, carbono fixo em torno de 15%, exceto no caso das folhas secas, e material volátil 80%, também com exceção das folhas secas (sempre expresso em base seca). Os componentes da palha têm aproximadamente o dobro de cinzas em relação ao bagaço.

A análise elementar, realizada separadamente para cada parte da palha, indica praticamente a mesma composição em carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre. O teor de cloro é consideravelmente diferente em relação ao bagaço, o que potencialmente indica maiores problemas na queima da palha em relação ao bagaço. Na Tabela 2.5 são apresentados resultados da composição média, a partir da análise elementar, da biomassa residual da cana de açúcar.

Tabela 2.5. Análise elementar para cada parte constituinte da palha e para o bagaço de cana.

(%) Peso	Folhas secas	Folhas verdes	Pontas	Bagaço
Carbono	46,2	45,7	43,9	44,6
Hidrogênio	6,2	6,2	6,1	5,8
Oxigênio	43,0	42,8	44,0	44,5
Nitrogênio	0,5	1,0	0,8	0,6
Enxofre	0,1	0,1	0,1	0,1
Cloro	0,1	0,4	0,7	0,02

Fonte: *Hassuani et al. (2005)*.

Na Tabela 2.6 são apresentados os dados da composição das cinzas dos constituintes da palha de cana e do bagaço da cana.

Tabela 2.6. Composição das cinzas dos constituintes da palha e do bagaço, em (g/kg) base seca.

Componente	Folhas secas	Folhas verdes	Pontas	Bagaço
P ₂ O ₅	0,5	2,0	2,5	0,5
K ₂ O	2,7	13,3	29,5	1,7
Cão	4,7	3,9	2,6	0,7
MgO	2,1	2,2	2,5	0,5
Fe ₂ O ₃	0,9	0,5	0,2	2,3
Al ₂ O ₃	3,5	1,4	0,5	2,3
Na ₂ O	0,001	0,001	0,001	0,04

Fonte: *Hassuani et al. (2005)*.

Pela informação anteriormente apresentada, atribuída a *Jenkins et al. (1996)*, de que os componentes críticos do ponto de vista da formação de incrustações nas superfícies de troca térmica são o óxido de silício (SiO₂), o óxido de potássio (K₂O), o óxido de sódio (Na₂O) e o de enxofre (SO₃), conclui-se que problema mais críticos ocorreriam com a combustão de folhas verdes e pontas da planta.

Avançando mais na análise, foram compiladas informações disponíveis na literatura e que permitem a caracterização da composição da palha de cana, com e sem pré-tratamento, para o uso como combustível em geradores de vapor.

Dados da análise elementar e do teor de cinzas da palha da cana foram compilados de diferentes autores e são apresentados na Tabela 2.7. A referência, para a caracterização de potenciais problemas, é a composição do bagaço de cana. São apresentadas informações de palha

não tratada, picada ou pulverizada, e de palha tratada, submetida a um processo de secagem à 65°C e posterior trituração, e também de palha tratada por um processo de lixiviação, para remoção dos inorgânicos mais críticos.

Tabela 2.7. Análise elementar e teor de cinzas de amostras de palha e de bagaço de cana em base seca.

(%) Peso	Palha – Não tratada		Palha – Tratada	Bagaço de cana²
	Picada ¹	Pulverizada ¹	Lixiviação ²	
Carbono	44,8	44,7	46,0	44,6
Hidrogênio	6,20	6,3	6,2	5,8
Oxigênio	36,1	39,1	43,0	44,5
Nitrogênio	0,7	0,7	0,6	0,6
Enxofre	0,2	0,2	0,1	0,1
Cloro	0,4	0,4	0,2	0,02
Cinzas	11,9	9,0	3,9	2,2

Fonte: ¹(Woytiuk, 2006), ²(Linero et al., 1995, em Walter e Llagostera, 2007),

Da Tabela 2.7 é possível observar que as amostras de palha de cana sem limpeza apresentam alto teor de cinzas, em relação ao bagaço, e teor de cloro também muito superior. Mais adiante será analisada a probabilidade de formação de incrustações e escória quando realizada a queima de tais biomassas em altas temperaturas. Pode-se observar que mesmo a palha tratada tem pior composição que o bagaço, considerando o teor de cinza e a concentração de cloro.

Na Tabela 2.8 é apresentada a composição mineral das cinzas de amostras de palha não tratada, picada e pulverizada, bem como de amostras de palha tratada, submetidas ao processo de remoção de componentes inorgânicos por lixiviação. A descrição dos processos de tratamento será feita mais a frente, neste mesmo capítulo.

Tabela 2.8. Análise da composição das cinzas de diferentes composições de palha em base seca.

(%) Óxidos	Palha – Não tratada		Palha – Tratada		Bagaço de cana ²
	Picada ¹	Pulverizada ¹	Picada ¹	Pulverizada ¹	
SiO ₂	67,12	64,09	74,91	77,47	46,61
Al ₂ O ₃	2,05	2,42	1,45	5,61	17,69
TiO ₂	0,29	0,28	0,15	0,43	2,63
Fe ₂ O ₃	1,83	2,27	1,05	2,97	14,14
Cão	6,50	8,04	5,83	5,58	4,47
MgO	2,91	3,62	2,40	1,21	3,33
Na ₂ O	0,50	0,57	0,40	0,82	0,79
K ₂ O	9,48	9,44	6,80	1,63	0,15
SO ₃	2,11	3,49	1,33	0,69	2,08
P ₂ O ₅	1,91	1,92	1,48	0,52	2,72
Indeterminados	2,22	1,27	2,53	2,12	1,39
Cl (%) base seca	0,37	0,44	0,03	0,03	0,03

Fonte: ¹(Woytiuk, 2006), ²(Jenkins et. al, 1996)

Da Tabela 2.8 é evidente que o processo de tratamento da palha resulta em uma significativa redução nos teores de Mg, Ca, K e Cl, tornando a palha, sob esse ponto de vista, semelhante ao bagaço. Mas o teor de SiO₂, proporcionalmente, aumenta consideravelmente.

Com base nas informações disponíveis na literatura, foi feita uma análise comparativa da composição das cinzas da palha da cana e do bagaço com a das cinzas de outras biomassas, e particularmente de algumas biomassas críticas, como palhas de arroz e trigo, que são reconhecidamente problemáticas quanto a formação de incrustações e depósitos. A composição das cinzas da palha da cana não é tão crítica quanto de outras biomassas, como as mencionadas palhas de arroz e de trigo. A composição do bagaço é resultado do fato de que essa biomassa é lavada no processo de moagem para a extração de caldo de cana, e parte dos inorgânicos é retirada nesse processo.

Na Tabela 2.9 pode-se observar a alta concentração de sílica nas gramíneas e, em geral, também alta concentração de potássio, com exceção para o bagaço de cana. A alta concentração de alumínio no bagaço deve-se à contaminação do solo. A baixa concentração de cloro do bagaço é explicada pela lavagem da biomassa durante a extração do caldo de cana-de-açúcar. Esse processo de lavagem do bagaço resulta em uma redução da concentração de cinzas totais.

Tabela 2.9. Composição das cinzas de alguns combustíveis herbáceos.

(%) Óxidos	Palha de arroz ¹	Palha de Trigo ¹	Capim ¹	Palha de Cana ²	Bagaço de cana ²
SiO ₂	74,67	55,32	65,20	57,40	46,61
Al ₂ O ₃	1,04	1,88	4,51	NA	17,70
TiO ₂	0,09	0,08	0,24	NA	2,63
Fe ₂ O ₃	0,85	0,73	2,03	1,74	14,10
Cão	3,01	6,14	5,60	13,00	4,50
MgO	1,75	1,06	3,00	4,30	3,30
Na ₂ O	0,96	1,71	0,60	0,30	0,80
K ₂ O	12,30	25,60	11,60	13,40	0,15
SO ₃	1,24	4,40	0,44	7,30	2,08
P ₂ O ₅	1,41	1,26	4,50	2,30	2,72
Indeterminados	2,68	1,82	2,32	0,30	1,40
Total de cinzas	18,67	13,00	8,97	5,00	2,44
Cl (%) base seca	0,58	2,02	0,19	0,22	0,03

Fonte: ¹Jenkins et al. (1998), ²(Jenkins et al, 1996).

A remoção de quantidades significativas dos principais elementos causadores do processo de incrustação, por lavagem da biomassa, é um dos tratamentos sugeridos por Jenkins et al. (1998). Embora seja efetivo do ponto de vista específico de redução do teor de cinzas, o processo em si faz pouco sentido pela captação de água e impactos ambientais associados, pela necessidade de tratamento dos efluentes gerados, e pelo aumento da umidade da biomassa.

2.2 Problemas na combustão

O uso da biomassa como combustível em sistemas de geração de potência é condicionado pelos eventuais problemas de sua combustão nos geradores de vapor. Essas restrições estão associadas às suas propriedades, em relação aos combustíveis tradicionais, tais como o alto teor de umidade, o baixo poder calorífico, o teor de cinzas e sua composição, e a baixa densidade energética (Dermibas, 2005).

No caso da conversão térmica pela combustão direta da palha de cana em geradores de vapor, o teor de alguns constituintes, como os componentes inorgânicos, contribui negativamente. Entre os principais problemas está a formação de escórias e incrustações, acompanhadas de corrosão e desgaste acelerado das superfícies de troca térmica (Dayton et al.

1999). Em inglês, a formação de escória e de incrustações é conhecida como fouling e slagging, respectivamente.

As restrições para a combustão de combustíveis herbáceos, como palha de cana, estão relacionados com a presença de determinados elementos em sua composição, sendo os principais o potássio, o cloro, a sílica e o enxofre. Outros nutrientes como o fósforo, enxofre, cálcio e magnésio estão presentes na palha da cana e em outras biomassas em níveis variados, e contribuem em menor grau na formação de incrustações *Jenkins et al. (1996)*.

A formação de incrustações está fortemente ligada às reações químicas entre potássio e sílica, potencializadas pela presença do cloro, que é um facilitador da volatilização dos álcalis. Essas reações levam a uma rápida formação de depósitos fundidos e sinterizados, em temperaturas normais de operação das fornalhas, ou seja, entre 800 e 900°C, sendo os valores de temperatura de chama muito maiores. A fase líquida desses depósitos atua como um receptor na captura de mais cinzas em suspensão, quando do impacto das cinzas volantes com as superfícies *Jenkins et al. (1996)*.

Considerada a produção de potência elétrica, vários trabalhos foram desenvolvidos considerando o uso de biomassas semelhantes à palha da cana, com foco na investigação das restrições e dos mecanismos de formação de incrustações e deposições nas superfícies de troca térmica (*Jenkins et al. 1996*), (*Michelsen et al. 1998*).

2.2.1 Formação de escórias e incrustações em fornalhas

A formação de escórias é o processo de formação de depósitos fundidos ou sinterizados nas superfícies de transferência de calor e nos refratários das cavidades das fornalhas, submetidas à transferência de calor por radiação. A natureza, a intensidade e a composição das escórias podem variar significativamente, dependendo da temperatura de superfície, da temperatura da chama, das taxas de absorção, da direção do fluxo dos gases, da composição mineral, da composição e do tamanho das cinzas e do nível de oxigênio nos gases de combustão em contato com a superfície de transferência de calor (*Bryers, 1996*).

A formação de escórias pode ser o resultado do choque direto dos gases de combustão e de partículas fundidas, arrastadas pelos gases de combustão. A fusão de partículas ocorre na zona de combustão, devido uma liberação excessiva de calor, má distribuição de ar, operação

inadequada dos queimadores, ou ainda, pela existência de superfícies de transferência de calor perpendiculares à direção dos fluxos dos gases, como no caso das paredes de divisão e dos superaquecedores suspensos localizados à montante das fornalhas convencionais (Bryers, 1996).

O impacto de partículas sobre as superfícies pode resultar aderência e posterior solidificação das mesmas, e até formar uma camada com resistência térmica que prejudique o processo de troca térmica. Essa camada pode também facilitar a formação de cinzas fundidas. O potencial de formação de escórias depende da capacidade de derretimento dos elementos básicos presentes nas cinzas (Bryers, 1996).

A formação de escória e incrustações em fornalhas é um fenômeno muito complexo, que é influenciado pelas transformações dos componentes inorgânicos do combustível, de processos de aquecimento e de resfriamento, das reações químicas entre gases, líquidos e fases sólidas em movimento e repouso, da composição química e mineralógica das cinzas em suspensão, bem como das condições de operação na caldeira, tais como, temperatura e velocidade de distribuição, atmosfera de redução e de oxidação, além de outros fatores (Pronobis, 2005).

A formação de escória depende das propriedades das cinzas, que podem ser descritas pelas características da temperatura de fusão, e que são definidas por: temperatura inicial de deformação, temperatura de amolecimento, temperatura hemisférica e temperatura de fluxo. Como é relatado na literatura, alguns componentes, chamados de básicos, diminuem a temperatura de fusão das cinzas, enquanto os componentes chamados ácidos promovem o aumento da temperatura de fusão (Pronobis, 2005). Maiores temperaturas de amolecimento das cinzas tornam o meio altamente adesivo, resultando em escórias. Outro mecanismo de formação de incrustação é iniciado com um processo de sinterização, resultando em depósitos muito duros e de difícil remoção com o tempo.

O processo de transformação de componentes inorgânicos em conexão com reações químicas, que ocorrem durante a combustão, pode levar à formação de componentes químicos complexos com ponto de fusão extremamente baixo, e elevada força de adesão durante o processo de sinterização (Pronobis, 2005).

O grau de incrustação e de formação de escória varia internamente no gerador de vapor, dependendo da temperatura dos gases no local, da temperatura do tubo, dos diferenciais de temperatura, da velocidade dos gases, da orientação dos tubos e do fluxo de calor em cada partícula (Bryers, 1996).

2.2.2 Fusibilidade das cinzas e suas correlações

O conceito de fusibilidade foi introduzido em 1885, por E. Prost, que reconheceu a relação entre a temperatura de fusão das cinzas e a distribuição proporcional entre os componentes básicos e ácidos presentes no combustível. Até 1980, mais de 180 pesquisadores investigaram a fusibilidade das cinzas com base na análise de oito óxidos presentes nas cinzas do carvão mineral, a saber: SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O e K_2O . Desde então, várias correlações que associam a química das cinzas com a temperatura de fusão das mesmas foram definidas, a fim de melhorar a confiabilidade de previsão da temperatura de fusão (Bryers, 1996).

O procedimento ASTM para uso da temperatura de fusão das cinzas nas correlações de fusibilidade é aceito desde 1924. O procedimento requer gerar cinzas a partir de uma amostra composta de carvão em laboratório, formando cones, e o posterior acompanhamento das várias fases de deformação desses cones que são aquecidos a uma temperatura na qual derretem completamente.

Para uma previsão mais precisa da fusibilidade das cinzas, várias correlações foram propostas entre temperatura de fusão e composição química padronizada. Frequentemente emprega-se uma simples relação (B/A), considerando a porcentagem dos constituintes básicos e ácidos das cinzas. A razão foi introduzida para combustíveis fósseis com baixo teor de fósforo e, portanto sua presença não está incluída na razão (Pronobis, 2005).

A razão B/A pode ser calculada pela expressão simplificada, em função da concentração de diferentes óxidos, apresentada seguir (Pronobis, 2005):

$$R_{(B/A)} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \quad (1)$$

A dependência do ponto de fusão das cinzas com a concentração de componentes básicos é similar para diferentes combustíveis, tanto para carvão mineral, biomassas e resíduos urbanos. A mínima temperatura de amolecimento ocorre para a parcela de compostos básicos entre 35 e 55%, e com o aumento da parcela de compostos ácidos, ou seja, migração para menores teores de componentes alcalinos.

De acordo com (*Pronobis, 2005*), foram desenvolvidas correlações entre temperatura hemisférica e temperatura de fluxo e $R_{(B/A)}$, para mais de 180 tipos de carvão mineral. Três faixas de valores foram determinadas:

- Para $R_{(B/A)} < 0,75$, até o menor $R_{(B/A)}$, a temperatura hemisférica e de fluxo são maiores e, em consequência, o risco de formação de escória diminui muito; para $R_{(B/A)} > 0,15$ ambas as temperaturas excedem 1600°C.
- Para $R_{(B/A)} = 0,75$, ocorrem os menores níveis da temperatura hemisférica e de fluxo (abaixo de 1200°C), aumentando o risco de formação de escória.
- Para $0,75 < R_{(B/A)} < 2,0$, as temperaturas hemisféricas e de fluxo crescem com os valores de $R_{(B/A)}$.

Essas pesquisas mostraram que para $R_{(B/A)} < 0,75$ a temperatura de fluxo aumenta com o aumento do teor de Fe_2O_3 , enquanto para $R_{(B/A)} > 0,75$ a dependência é inversa. Aumentando a parcela de compostos ácidos aumenta a formação de escória. Os estudos desenvolvidos na investigação das correlações de fusibilidade, na sua grande maioria, são relativos às cinzas do carvão, a respeito do que a literatura e os exemplos são ricos (*Bryers, 1996*). Já para a combustão de biomassa pura a literatura é muito mais escassa. Embora haja algumas informações sobre as diferenças entre a fusibilidade das cinzas de carvão e da biomassa, investigações adicionais são necessárias no tema.

Algumas correlações baseadas direta ou indiretamente na relação (B/A) são apresentadas (*Pronobis, 2005*):

- Índice de Escória (R_s):

$$R_s = (B/A) * S^d \quad (2)$$

Sendo S^d é porcentagem de enxofre no combustível, em base seca.

Se,	$R_s < 0,6$	há baixa tendência à formação de escória;
	$0,6 < R_s < 2,0$	há média tendência à formação de escória;
	$2,0 < R_s < 2,6$	há alta tendência à formação de escória;
	$R_s > 2,6$	há extrema alta tendência à formação de escória.

- Índice de Incrustação (F_u):

$$F_u = R_s * \left(\frac{Na_2O + K_2O}{S^d} \right) \quad (3)$$

Se, $F_u < 0,6$ há baixa tendência à formação de incrustações;
 $0,6 < F_u < 40$ há alta tendência à formação de incrustações;
 $F_u > 40$ há tendência à sinterização dos depósitos.

- Índice de Viscosidade de Escória (S_R):

$$S_R = \frac{S_i O_2}{S_i O_2 + Fe_2 O_3 + CaO + MgO} * 100 \quad (4)$$

Se, $S_R > 72$ há baixa tendência à formação de escória;
 $65 < S_R < 72$ há média tendência à formação de escória;
 $S_R < 65$ há alta tendência à formação de escória.

- Teor de cloro no combustível;

Se, $Cl < 0,2$ há baixa tendência de formação de escória;
 $0,2 < Cl < 0,3$ há média tendência de formação de escória;
 $0,3 < Cl < 0,5$ há alta tendência de formação;
 $Cl > 0,5$ há extremamente alta tendência de formação.

No caso da queima combinada de biomassa com o carvão mineral (o termo usual em inglês é *co-firing*), quando a fração térmica da biomassa não excede 20%, assume-se que a composição química não difere significativamente da composição do carvão. Portanto, é considerado que as correlações podem ser utilizadas como indicadores de tendência de formação de escória a partir da mistura de combustíveis até esse limite. Embora a aplicação das correlações de fusibilidade não garanta uma avaliação totalmente confiável da tendência de formação de escória e de incrustações, as mesmas podem ser úteis ao comparar os efeitos da queima de diferentes combustíveis na caldeira.

A análise da mistura de biomassa na queima de carvão betuminoso, do ponto de vistas das propriedades das cinzas, foi realizada por *Pronobis (2005)*, através de cálculos baseados nas correlações de fusibilidade acima mencionadas. A proporção utilizada dos combustíveis é determinada pela fração térmica da biomassa (Z_D), sendo considerados os valores 0,02, 0,05 e 0,1 de biomassa no total de combustível queimado. Foi realizado o cálculo da fração mássica do biocombustível na queima. Na Tabela 2.10 é apresentada a constituição mineral da palha de trigo (a biomassa considerada) e do carvão mineral, bem como a fração térmica da biomassa (Z_D) e a fração em massa da biomassa (Y_D) para a queima conjunta de palha e carvão mineral (*Pronobis, 2005*).

Tabela 2.10. Constituição química das cinzas e valores a partir das correlações de fusibilidade das cinzas para queima da mistura de palha de trigo e carvão mineral.

	Unidade	Palha de trigo	Carvão mineral	Mistura de palha e carvão - fração térmica (%)		
Z_D	–	1	0	0,02	0,05	0,1
Y_D	–	1	0	0,03	0,07	0,14
Fe_2O_3	%	7,20	7,63	7,59	7,52	7,41
CaO	%	8,10	3,71	3,73	3,77	3,83
MgO	%	7,20	3,24	3,26	3,29	3,35
Na_2O	%	0,50	0,90	0,90	0,90	0,89
K_2O	%	32,00	2,03	2,19	2,45	2,90
P_2O_5	%	1,50	0,09	0,10	0,11	0,13
SiO_2	%	50,00	57,44	57,40	57,34	57,23
Al_2O_3	%	0,30	23,44	23,31	23,11	22,76
TiO_2	%	0,20	1,53	1,52	1,51	1,49
$R_{(b/a)}$	–	0,31	0,18	0,18↑	0,18↑	0,18↑
R_b	–	48	17,50	17,67	17,93	18,39
S_d	–	0,11	0,556	0,54	0,524	0,49
B/A	–	0,95	0,212	0,21	0,219	0,22
R_s	–	0,10	0,12	0,12	0,11↓	0,11↓
F_u	–	30,89	0,62	0,66↑	0,73↑	0,86↑
S_R	–	76,34!	79,77	79,75	79,72	79,68
Cl	%	0,5!	0,2	0,21↑	0,22↑	0,24↑

Nota: ↑ – Tendência de aumento de formação de escória em comparação com a combustão do carvão puro. ! – Valor perigoso para operação adequada de geradores de vapor.

Fonte: *Pronobis (2005)*.

Os resultados indicam que para a queima conjunta de palha e carvão mineral há elevação do teor de cloro e de potássio em função do aumento da fração de palha na mistura. Assim, o valor do fator de incrustação (F_U) sofre um significativo aumento em relação à queima exclusiva de carvão mineral, bem como é observado um aumento no valor do fator de viscosidade da escória (S_R) quando da combustão de palha misturada ao carvão. De acordo com as correlações

de fusibilidade, os índices obtidos indicam um aumento na tendência de formação de escórias e de incrustações, devido à queima conjunta de palha e o carvão mineral. Como já mencionado, as proporções da mistura de combustível são representadas pela fração térmica (Z_D) e pela fração mássica da biomassa (Y_D).

As correlações mencionadas indicam com maior confiabilidade a avaliação da tendência de formação de escória e de incrustações em misturas de biomassa e carvão. Não é comprovada a eficácia das correlações de fusibilidade para a queima de biomassa pura. No entanto, na ausência de informações específicas, para a investigação da queima da palha de cana, foram realizados, nesta dissertação, cálculos para diferentes composições de palha de cana. A Tabela 2.11 apresenta os resultados dos cálculos das correlações de fusibilidade da cinza realizados a partir de informações da composição das cinzas de algumas amostras de palha de cana.

Tabela 2.11. Composição química das cinzas e valores calculados a partir das correlações de fusibilidade para queima da palha da cana

Determinação	Unidade	Palha – Não tratada		Palha – Tratada	
		Picada	Pulverizada	Picada	Pulverizada
Fe ₂ O ₃	%	1,83	2,27	1,05	2,97
CaO	%	6,50	8,04	5,83	5,58
MgO	%	2,91	3,62	2,40	1,21
Na ₂ O	%	0,50	0,57	0,40	0,82
K ₂ O	%	9,48	9,44	6,80	1,63
P ₂ O ₅	%	1,91	1,92	1,48	0,52
SiO ₂	%	67,12	64,09	74,91	77,47
Al ₂ O ₃	%	2,05	2,42	1,45	5,61
TiO ₂	%	0,29	0,28	0,15	0,43
R _(b/a)	–	0,33	0,33	0,23	0,15
S _d	–	2,11	3,49	1,33	0,69
R _S	–	0,69	1,15	0,30	0,10
F _u	–	3,30	3,30	1,65	0,36
S _R	–	85,40	82,02	88,97	88,81
Cl	%	0,37	0,44	0,03	0,03

Fonte: *Woytiuk (2006)*.

A aplicação das correlações de fusibilidade das cinzas na avaliação da tendência de formação de incrustações quando do uso da palha da cana como combustível, indica diferenças significativas de tendência entre as amostras de palha limpa e de palha sem tratamento.

Como era previsto, os índices calculados e apresentados na Tabela 2.11 indicam maiores riscos de formação de escória e incrustações, para as amostras de palha sem tratamento. Dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- Como $R_{(B/A)} < 0,75$ em todos os casos, há baixo risco de formação de escória;
- Como $R_s < 0,60$ no caso da palha tratada, e $0,6 < R_s < 2,0$ no caso de palha não tratada, há média probabilidade de formação de escória quando da queima de palha não tratada;
- Como $F_u < 0,6$ em apenas um dos casos ($F_u=0,36$), conclui-se então que há média e alta tendência à formação de incrustações, mesmo quando da combustão de palha tratada;
- Como $S_R > 72$ em todos os casos, há baixa tendência à formação de escória devido sua viscosidade;
- E como $0,3 < Cl < 0,5$ no caso da palha não tratada, há alta tendência de formação de escória, nesta situação.

Portanto concluiu-se que a tendência de formação de escória e de incrustações, por diferentes razões, é alta quando da queima de palha de cana não tratada. No caso da combustão de palha tratada, os riscos diminuem, mas não são totalmente eliminados.

Análise similar foi feita, nesta dissertação, para a comparação dos resultados das correlações de fusibilidade das cinzas da palha da cana e de biomassas que são problemáticas do ponto de vista da formação de incrustações. Os índices de fusibilidade das cinzas, calculados pelas correlações anteriormente apresentadas são comparados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12. Índices de fusibilidade das cinzas comparando o comportamento de palha de cana e de outras biomassas.

Índices	Unidade	Palha de cana – não tratada ¹	Palha de cana – tratada ¹	Palha de arroz ²	Palha de trigo ³
$R_{(b/a)}$	–	0,33	0,15	0,23	0,84
S_d	–	3,49	0,69	0,84	2,90
R_s	–	1,15	0,10	0,19	2,45
F_u	–	3,30	0,36	3,02	22,16
S_R	–	82,02	88,81	94,60	75,30
Cl	%	0,44	0,03	0,74	0,5

Fonte: ¹(Woytiuk, 2006), ²(Jenkins et al., 1996), ³(Michelsen et al., 1998)

- Para os valores de $R_{(B/A)}$ apresentados na tabela, o risco de formação de escória é maior no caso de combustão da palha de trigo;
- Para os valores calculados de R_s , conclui-se que há média probabilidade de formação de escória quando da queima da palha de cana não tratada, e alta no caso da palha de trigo;
- Para os valores de F_u , apresentados, conclui-se que há média e alta tendência à formação de incrustações para todas as biomassas, exceto a palha da cana tratada;
- Como $S_R > 72$ em todos os casos, há baixa tendência à formação de escória devido a viscosidade;
- E finalmente, tendo por referência o teor de cloro, a tendência de formação de escória só é baixa no caso da palha tratada, Há alta tendência nos casos da palha de trigo e da palha da cana não tratada, e extremamente alta tendência no caso da palha de arroz.

Na análise feita, a composição da amostra de palha de cana tratada refere-se a palha submetida a limpeza com água, e é essa a biomassa com menor probabilidade, entre as comparadas, do ponto de vista de formação de escórias e incrustações. Para a palha da cana não tratada, é indicada média a alta tendência à formação de escórias e incrustações, e pode-se concluir que os riscos são similares aos da palha de trigo. Por analogia, se a operação dos geradores de vapor com queima exclusiva de palha de cana ocorresse nas mesmas condições de operação dos geradores de vapor que queimam palha de trigo, os problemas de formação de incrustações e escórias seriam minimizados. Mas ocorre que as condições operacionais – baixa pressão e baixa temperatura do vapor gerado – não são favoráveis para a geração de potência.

Os riscos de formação de escória e de incrustações levaram ao desenvolvimento de indicadores em função da composição dos combustíveis, principalmente em função do teor de alguns componentes inorgânicos. Os índices apresentados na literatura foram desenvolvidos para carvão mineral, e têm sido empregados com razoável precisão para a análise da combustão da biomassa.

Um índice que tem sido empregado com frequência na avaliação de biomassas é o Índice de Alcalis, que é utilizado como indicador da formação de escórias e incrustações (*Jenkins et al. 1998*). Os autores comentam que em função do índice e da escala não ter sido definida

especificamente para as biomassas, o índice de álcalis deve ser interpretado como um indicador de tendências, e não como um resultado absoluto.

O índice de álcalis expressa a quantidade de óxidos alcalinos no combustível, por unidade de energia (kg de álcalis/ GJ), sendo definido pela seguinte equação:

$$IA = \frac{(Y_a) \times (Y_{K_2O} + Y_{Na_2O})}{HHV} \quad (5)$$

Sendo Y_a a fração em massa de cinzas no combustível, Y_{K_2O} e Y_{Na_2O} as frações em massa de K_2O e Na_2O nas cinzas e HHV é o poder calorífico superior do combustível. De acordo com (Miles et al., 1995) é sugerido que acima de 0,17 kg álcalis/GJ a formação de incrustação é provável, e acima de 0,34 kg de álcalis/ GJ, a formação de incrustações é praticamente certa.

Com objetivo de aumentar as informações sobre a tendência de formação de incrustações quando da combustão da palha da cana, foram realizados nesta dissertação cálculos de índices de álcalis, para as composições de palha de cana não submetidas a processo de limpeza apresentadas na Tabela 2.8, e para a composição de palha de cana tratada apresentada na Tabela 2.9. A referência da composição da palha da cana tratada é Jenkins et al. (1996). Os resultados são apresentados na Tabela 2.13.

Tabela 2.13. Índice de álcalis calculado para diferentes composições de palha de cana.

Parâmetro	Palha – Não tratada		Palha – Tratada ²
	Picada ¹	Pulverizada ¹	
HHV(MJ/kg)	17,15	17,31	17,40
Y_a (%)	11,92	9,02	5,04
Y_{Na_2O} (%)	0,50	0,57	0,27
Y_{K_2O} (%)	9,48	9,44	13,39
I.A (kg/GJ)	0,693	0,521	0,39

Fonte de dados: ¹(Woytiuk, 2006), ²(Jenkins et al., 1996).

Os resultados apresentados na Tabela 2.13, e a indicação da faixa de valores do índice de álcalis, baseado na experiência, indica que quando da queima de palha de cana não tratada problemas tais como a formação de incrustações e depósitos ocorreriam certamente, enquanto no caso da palha tratada ainda seria provável observar tais problemas.

Ciente dos problemas operacionais quando da queima de biomassas críticas, como as palhas de trigo e de arroz, foi feita, nesta dissertação a avaliação do índice de álcalis e a comparação com os resultados para a palha da cana, tratada e não tratada. Os resultados são apresentados na Tabela 2.14.

Tabela 2.14. Comparativo entre os índices de álcalis calculados para composições da palha de cana e outras biomassas críticas.

Parâmetro	Palha de cana – Não tratada ¹	Palha de cana – Tratada ²	Palha de arroz ²	Palha de trigo ²	Palha de trigo ³
HHV(MJ/kg)	17,15	17,40	18,70	19,30	15,25
Y _a (%)	11,92	5,04	19,60	13,00	4,80
Y _{Na2O} (%)	0,50	0,27	1,85	10,50	0,38
Y _{K2O} (%)	9,48	13,39	11,30	18,40	26,00
I.A (kg/GJ)	0,69	0,39	1,37	1,94	0,83

Fonte de dados: ¹ (Woytiuk, 2006), ² (Jenkins et al., 1996), ³ (Michelsen et al., 1998).

Pode-se observar tendo por base o índice de álcalis, que a palha da cana, mesmo não tratada, não é um combustível tão crítico quanto a palha de trigo e a palha de arroz (unicamente do ponto de vista da formação de depósitos e de incrustações). Por outro lado, uma vez tratada, os riscos diminuem significativamente, não sendo possível afirmar, entretanto, que o problema deixaria de existir.

2.2.3 Formação de depósitos e corrosão em superfícies de caldeiras a biomassa

O crescente aproveitamento de resíduos de biomassas, como combustível, por razões econômicas e/ou ambientais, motivou o estudo dos riscos operacionais e dos mecanismos de formação de incrustações e depósitos em superfícies de troca térmica. Evidentemente que os pesquisadores priorizam as biomassas que são mais utilizadas em determinadas regiões, havendo ainda poucos estudos conclusivos sobre a palha da cana.

Como se sabe, a eficiência térmica dos sistemas de potência a vapor é impactada pela temperatura do vapor gerado, e que expande nas turbinas, sendo tanto maior quanto mais elevada for a temperatura. No caso do uso da biomassa como combustível, a temperatura do vapor

superaquecido é limitada por razões econômicas e pelos problemas descritos nesta dissertação, relativos à formação de escória e incrustações.

Assim como a palha da cana, outras biomassas residuais com características e composições similares também são de interesse na geração de vapor. Por exemplo, tanto a palha de arroz quanto a palha de trigo são aproveitadas como combustíveis em caldeiras em algumas regiões.

O uso da palha de trigo como combustível em geradores de vapor provoca, normalmente, corrosão nas superfícies de troca térmica, principalmente pelos altos índices de componentes que facilitam a formação de incrustações e deposição. Os efeitos de deposição e corrosão foram medidos e analisados por *Michelsen et al. (1998)* em uma planta que opera queimando palha de trigo, com regime de operação de alta temperatura de vapor.

O processo de formação de incrustação (escória) nas superfícies de troca de calor de caldeiras que queimam biomassa é intensificado pelo aumento da temperatura do vapor, como mostram estudos realizados por *Michelsen et al. (1998)*, em uma planta de cogeração de 10 MW de potência, operando a partir da queima de palha de trigo. A análise foi possível a partir de medições dos depósitos de cinzas fundidas formados nas superfícies de troca de calor, bem como do nível de corrosão no metal de diferentes pontos da caldeira. As medições indicaram que a quantidade e a densidade dos depósitos nas superfícies do metal variaram de acordo com as temperaturas da superfície do metal, mas a composição dos depósitos não apresentou alterações significativas. Os tipos de depósitos formados geram índices de severidade da corrosão bem distintos.

A análise do mecanismo de formação dos depósitos de cinzas nas superfícies, conduzida por *Michelsen et al. (1998)*, foi realizada através do posicionamento de sondas de teste na parte superior da caldeira, antes dos tubos do superaquecedor, na passagem convectiva dos gases de combustão. Nesse ponto a temperatura dos gases de combustão, medida, era próxima de 750°C, e a temperatura de saída do vapor a 61bar era de 450°C. Duas temperaturas foram usadas para avaliação dos depósitos: uma temperatura de 460°C foi escolhida para simular a temperatura dos tubos do superaquecedor na condição existente, e 550°C para avaliar a elevação da temperatura do vapor até 520°C em cenário operacional futuro.

Amostras de cinzas em suspensão foram coletadas, assim como uma amostra de cinzas de fundo foi coletada em um removedor com água, a fim de determinar o comportamento e o

caminho dos componentes inorgânicos na caldeira. Na Tabela 2.15 é apresentada a composição de amostras de cinzas em suspensão, bem como da cinza de fundo.

Tabela 2.15. Composição química de amostras de cinzas em suspensão e cinzas de fundo de palha de trigo.

Análise Elementar (%) em peso	Cinza em Suspensão			Cinza de Fundo
	Amostra - 1	Amostra - 2	Amostra - 3	Amostra
Si	13	11	6,2	24
Ca	4,9	5,1	2,8	8
K	23	22	25	16
Na	0,26	0,24	0,33	0,26
P	0,73	0,75	0,45	1,40
S	1,9	1,9	2,6	0,25
C	24,4	17,1	15,7	16,5
Solúveis em água				
K	19,1	20,6	28,5	7,6
Cl	12	14,4	21,2	1,0

Fonte: *Michelsen et al. (1998)*.

As análises das amostras das cinzas em suspensão e das cinza de fundo mostraram que todas são ricas em potássio e cloro, e que esses elementos constituem de 45 a 55% das cinzas em suspensão. Pode ser verificado também, que as cinzas em suspensão possuem um alto teor de carbono residual, entre 15 e 25%, o que indica a combustão incompleta da biomassa. Tal fato conduziu o autor a conclusão de que o sistema de alimentação deveria ser modificado, para reduzir o teor de carbono não queimado para 2 a 3%.

Os autores estimaram que 80% do fluxo total das cinzas são removidos como cinzas de fundo, e 20% das cinzas do combustível são arrastadas com os gases. Também estimaram que aproximadamente 35% do cloro e 20% do enxofre do combustível são arrastados pelos gases de combustão.

As medições dos depósitos formados sobre a superfície das sondas mostraram que as deposições ficavam fortemente ligadas ao metal, e que era extremamente difícil sua remoção sem danificar as superfícies de troca térmica. Os depósitos apresentaram alto teor de cloro e potássio, com menor grau de silício, cálcio e enxofre. Em ambas as temperaturas consideradas para a superfície metálica, os depósitos formados tinham alto teor de cloreto de potássio; a soma do teor de cloro e do teor de potássio ficou entre 40 – 80%.

A temperatura das cinzas em suspensão varia ao longo da passagem dos gases pelas várias superfícies de troca térmica e, conseqüentemente, os depósitos formados terão composição variável. Por exemplo, o cloreto de potássio pode se condensar em função da menor temperatura superficial dos metais, e se precipitar sobre os mesmos.

Michelsen et al. (1998) afirmam que os depósitos são formados por cinzas em suspensão, com tanto maior espessura de cloreto de potássio (KCl) quanto maior for a temperatura na superfície do metal. Afirmam ter verificado a formação de uma pré-camada de sulfatos alcalinos condensados, que altera as propriedades da superfície e age como um coletor de partículas de cinzas que atingem por impacto a superfície.

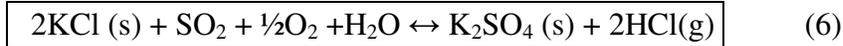
Para temperatura do metal igual a 550°C, a camada interna do depósito era mais densa e continha cloreto de potássio quase puro, enquanto a camada mais próxima do metal era uma película fina, parcialmente fundida à superfície do metal. Para a temperatura do metal igual a 460°C, a camada interna dos depósitos não apresentou alta densidade, indicando não haver fases de fusão próximas da superfície, pois a temperatura da superfície do metal não era suficiente para induzir fases de fusão entre óxidos de ferro e cloreto de potássio. As camadas internas formadas entre os depósitos e a superfície do metal são fundamentais para determinar a severidade da corrosão apresentada para diferentes temperaturas da superfície do metal.

A avaliação feita indica que para temperatura do vapor até 450°C na saída do superaquecedor, que corresponderia à temperatura do metal aproximadamente 480°C, a corrosão encontrada foi desprezível. Já para temperaturas de vapor que correspondem à temperatura de superfície do metal entre 490°C e 520°C, a taxa de corrosão aumentou moderadamente, tendo sido observada corrosão seletiva nos aços austeníticos, nos quais cromo e ferro são removidos da liga metálica levando a uma degradação do metal.

O mecanismo de corrosão seletiva causada pelo cloro ocorre a partir de reações entre as formas gasosas do cloro (Cl_2 e HCl) e a camada de óxido metálico, formando cloretos de ferro e cromo que possuem alta pressão parcial na presença de oxigênio, e que causam instabilidade na camada através de difusão desses óxidos.

Segundo *Michelsen et al. (1998)* alguns autores sugerem que o processo de corrosão pode ser acentuado por reações secundárias que ocorrem na camada depositada, gerando maior concentração de cloro próximo à superfície do metal. A reação que ocorre é a sulfatação do cloreto de potássio (KCl), formando sulfato de potássio e com liberação de mais cloro na

superfície externa do depósito. A reação de sulfatação do cloreto de potássio, que ocorre nos depósitos, é representada na equação (6):



Não existem estudos conclusivos a respeito dos impactos das reações de sulfatação que ocorrem nos depósitos, sobre o mecanismo de corrosão. As condições em que ocorrem as reações no ambiente interno do gerador de vapor indicam que a quantidade de enxofre presente na forma gasosa não estaria totalmente disponível para sulfatação do cloreto de potássio devido parte ser retida das cinzas em suspensão. Isso indica que as reações de sulfatação não seriam suficientes para provocar toda a corrosão, mas provavelmente contribuir no processo (*Michelsen et al., 1998*).

Os resultados da pesquisa descritos por *Michelsen et al. (1998)* indicam que a corrosão causada nas superfícies de transferência de calor do gerador de vapor está relacionada com a presença de cloretos alcalinos nos depósitos das cinzas fundidas, e isso pode causar corrosão acelerada a temperaturas abaixo do ponto de fusão do cloreto de potássio. Os potenciais problemas de corrosão associados com a geração de energia a partir da biomassa podem ser evitados, ou pela redução da temperatura do vapor gerado ou pela prévia redução das concentrações de cloro e potássio nas cinzas, o que reduz o risco de formação de cloreto de potássio.

2.3 Alternativas para os problemas na combustão da palha

Embora não seja tão crítica quanto outras biomassas, pode-se concluir que podem haver problemas quando da queima da palha da cana em geradores de vapor. Algumas técnicas de pré-tratamento da palha vêm sendo desenvolvidas, como também pode-se optar pelo controle e mudança adequada nas condições operacionais dos geradores de vapor. Há poucas referências específicas para a biomassa residual da cana, mas as técnicas de mitigação têm sido desenvolvidas tanto para várias biomassas quanto para o carvão mineral.

Considerando o processo de colheita com o recolhimento dos resíduos de culturas herbáceas e de curta rotação, como a cana de açúcar, algumas situações favorecem a contaminação dos seus resíduos, como a adubação e a irrigação de produtos agrícolas, que elevam os níveis das espécies inorgânicas presentes na palha da cana. Essa contaminação também pode ocorrer tanto por via aérea como pelo contato direto dos resíduos com o solo, proporcionada após algumas formas de colheita. Tal possibilidade justifica o desenvolvimento das técnicas apropriadas de coleta, armazenamento e transporte da palha da cana até a usina, para aumentar a qualidade do material para o uso apropriado como combustível (*Hassuani et al., 2005*).

2.3.1 Processo de remoção de impurezas da palha

Uma alternativa é a remoção ao menos parcial dos componentes inorgânicos da palha através da operação de lixiviação do combustível, em etapas de remoção com água. Isso é o que ocorre com o bagaço de cana, que tem drástica redução dos teores de cloro, potássio e de cinzas após o processo de lixiviação, durante a extração de caldo da cana,

A lixiviação é caracterizada por uma seqüência de processos de arraste de substâncias, que são conduzidos com aplicação de água. Resultados de experimentos indicam que quantidades significativas de potássio, cloro e de fósforo da biomassa são removidas pela água, já que muitos metais alcalinos e alcalinos terrosos são solúveis em água.

Estudos realizados por (*Jenkins et al., 1996*), com o intuito de determinar que elementos e que quantidades podem ser removidos por água, foram feitos com duas biomassas de composição crítica: a palha de arroz e a palha de trigo. Várias análises foram realizadas em laboratório para determinação da concentração de amostras tratadas e de amostras não tratadas, e para investigação das diferenças na fusibilidade das cinzas após o tratamento realizado. Para os tratamentos feitos em laboratório três metodologias diferentes de lixiviação com água à temperatura entre 20°C e 25°C, foram testadas. (1) pulverização de água sobre uma cama de palha com 30 mm de espessura, apoiada sobre uma malha de aço expandida; (2) vertendo água de torneira ou destilada, sobre as amostras distribuídas sobre uma fina tela de aço inox; (3) submergindo e imergindo as amostras em água destilada. Os autores avaliaram o teor de cinzas, teor de umidade, poder calorífico e a análise elementar da composição das cinzas das amostras

após os tratamentos. Alguns resultados obtidos por *Jenkins et al. (1996)*, são apresentados na Tabela 2.16.

Tabela 2.16. Concentração das cinzas em amostras de palha tratadas e não tratadas.

Tratamento	Palha de Arroz (%)	Palha de Trigo (%)
Não tratada	19,6	13,0
Pulverizar água	19,1	9,5
Lavada (vertendo água)	18,3	5,0
Lavada (água destilada)	18,2	4,2
Lavada(moída)	17,9	5,2
Submersão	18,0	6,2

Fonte: (*Jenkins et al., 1996*).

A análise dos resultados de cinzas para os diferentes tratamentos das biomassas indica que as cinzas totais da palha de arroz são muito pouco reduzidas nos tratamentos empregados. Comparando o teor de cinzas da palha não tratada com o teor de cinzas alcançado após os tratamentos, a redução não atinge 9% em massa no melhor dos casos. Dos métodos empregados observa-se que o processo por pulverização é o que trouxe piores resultados, mas os autores destacam que os testes feitos não permitem conclusões definitivas.

Os resultados obtidos com os mesmos processos, quando aplicados à palha de trigo, foram mais significativos, pois a redução das cinzas de uma amostra tratada por simples pulverização foi de 13% para 9,5%. O melhor resultado foi obtido pelo tratamento por lavagem, vertendo água destilada sobre a amostra, que resultou redução de 68% do teor de cinzas (*Jenkins et al., 1996*).

Jenkins et al., (1996) estudaram a composição das cinzas das palhas de trigo e de arroz, antes e após os processos de tratamento anteriormente mencionados. Na tabela 2.17 são apresentados alguns dos resultados publicados na referência.

Tabela 2.17 Composição elementar das cinzas de palha de arroz e de trigo tratadas e não tratadas.

(%) Óxidos	Palha de arroz			Palha de Trigo	
	Não tratada	Borrifação	Imersão	Não tratada	Imersão
SiO ₂	74,31	81,30	93,13	35,84	61,79
Al ₂ O ₃	1,40	0,59	0,98	2,46	2,85
TiO ₂	0,02	0,07	0,05	0,15	0,04
Fe ₂ O ₃	0,73	0,74	0,46	0,97	1,62
CaO	1,61	2,36	2,12	4,66	5,84
MgO	1,89	2,17	0,86	2,51	2,37
Na ₂ O	1,85	1,57	0,18	10,50	3,48
K ₂ O	11,30	7,45	2,03	18,40	5,81
SO ₃	0,84	0,86	0,32	5,46	1,68
P ₂ O ₅	2,65	1,68	0,39	1,47	3,35
CO ₂	-	-	-	0,12	0,28
Cl (%) base seca	0,74	0,38	0,06	14,70	0,52
Indeterminados	3,40	1,21	- 0,52	2,76	10,37

Fonte: *Jenkins et al. (1996)*.

No caso da palha de arroz, a redução do teor de cinzas é pequena, mas a redução do teor de alguns elementos críticos é significativa, como é o caso dos óxidos de potássio e de sódio, e do cloro, principalmente quando do tratamento por imersão. Já no caso da palha de trigo, além do melhor resultado para a remoção das cinzas, os resultados também são bons quanto à remoção de alguns elementos críticos. Com o tratamento por imersão é possível a redução de 70% do teor de potássio. A concentração de enxofre também teve expressiva redução nos processos de tratamentos aplicados, tanto para a palha de trigo como para a palha de arroz.

A concentração de alguns compostos não é muito afetada nos processos de limpeza descritos, como é o caso do óxido de ferro, sódio, fósforo e do alumínio. Por outro lado, outros elementos tiveram significativo aumento de concentração, como é o caso do sílicio, já que a sílica não é removida por lixiviação (*Jenkins et al., 1996*).

No trabalho realizado por *Woytiuk (2006)* é apresentada uma análise dos efeitos da temperatura da água de lavagem, do tempo de lavagem e do tamanho da partícula de palha de cana, no processo de pré-tratamento das amostras por lixiviação com água. O experimento foi realizado com a submissão das amostras a condições diferentes de tratamento. Na Tabela 2.18 são apresentadas as condições analisadas.

Tabela 2.18. Características dos pré-tratamentos realizados em amostras de palha de cana de açúcar.

Sigla	Descrição	Temperatura (°C)	Duração (min.)	Tamanho da partícula (mm)
Q-L-P _u	Água Quente, Longa duração, Pulverizada	55	60	1
Q-C- P _u	Água Quente, Curta duração, Pulverizada	55	5	1
Q-L-P _i	Água Quente, Longa duração, Picada	55	60	50
Q-C-P _i	Água Quente, Curta duração, Picada.	55	5	50
F-L- P _u	Água Fria, Longa duração, Pulverizada.	25	60	1
F-C- P _u	Água Fria, Curta duração, Pulverizada.	25	5	1
F-L- P _i	Água Fria, Longa duração, Picada.	25	60	50
F-C-P _i	Água Fria, Curta duração, Picada.	25	5	50

Fonte: *Woytiuk (2006)*.

As amostras de palha utilizadas no trabalho foram coletadas em uma usina no Havaí. O material foi separado em partes iguais e todas as amostras submetidas a processos de secagem em forno e pesagem, para garantir homogeneidade. Em seguida as amostras foram submetidas ao fracionamento, resultando em partículas de duas dimensões, que foram chamadas de palha picada e palha pulverizada (triturada). No processo de lavagem adotado no experimento as amostras foram imersas completamente nos recipientes com água, procedendo uma agitação durante o primeiro e o último minuto de tratamento. O autor justifica a maior exposição das fibras na amostra, e explica que a agitação pode ser feita em escala industrial em tanques com agitadores, com resultados equivalentes *Woytiuk (2006)*.

Na análise dos resultados do experimento foram verificados os índices de remoção dos constituintes, o teor de cinzas e a umidade final em cada tratamento.

Após os tratamentos foi utilizado um procedimento de prensagem das amostras, com o objetivo de reduzir a umidade. Na análise de umidade das amostras foi verificado que as amostras trituradas apresentaram melhores resultados após a prensagem, com reduções próximas de 50% do teor de umidade. Os resultados do teor de cinzas e da composição elementar das cinzas das amostras tratadas e não tratadas são apresentados na Tabela 2.19.

Tabela 2.19. Resultados dos diferentes métodos de pré-tratamento de amostras de palha de cana.

(%) Óxidos	Amostras – não tratada		Amostras tratadas							
	Picada	Pulverizada	Q-L- P _u	Q-C- P _u	Q-L-P _i	Q-C-P _i	F-L- P _u	F-C- P _u	F-L-P _i	F-C-P _i
SiO ₂	67,12	64,09	77,47	80,99	74,91	73,93	81,19	80,58	73,36	72,03
Al ₂ O ₃	2,05	2,42	5,61	3,02	1,45	1,11	2,56	2,22	0,73	1,38
TiO ₂	0,29	0,28	0,43	0,30	0,15	0,13	0,30	0,28	0,13	0,17
Fe ₂ O ₃	1,83	2,27	2,97	2,43	1,05	0,89	2,32	2,37	0,85	1,08
CaO	6,50	8,04	5,58	5,58	5,83	6,21	5,44	5,98	5,97	6,11
MgO	2,91	3,62	1,21	1,14	2,40	2,68	1,10	1,23	2,33	2,45
Na ₂ O	0,50	0,57	0,82	0,27	0,40	0,56	0,27	0,19	0,47	0,75
K ₂ O	9,48	9,44	1,63	1,36	6,80	7,53	1,72	1,67	8,84	8,72
SO ₃	2,11	3,49	0,69	0,85	1,33	1,80	0,79	0,96	1,89	1,79
P ₂ O ₅	1,91	1,92	0,52	0,62	1,48	1,85	0,74	0,77	2,47	2,00
Indeterminados	2,22	1,27	2,12	2,95	2,53	1,74	3,19	3,40	1,41	1,61
Total de cinzas	11,92	9,02	11,09	9,55	10,68	10,68	9,19	10,47	9,11	8,93
Cl (%)	0,37	0,44	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,29	0,28

Fonte: *Woytiuk (2006)*.

Os resultados quanto a redução do teor de cinzas não parecem ser muito alentadores mas, em geral, os resultados foram positivos quanto a redução dos elementos inorgânicos das cinzas. A conclusão geral é que o processo de lixiviação têm boa eficiência na remoção de componentes inorgânicos.

Os resultados são variáveis quanto ao grau de remoção de cloro, magnésio, sódio, potássio, cálcio, fósforo e enxofre. Comparando os métodos considerados pelo autor como mais severo (Q-L-T) e o menos severo (F-C-P), conclui-se que a remoção de elementos menos solúveis em água, como Si, Al, Ti e Fe foi menos efetiva. Porém, o autor conclui que a redução dos teores de elementos como Ca, Mg, K, P e Cl, aumenta na medida que maior severidade é imposta ao tratamento (*Woytiuk, 2006*). Para tratamentos mais severos a remoção de componentes inorgânicos solúveis foi acima de 90%.

Os resultados dos métodos de tratamento empregados foram pouco eficientes na remoção contaminantes do solo.

Finalmente, o autor conclui que no caso de alguns métodos de pré-tratamento, os riscos de formação de incrustações e depósitos quando da combustão da palha da cana não são eliminados.

Portanto, a conclusão geral é que os procedimentos de pré-tratamento descritos não são necessariamente eficientes considerando o objetivo final de eliminação dos riscos de formação de

incrustações e depósitos quando da combustão da palha da cana. Isso deve-se ao fato da moderada redução do teor de cinzas da biomassa e, também, pelos resultados pouco satisfatórios na remoção de elementos inorgânicos como Ca, Mg, K, P. Em adição, a captação d'água poderia ser significativa, assim como o necessário tratamento dos efluentes. E mais, a umidade da biomassa seria aumentada em muito.

2.3.2 Geração de vapor em alta pressão e baixa temperatura, com superaquecimento externo

O caso descrito nesta seção foi escolhido para ser objeto de avaliação específica nesta dissertação. A referência é a planta de cogeração de BIOWANZE S.A, na Bélgica, que é apresentado em *Walter (2008)*. Como ilustração, o fluxograma do esquema de operação da planta de BIOWANZE é apresentado na Figura 2.3. Com o objetivo de melhorar o balanço de energia e de emissões de gases estufa na produção de etanol a partir de trigo, mas principalmente para se obter o máximo de créditos concedidos pelo governo local quando da produção de eletricidade a partir da biomassa, optou-se por utilizar farelo de trigo como combustível na geração de vapor em uma planta de cogeração.

Em um gerador de vapor com capacidade de 100 t/h, vapor é gerado a 93 bar e 430°C. A temperatura foi determinada como o limite superior, por causa das propriedades do farelo de trigo como combustível e a alta probabilidade de formação de depósitos e incrustações. Para que fosse possível garantir a auto-suficiência no abastecimento elétrico era necessário que vapor fosse gerado a 520°C, e a alternativa escolhida foi o superaquecimento externo até essa temperatura, com queima de biogás, produzido na própria fábrica a partir da biodigestão da vinhaça, e também de gás natural, que é utilizado como combustível complementar. Uma segunda caldeira a gás é utilizada para complementar a produção de vapor, quando necessário, gerando parte do fluxo de vapor a 93 bar/520°C.

A caldeira a farelo de trigo permite atender de 80% a 90% de toda energia consumida na planta, que tem demanda de vapor nominal de 119 t/h. O projeto da planta é concebido para que o gerador de vapor a gás natural garanta o suprimento de vapor para atender o nível mínimo de operação industrial (85 t/h), que corresponde ao fator de operação da fábrica de 70%.

A utilização do farelo de trigo como único combustível na geração de vapor impõe um aspecto crítico. Análises de sua composição indicam semelhanças com a composição da palha de arroz, e alta probabilidade de problemas técnicos e operacionais em geradores de vapor.

Os fluxos de vapor gerados na caldeira de farelo e na caldeira a gás são misturados em um coletor de vapor, no qual o vapor deve estar a 93 bar e 520°C. O fluxo máximo de vapor que passa pela turbina é 142 t/h, e o fluxo mínimo especificado é 84 t/h, que corresponde à capacidade mínima de produção de etanol da planta, que é de 70%. Na condição nominal de operação da planta que corresponde a 100% de capacidade de produção de etanol, a demanda de vapor é de 119 t/h.

Os principais parâmetros que caracterizam a operação da planta de cogeração BIOWANZE, operando na capacidade máxima de produção de etanol na temperatura ambiente de 10°C, são descritos na Tabela 2.20.

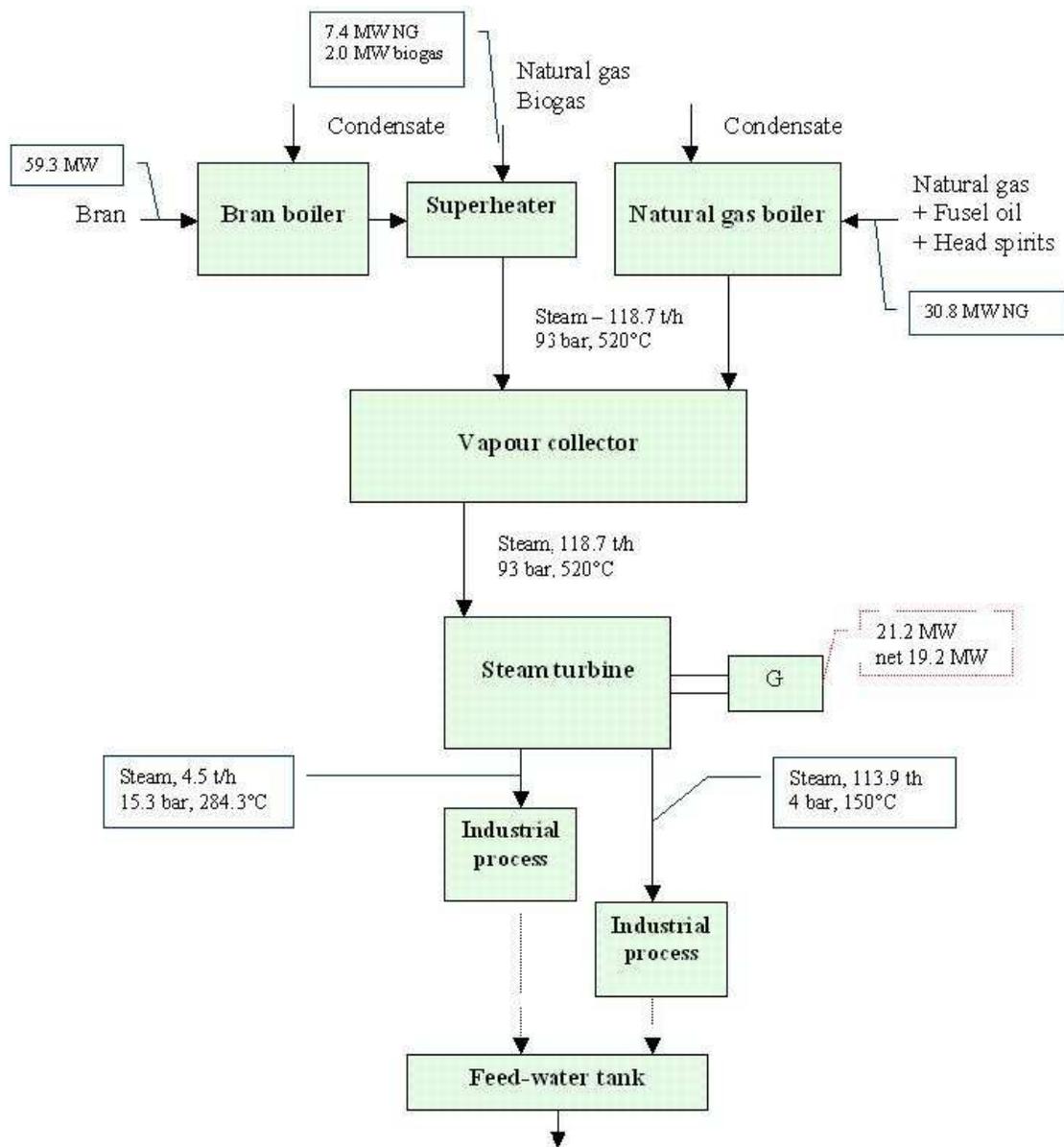
Tabela 2.20. Parâmetros operacionais da planta de cogeração Biowanze.

Parâmetros	Dispositivo	Unidade	Valor
Produção de vapor – 93 bar/520°C	Caldeira de Farelo	[t/h]	85
Produção de vapor – 93 bar/520°C	Caldeira a gás	[t/h]	33,8
Consumo de vapor – 93 bar/520°C	Turbina à Vapor	[t/h]	118,8
Extração de vapor – 15,3/284°C	Turbina à Vapor	[t/h]	4,5
Extração de vapor – 4 bar/150°C	Turbina à Vapor	[t/h]	113,9
Consumo de vapor – 11 bar	Destilação	[t/h]	4,9
Consumo de vapor – 4 bar	Secagem	[t/h]	113,9
Geração elétrica	Turbo-Gerador	[MW]	21,2

Fonte: *Walter (2008)*.

A potência elétrica bruta produzida, nas condições nominais, é 21,2 MW. Considerando a dedução do consumo interno de potência, que é estimado em 2 MW, a produção líquida de energia elétrica é estimada em 19,2 MW, garantindo a auto-suficiência da planta.

Quando a caldeira de farelo de trigo opera em sua capacidade nominal (100 t/h), sua eficiência térmica corresponde a 91%. Operando apenas com gás natural no superaquecedor, sem a queima de biogás, o aporte de energia devido à biomassa seria de 87%.



Fonte: *Walter (2008)*

Figura 2.3. Esquema simplificado de operação da planta de cogeração de BIOWANZE.

Capítulo 3

Caracterização do Problema

3.1 Unidade convencional de produção de etanol

Neste capítulo é realizada a caracterização do problema objeto de estudo, e são apresentadas informações do procedimento adotado na simulação e na análise da operação de sistemas de cogeração que empregariam como combustível apenas a palha da cana.

Para caracterização da unidade industrial foram considerados os mesmos parâmetros assumidos em um estudo de avaliação do potencial de produção de eletricidade com uso de biomassa residual de processos industriais, inclusive bagaço e palha da cana (Walter *et al.*, 2005). Uma unidade industrial com moagem anual de 1,8 milhão de toneladas de cana era considerada padrão alguns anos atrás, mas atualmente esta moagem está abaixo da capacidade média das usinas brasileiras. A opção por utilizar tais dados deve-se à conveniência de se poder validar o procedimento de simulação empregado nesta dissertação, em função das informações disponíveis que caracterizam uma unidade industrial do setor sucroalcooleiro. Os parâmetros considerados são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Parâmetros considerados na caracterização de uma unidade típica do sucro-alcooleiro.

Parâmetro	Unidades	Valor
Processamento de cana anual	[tonelada de cana/ano]	1.800.000
Dias de safra	[dias]	200
Fator de capacidade	[%]	90
Moagem média	[tonelada de cana/h]	416,7
Pressão e temperatura vapor de processo	[bar/°C]	2,5 bar/137°C
Consumo elétrico da planta	[kWh/ t de cana]	12
Consumo elétrico acionamento moagem	[kWh/ t de cana]	16
Produção de etanol	[l/t de cana]	85
Produção de vinhoto	[l/ álcool]	10

Fonte: Walter *et al.*, (2005).

Foram considerados sistemas de cogeração com turbinas a vapor, com valores usuais de pressão/temperatura do vapor gerado. Os sistemas de cogeração a vapor empregados para

maximizar a produção de energia elétrica utilizam turbinas de extração/condensação, enquanto que os sistemas que visam assegurar a auto-suficiência elétrica, ou pequena geração de excedentes, empregam turbinas de contrapressão. A maioria das usinas antigas opera com sistemas de acionamento mecânico das moendas e, para isso, empregam turbinas a vapor de contrapressão, o que prejudica a geração de energia elétrica excedente, por causa da baixa eficiência dessas turbinas.

Por outro lado, as usinas modernas já empregam total eletrificação dos acionamentos, ou seja, motores elétricos de grande capacidade são utilizados ao invés das turbinas. Com isso, mais vapor pode ser empregado nas turbinas de geração elétrica, que são mais eficientes, o que permite a geração de mais eletricidade excedente.

A maior eficiência dos sistemas de cogeração depende fundamentalmente dos níveis de pressão e de temperatura do vapor gerado, sendo que a geração de vapor em altos níveis de pressão e temperatura favorece a geração de excedentes de energia elétrica. Os níveis de pressão do vapor em unidades de produção do setor sucroalcooleiro têm aumentado ao longo dos anos, justamente em função do objetivo de produção de mais eletricidade excedente. Os geradores de vapor que operam a 22 bar não são usuais em novos projetos, e caldeiras de 32, 42 e 62 bar foram instaladas desde os anos 1980. Mais recentemente a geração de vapor tem sido praticada nos níveis de 90bar, e até 100 bar.

A respeito das temperaturas, para vapor gerado a 22 bar temperaturas entre 280 e 320°C são usuais. Para a geração de vapor a 62 bar, por exemplo, temperaturas na faixa de 450 a 480°C são comuns, enquanto que para a geração a 90-100 bar, a temperatura do vapor gerado deve estar entre 500 e 520°C.

Nas usinas de açúcar e álcool, atualmente, os sistemas de cogeração a vapor operam usando bagaço como combustível, e em quase todos os casos a operação ocorre apenas no período da safra. Não há esforço significativo para a produção de bagaço excedente, pois as possibilidades de comercialização são restritas, e até têm sido reduzidas. Poucas usinas utilizam a palha como combustível, ainda que de forma complementar ou em testes de operação. A razão principal é que não houve necessidade de, até o momento, se economizar bagaço de cana ou destiná-lo para outro uso. Também, sabe-se de problemas operacionais em geradores de vapor nos quais a palha foi usada como combustível.

Com a disseminação da colheita mecanizada, e a possibilidade de emprego em larga escala da palha da cana como combustível, o potencial de produção de eletricidade é ampliado. No caso específico analisado nesta dissertação, a queima da palha é motivada pela oportunidade de se disponibilizar o bagaço como matéria prima para aumentar a produção de etanol, a partir da hidrólise. No caso extremo, todo o bagaço seria destinado à hidrólise, e palha de cana seria utilizada como único combustível para a geração de vapor em uma usina convencional.

Os investimentos em melhorias para aumentar o rendimento no setor sucroalcooleiro são constantes devido ao crescente consumo de etanol combustível como alternativa ao uso da gasolina. Atualmente, o etanol é produzido pela fermentação direta do caldo originado no processo de extração da cana-de-açúcar. O desenvolvimento de tecnologias para obtenção de etanol a partir de material celulósico tem motivado inúmeros esforços de pesquisas em muitos países. O processo de hidrólise permite a conversão do material celulósico em açúcares, através da hidrólise ácida ou enzimática, para posterior fermentação.

A produção de etanol via da hidrólise do bagaço de cana é entendida como a produção de biocombustível de segunda geração, rota que pode permitir um aumento significativo na capacidade produtiva em relação aos níveis de produção atuais. O bagaço de cana é um material que apresenta vantagens para produção de etanol, via hidrólise, devido ser um subproduto do processo de produção de etanol de cana-de-açúcar e estar disponível na usina, proporcionando baixos investimentos em infra-estrutura. Também, é importante o fato de ter mercado muito restrito para usos alternativos, com baixo valor agregado (*Dias, 2008*).

O uso da palha de cana como combustível em uma unidade convencional de produção de etanol é condição necessária para a integração de uma unidade de hidrólise do bagaço de cana ao processo convencional. Se for possível a destinação de todo bagaço gerado para o processo de hidrólise, a capacidade produtiva de etanol da unidade convencional poderia ser aumentada em cerca de 25% (*Walter e Ensinas, 2008*).

O processo de produção via hidrólise tem uma sequência de etapas de pré-tratamentos da biomassa, para posterior processamento. A etapa inicial de preparação da biomassa consiste na separação das componentes do material lignocelulósico que constitui o bagaço. O processo promove a ruptura da estrutura formada por lignina, celulose e hemicelulose, através do uso de vapor, permitindo o aproveitamento individual de cada fração. A celulose e a hemicelulose

devem ser hidrolisadas para a obtenção de açúcares fermentescíveis, e a lignina pode ser utilizada como combustível em caldeiras (Dias, 2008).

A integração ideal do processo de produção etanol por hidrólise ao processo convencional deve ocorrer com o compartilhamento de operações do processo convencional. Estimativas dos parâmetros operacionais de uma planta de hidrólise, como o consumo de vapor, o consumo de eletricidade e a produção de etanol por tonelada de bagaço hidrolisado, são apresentados na Tabela 3.2. Estes valores são obtidos em referência, e são aqui apresentados como simples ilustração.

Tabela 3.2. Parâmetros operacionais da planta de hidrólise.

Parâmetro	Unidade	Valor
Consumo de vapor (37 bar)	[kg/l etanol]	1.14
Consumo de vapor (2.5 bar)	[kg/l etanol]	4.6
Consumo de eletricidade	[kWh/t bagaço]	92.5
Produção de etanol	[l/t bagaço]	149.3
Volume residual de vinhaça	[%]	33

Fonte: *Walter e Llagostera (2008)*.

No caso considerado nesta dissertação, o fornecimento de vapor para o atendimento da demanda do processo convencional ocorreria com a queima exclusiva da palha da cana, enquanto o fornecimento de vapor para atender as operações do processo de hidrólise, ocorreria exclusivamente com a utilização, como combustível, da lignina obtida como subproduto do processo de hidrólise. Esta é uma forte simplificação do problema, e permite que o sistema de cogeração objeto de análise seja analisado isoladamente.

3.2 Procedimento de Simulação

3.2.1 Cycle-Tempo

A operação das configurações dos sistemas de cogeração foi simulada computacionalmente com auxílio do *software* Cycle-Tempo, desenvolvido e disponibilizado aos centros de pesquisa, sem custos, pela TU Delft – Delft University of Technology. O *software* tem recursos para modelagem termodinâmica e otimização de sistemas térmicos e de refrigeração. O

software Cycle-Tempo permite a definição de diferentes configurações, através da interligação de diferentes componentes.

O esquema do sistema de cogeração considerado nas simulações computacionais no Cycle-Tempo é apresentado na Figura 3.1 Simplificadamente é um sistema no qual a geração de vapor ocorre em um único nível de pressão e vapor é expandido em uma turbina de contrapressão, que aciona um gerador elétrico. O vapor de escape da turbina é usado no atendimento da demanda de vapor de processo.

Para o uso do Cycle-Tempo, alguns dados de entrada são impostos pelo usuário, tais como pressão e temperatura do vapor gerado, pressão de vapor de escape da turbina, etc. Outros parâmetros são definidos quando da escolha do procedimento de cálculo em alguns equipamentos, como níveis de eficiência, perdas de carga e perdas térmicas. Finalmente, parâmetros são impostos automaticamente a partir da definição da interconexão entre equipamentos.

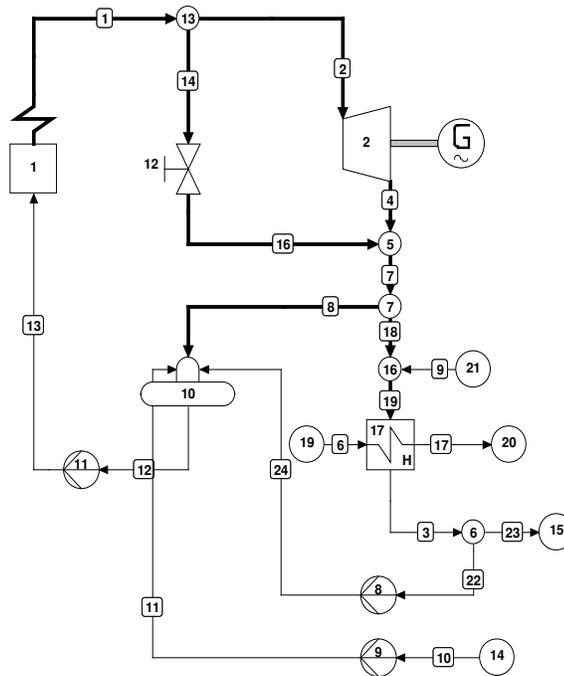


Figura 3.1 Esquema do sistema de cogeração do caso 1 modelado no Cycle-Tempo.

Nota: Componentes do sistema (1-Gerador de vapor; 2-Turbina contrapressão; (8, 9 e 11)-Sistema de Bombeamento; 10-Desaerador; 12-Válvula de expansão; 17-Processo industrial; 21-Dessoraquecedor)

No caso geral os principais parâmetros de cada equipamento são inseridos em janelas de entrada específicas, como ilustrado na Figura 3.2, para o gerador de vapor. Para as conexões o procedimento é semelhante, sendo possível inserir os dados para tubulações e eixos selecionados.

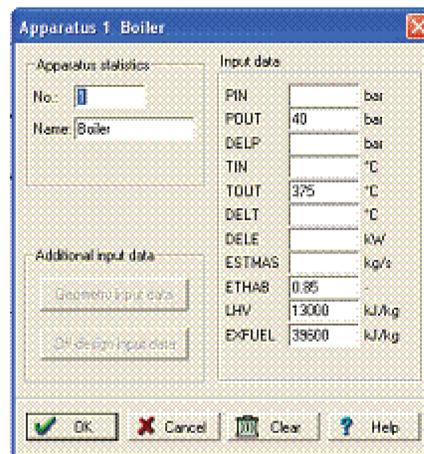


Figura 3.2. Janela de entrada de dados de aparelho.

Os resultados dos cálculos podem ser apresentados em gráficos, tabelas ou visualizados diretamente nas mensagens de saída no próprio diagrama de representação do sistema térmico. As janelas de mensagens de saída indicam as ocorrências durante as iterações e se os cálculos foram concluídos com sucesso. Os resultados exibidos no diagrama são visualizados na forma de um quadrante contendo no máximo quatro variáveis, escolhidas de acordo com especificação do usuário.

3.2.2 Configurações

A potência do gerador de vapor é imposta no procedimento de cálculo, em função da energia disponível na massa de palha da cana, e da eficiência térmica do gerador de vapor em relação à energia contida no combustível, que foi assumida ser 85% em relação ao PCI da palha da cana.

No Caso 1, como comentado anteriormente, as configurações do sistema de potência consideram a geração de vapor superaquecido com temperatura máxima de 400°C. O vapor gerado expande em uma turbina de contra pressão até a pressão de 2,5 bar. O fluxo de vapor pela

válvula redutora foi imposto, para representar, na média, desequilíbrios, entre as linhas de alta e baixa pressão. Os fluxos de vapor se misturam à mesma pressão (2,5 bar) e resultam em um estado levemente superaquecido na entrada do processo; a temperatura admitida como ideal neste caso deve ser 137°C.

Para a unidade industrial considerada com capacidade média de moagem de 416,7 toneladas de cana por hora, o fluxo mínimo de vapor gerado deve ser de 125 t/h, para atender uma demanda mínima fixada em 300 kg de vapor por tonelada de cana moída.

O fluxo de vapor desviado para a válvula redutora, em função do desequilíbrio entre as linhas de alta e de baixa pressão, na simulação, foi fixado conservadoramente em 5%.

Os equipamentos que representam o processo produtivo são indicados de forma simplificada no diagrama da Figura 3.1 por um trocador de calor. Para efeito de cálculo, vapor superaquecido a 2,5 bar cede calor para um fluxo auxiliar, até sua completa condensação. Para melhor representar perdas térmicas na recuperação de condensado, a temperatura do condensado à saída é 100°C. Apenas para manter a coerência dos cálculos, foi definida que a corrente fria é um fluxo de água fria a 2,5 bar, com temperatura de 20°C na entrada e pressão de 1,5 bar e 90°C na saída.

Caso a mistura de vapor a 2,5bar esteja muito superaquecida, a temperatura na entrada do processo pode ser controlada através da injeção de água a 20°C, o que é representado no diagrama da Figura 1 pelo dessuperaquecedor. O fluxo à 100°C na saída do trocador representa todo o vapor condensado do processo produtivo, sendo a maior parte recuperada e enviada ao desaerador, e parte descartada do ciclo (para representar perdas). Na simulação o fluxo é desviado para um aparelho que representa as perdas e irreversibilidades do processo.

Também para efeito de simulação, é considerado que parte do fluxo de vapor da linha de baixa pressão é destinado ao aquecimento da mistura de fluxos no desaerador. O fluxo de vapor desviado é resultado do procedimento de cálculo, para que se respeite o balanço de energia no desaerador e seja alcançado o estado termodinâmico de saída da água de alimentação, que precisa ser definido pelo usuário.

Foi considerado que 80% do vapor condensado no processo é recuperado e retorna ao ciclo com temperatura de 100°C, para ser aproveitado na alimentação do gerador de vapor. Assim, as perdas (20% do fluxo de vapor de processo) são repostas, pelo bombeamento de água (de *make-up*) à 20°C.

As condições da água de alimentação do gerador de vapor resultam do balanço de massa e de energia no desaerador. Na operação dos sistemas de cogeração reais, a temperatura do fluxo de água utilizado na alimentação do sistema é mantida entre 105 °C e 115 °C. Foi imposto que na saída do desaerador a temperatura da água de alimentação do gerador de vapor seja de 105°C, o que não corresponde à operação otimizada do sistema.

Para uma unidade industrial com capacidade de processamento de 10.000 toneladas de cana por dia, ou 416,7 t/h, a quantidade total de palha com 15 % de umidade absoluta disponível no campo foi estimada em 68,6 t/h; considerando o limite máximo de recuperação de 50 %, a máxima disponibilidade de palha na usina seria de 34,37 t/h.

Para o Caso 2, o sistema de cogeração é essencialmente o mesmo, a partir da geração de vapor superaquecido a 525 °C. No *software* o superaquecedor foi representado por um aquecedor a jusante do gerador de vapor, que opera com eficiência térmica de 85% em relação ao PCI do biogás

Na Tabela 3.3 são apresentados alguns parâmetros considerados no procedimento de cálculo.

Tabela 3.3. Parâmetros adotados no procedimento de simulação.

Parâmetros	Unidade	Valor
Energia térmica desenvolvida no gerador de vapor	[MW]	105,3
Mínima demanda vapor processo	[kg/t Cana]	300
Pressão vapor de processo ¹	[bar]	2,5
Demanda elétrica da planta ¹	[kWh]	28
Eficiência gerador de vapor ¹	[%]	85
Eficiência isoentrópica da turbina ¹	[%]	80
Eficiência gerador elétrico	[%]	97
Eficiência superaquecedor	[%]	85
Eficiência isentrópica das bombas ²	[%]	75

Fonte de parâmetros de referência: ¹(Walter, 2005), ²(Fox et al. 2006).

Os valores de eficiência isentrópica adotados para as bombas são baseados em índices médios usualmente encontrados na literatura. As eficiências dos motores elétricos são definidas pelo software. O consumo de energia elétrica do sistema de bombeamento não é deduzido diretamente da potência elétrica calculada e não foi considerada na análise feita, por

simplificação. Os dados de consumo elétrico do sistema de bombeamento e o resumo das eficiências assumidas nos cálculos são apresentados por uma figura no Apêndice A.

3.3 Caso estudado – Uso exclusivo da palha de cana

O caso estudado nesta dissertação é o de uma destilaria convencional com capacidade de moagem de 10.000 toneladas de cana por dia, gerando vapor a partir da queima exclusiva dos resíduos da colheita da cana (pontas e folhas) nas caldeiras. Foi considerada que a máxima disponibilidade de palha na usina equivale a 50% da palha existente no campo, antes da colheita. A palha não transportada para a usina seria deixada no campo, para proteger o solo e a planta, no processo de rebrota.

Nas simulações feitas foi considerada a substituição dos sistemas de acionamento convencionais, mecânicos, por sistemas elétricos. Como a demanda de vapor é um parâmetro crítico para que se alcance a auto-suficiência energética, principalmente na situação em que há restrição à disponibilidade de biomassa, foi considerada uma drástica redução da demanda, até um valor mínimo de 300 kg de vapor por tonelada de cana processada. O índice mínimo de demanda adotado baseia-se no potencial de redução do consumo de vapor. A redução do consumo de vapor para níveis inferiores a 400 kg/tonelada de cana requer investimentos significativos, mas admite-se que sejam tecnicamente possíveis em curto prazo (*Walter, 2008*).

Devido à utilização de motores elétricos para o acionamento dos equipamentos do processo de moagem, o consumo elétrico próprio da planta ficaria acima da média das usinas já instaladas, que apresentam uma média de 12 kWh por tonelada de cana, enquanto o consumo adotado no caso proposto foi de 28 kWh por tonelada de cana processada.

Caso 1: Redução da temperatura do vapor gerado

Como alternativa aos problemas de incrustações e corrosão potencialmente associados ao uso da palha de cana como combustível, foi analisada a limitação da temperatura do vapor gerado a no máximo 400°C. Estudos realizados com combustíveis que apresentam problemas críticos de corrosão nos geradores de vapor, e que possuem teores mais elevados de componentes

inorgânicos, em comparação à palha da cana, mostraram que até esse nível de temperatura do vapor gerado não há graves problemas de corrosão. Isso se deve a menor temperatura na superfície das tubulações em contato com os gases de combustão, e a menor tendência de formação de depósitos (ver Capítulo 2).

Em função da redução da temperatura do vapor gerado, e conseqüentemente também da pressão do vapor gerado, há redução da produção de eletricidade. Na análise dos resultados, como é apresentado no Capítulo 3, foi considerada que uma restrição que precisa ser atendida é a geração de eletricidade ao menos para garantir a auto-suficiência do abastecimento elétrico. Outras duas condições impostas são o atendimento da demanda térmica, na pior das hipóteses equivalente a 300 kg de vapor por tonelada de cana moída, e que a máxima disponibilidade de biomassa corresponde à recuperação de 50% da palha existente no campo.

Os dados referentes às características energéticas da palha da cana, utilizados nesta dissertação, foram obtidos de relatórios de estudo sobre o potencial energético da palha da cana, desenvolvidos pelo CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, e refletem os parâmetros médios (*Hassuanni et al., 2005*).

Os índices considerados para estimar a quantidade disponível de resíduos para combustão têm como base um teor médio de fibras na cana de 14% e umidade absoluta de 50% para o bagaço, ou seja, a disponibilidade de bagaço na usina é de 280 kg por tonelada de cana processada. Para a palha foi considerado um teor de umidade em torno de 15 %, o que implica disponibilidade de 164,7 kg de palha por tonelada de cana colhida no campo, considerando que a massa de bagaço seco é igual à da palha seca, gerando 116,7 t/h, para a unidade industrial considerada. Na Tabela 3.4, são apresentados os valores de umidade e do poder calorífico considerados nesta dissertação.

Tabela 3.4. Poder calorífico de bagaço e palha de cana de acordo com umidade absoluta.

Resíduo	Umidade (%)	PCI [MJ/kg]
Bagaço de cana	50	7,5
Palha de cana	15	13,0

Caso 2: Superaquecimento externo do vapor gerado

A alternativa de redução da temperatura do vapor gerado, proposta no Caso 1, para o uso exclusivo da palha da cana como combustível, restringe a produção de excedentes de eletricidade. Entretanto, o aumento na capacidade de geração de eletricidade pode ser alcançado através do aquecimento do vapor externamente ao gerador de vapor, sem alterar as condições ideais de operação da caldeira quando do emprego da palha, unicamente.

O segundo caso analisado nesta dissertação considera a geração de vapor em temperatura abaixo de 400°C e elevadas pressões, restrito ao uso de apenas 50% da palha disponível no campo após a colheita. A alternativa considera a instalação de um superaquecedor após o gerador de vapor, que opere exclusivamente com a queima do biogás produzido no processo de biodigestão da vinhaça produzida. A Figura 3.3 apresenta o diagrama do sistema térmico que representa o Caso 2, indicando os parâmetros termodinâmicos calculados a partir da simulação no *software* Cycle-Tempo.

A tecnologia de superaquecimento externo do vapor gerado pode se tornar viável, quando é admitido o aproveitamento do biogás produzido no processo de biodigestão vinhaça. A possível elevação da temperatura do vapor gerado depende das características energéticas e da quantidade de biogás disponibilizado para queima no superaquecedor. No caso estudado foram considerados como referência os índices médios de produção de vinhaça nas usinas do setor sucroalcooleiro, e também foi considerada a instalação de um sistema de biodigestão com capacidade de tratamento de 100% do volume diário de vinhaça produzida. Na Tabela 3.5 são apresentados os parâmetros de produção de vinhaça e os parâmetros de um sistema de biodigestão convencional.

Tabela 3.5. Parâmetros do sistema de biodigestão de vinhaça.

Parâmetros	Unidade	Valor
Produção de etanol	[m ³ /h]	35
Produção de vinhaça	[l/l]	10
Vazão de vinhaça	[m ³ /h]	350
Produção de biogás	[Nm ³ /h]	3500
PCI do gás	[kJ/Nm ³]	21.320
Energia térmica fornecida pelo biogás	[MWh]	20,7

Fonte: (Brasmetano Ind. Ltda, 2005, em Lamonica, 2008).

Neste caso, foi considerado que o sistema de biodigestão produziria 10 m^3 de gás para cada m^3 de vinhaça tratada, disponibilizando um total de energia térmica de $1790,8 \text{ GJ/dia}$, ou um fornecimento de $497,5 \text{ MWh/dia}$ para a alimentação do superaquecedor. O sistema de biodigestão considerado tem como referência um sistema de biodigestão anaeróbico mencionado em *Lamonica (2008)*, com capacidade de tratamento de $2760 \text{ m}^3/\text{dia}$ de vinhaça por unidade.

As condições operacionais impostas são similares às descritas no Caso 1: (1) assegurar a auto-suficiência elétrica da planta, tendo como principal objetivo, no caso, maximizar a geração de excedente elétrico; (2) atender uma demanda de vapor no mínimo igual a 300 kg de vapor por tonelada de cana; (3) assumida que a máxima disponibilidade de palha na usina seja 50% da palha existente no campo.

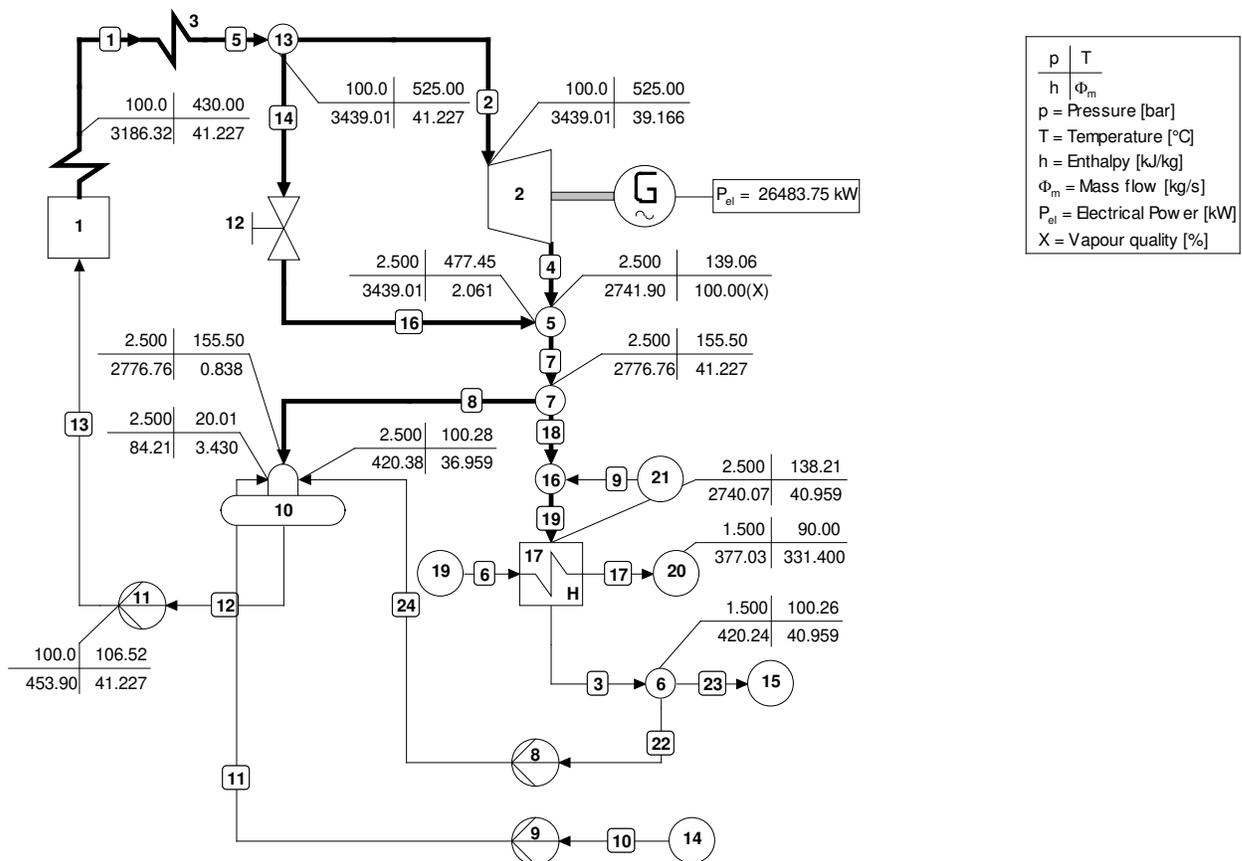


Figura 3.3. Visualização dos parâmetros termodinâmicos calculados no *software* Cycle-Tempo.

Um esquema da configuração tratada no Caso 2, no *software Cycle-Tempo* é apresentada na Figura 3.3. O caso representado à geração de vapor à 100 bar, 430°C, e superaquecimento externos a 520°C. A geração elétrica bruta seria 26.5 MW.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Caso 1 - Redução da temperatura do vapor gerado

O Caso 1 corresponde a uma alternativa segura do ponto de vista dos possíveis problemas operacionais em geradores de vapor que usam bagaço de cana como combustível, que resultam da formação de depósitos e incrustações. As alternativas consideradas são sistemas de cogeração a vapor, com turbinas de contrapressão, com vapor gerado no máximo a 400 °C, e em níveis de pressão compatíveis. Por causa da restrição da disponibilidade de biomassa, não é possível a utilização de sistemas com turbinas de extração-condensação. Foram avaliados sistemas de cogeração em que a pressão do vapor gerado varia entre 20 e 45 bar, e as temperaturas do vapor gerado são decrescentes a partir de 400°C.

A avaliação feita tem como objetivo encontrar a configuração que possibilite a geração de vapor na menor temperatura possível, mas atendendo simultaneamente as condições impostas: demanda de vapor de processo no mínimo equivalente à 300 kg/t de cana moída, geração de potência elétrica capaz de garantir a auto-suficiência da unidade industrial, e a disponibilidade máxima de palha para o uso como combustível equivalente a 50% da palha existente no campo, antes da colheita.

Assim, para análise inicial, os resultados das configurações que foram observados foram o fluxo total de vapor gerado, o fluxo de vapor à entrada do processo industrial, e seu estado termodinâmico, e a potência elétrica produzida. Na entrada do processo o vapor a pressão de 2,5bar é resultante da mistura entre o fluxo de vapor expandido na turbina de contra-pressão e a parcela do fluxo de vapor que é desviado e expandido em válvulas redutoras de pressão. Os estados termodinâmicos na saída do processo e na saída do desaerador foram fixados, e são impostos no simulador.

Os resultados obtidos na simulação da configuração para cinco níveis de pressão (20, 25, 30, 35, 40 e 45 bar) e para oito valores de temperatura do vapor gerado, inferiores a 400°C, são apresentados nas Tabelas 4.1 a 4.6.

Tabela 4.1. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 20 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
20 bar/390 °C	136,2	316,6	-	192,0	32,90	4,85
20 bar/380 °C	137,3	318,2	-	184,0	32,62	4,62
20 bar/370 °C	138,4	321,0	-	177,0	32,31	4,31
20 bar/360 °C	139,5	323,4	-	169,0	32,35	4,01
20 bar/350 °C	140,6	326,0	-	161,5	32,05	3,71
20 bar/340 °C	141,8	328,8	-	151,7	31,76	3,76
20 bar/330 °C	143,0	330,7	-	145,6	31,16	3,16
20 bar/320 °C	144,0	333,7	-	137,6	30,90	2,90

Tabela 4.2. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 25 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
25 bar/390 °C	136,6	317,0	-	174,2	35,50	7,5
25 bar/380 °C	137,7	319,0	-	166,6	35,20	7,2
25 bar/370 °C	138,8	321,1	-	158,9	34,93	6,9
25 bar/360 °C	140,0	323,7	-	151	34,64	6,6
25 bar/350 °C	141,2	326,4	-	143,3	34,36	6,4
25 bar/340 °C	142,5	329,3	-	135,5	34,10	6,1
25 bar/330 °C	143,8	332,4	-	127,6	33,83	5,8
25 bar/320 °C	145,0	335,8	99,22	127,4	33,58	5,6

Tabela 4.3. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 30 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
30 bar/390 °C	137,1	317,6	-	159,4	37,56	9,5
30 bar/380 °C	138,2	320,0	-	151,7	37,28	9,3
30 bar/370 °C	139,4	322,4	-	144	37,00	9,0
30 bar/360 °C	140,6	325,0	-	136,2	36,71	8,7
30 bar/350 °C	141,8	327,9	-	128,4	36,46	8,4
30 bar/340 °C	143,1	330,8	99,31	127,4	36,18	8,2
30 bar/330 °C	144,4	333,9	98,50	127,4	35,93	7,9
30 bar/320 °C	145,8	336,9	97,66	127,4	35,71	7,7

Tabela 4.4. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 35 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
35 bar/390 °C	137,6	318,3	-	146,6	39,30	11,3
35 bar/380 °C	138,8	320,7	-	138,9	39,01	11,0
35 bar/370 °C	139,9	323,4	-	131,2	38,73	10,7
35 bar/360 °C	141,2	326,2	99,60	127,4	38,46	10,4
35 bar/350 °C	142,5	329,0	98,80	127,4	38,21	10,2
35 bar/340 °C	143,8	332,0	97,98	127,4	37,96	9,9
35 bar/330 °C	145,2	335,2	97,14	127,4	37,71	9,7
35 bar/320 °C	146,5	338,6	96,27	127,4	37,48	9,5

Tabela 4.5. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 40 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
40 bar/390 °C	138,2	319,0	-	135,4	40,78	12,8
40 bar/380 °C	139,5	321,4	-	127,6	40,50	12,5
40 bar/370 °C	141,3	324,1	99,24	127,4	40,22	12,2
40 bar/360 °C	142,2	327,1	98,44	127,4	39,96	8,9
40 bar/350 °C	143,6	330,1	97,61	127,4	39,70	11,7
40 bar/340 °C	144,9	333,2	96,77	127,4	39,45	11,4
40 bar/330 °C	146,5	336,7	95,90	127,4	39,22	11,2
40 bar/320 °C	147,9	340,4	95,00	127,4	38,98	10,9

Tabela 4.6. Resultados das simulações – Caso 1, vapor gerado a 45 bar e temperaturas abaixo de 400 °C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
45 bar/390 °C	138,6	320,0	99,79	127,41	42,06	14,0
45 bar/380 °C	139,8	322,6	99,00	127,41	41,78	13,8
45 bar/370 °C	141,1	325,4	98,19	127,41	41,51	13,5
45 bar/360 °C	142,4	328,3	97,37	127,41	41,26	13,3
45 bar/350 °C	143,8	331,5	96,52	127,41	41,00	13,0
45 bar/340 °C	145,3	334,7	95,65	127,41	40,75	12,7
45 bar/330 °C	146,7	338,3	94,74	127,41	40,51	12,5
45 bar/320 °C	148,3	341,8	93,80	127,41	40,29	12,3

Os resultados obtidos indicam que em todos os casos a mínima demanda de vapor do processo convencional de produção de etanol, assumida como equivalente a no mínimo 300 kg de vapor/t de cana pode ser atendida. Em todos os casos o vapor é gerado empregando-se 50% da palha disponível no campo. Para a usina considerada, 300 kg/t de cana equivale a 125 t/h de vapor a 2,5 bar e, nos casos analisados, o fluxo de vapor disponível à entrada do processo supera em 5 a 14% o valor da meta.

Dos resultados apresentados, a geração de vapor a 20 bar/390°C é que apresenta menor resultado de geração de vapor, e que permite o atendimento de uma demanda equivalente a 316,6 kg/t de cana. Como são consideradas turbinas de contra pressão, a menor geração de vapor resulta na menor geração de potência nos casos analisados, em torno de 13,7 MW, o que corresponde a 32,9 kWh/t de cana. No caso, a temperatura resultante da mistura dos fluxos de vapor a pressão de 2,5 bar atinge temperatura de 192 °C.

Devido às restrições impostas na entrada de dados do programa o resultado obtido para a parcela do fluxo de vapor desviado para o aquecimento da água no desaerador não apresenta variação significativa para todas as configurações. Em todos os casos foi imposta que a temperatura do vapor condensado na saída do processo é mantida a 100°C, com pressão de 1,5 bar, e o fluxo de água na saída do desaerador esteja a 105°C.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados do fluxo de vapor atingido na entrada do processo em função da temperatura do vapor gerado, para cada nível de pressão considerado nas simulações.

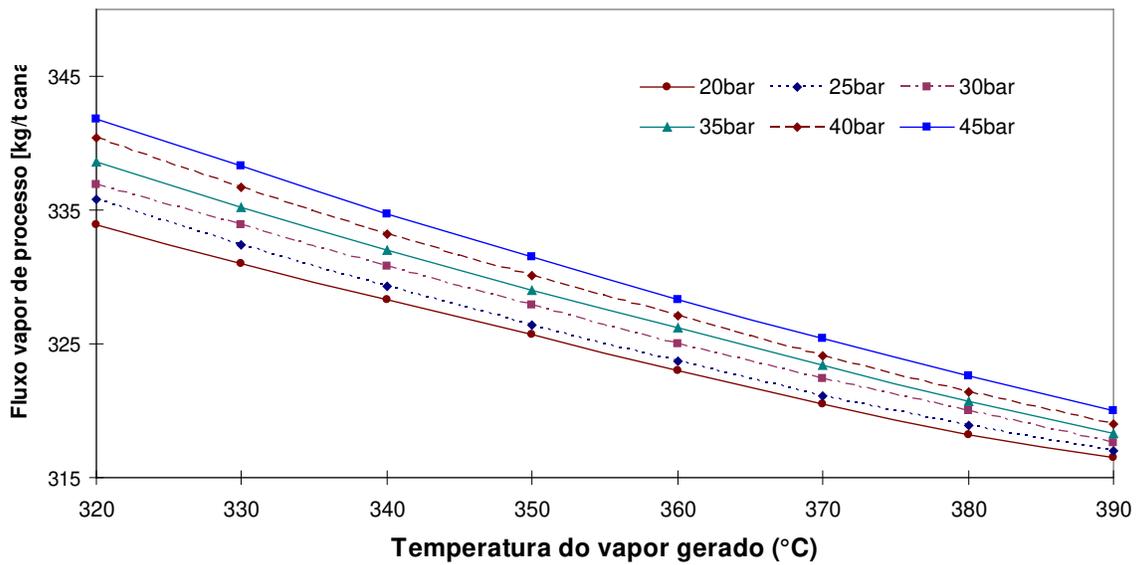


Figura 4.1 Resultados simulação – Fluxo de vapor disponível na entrada do processo.

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados da temperatura do vapor a 2,5 bar, resultante dos fluxos expandidos na turbina de contrapressão e nas válvulas redutoras, em função da temperatura do vapor gerado, e para os cinco níveis de pressão analisados.

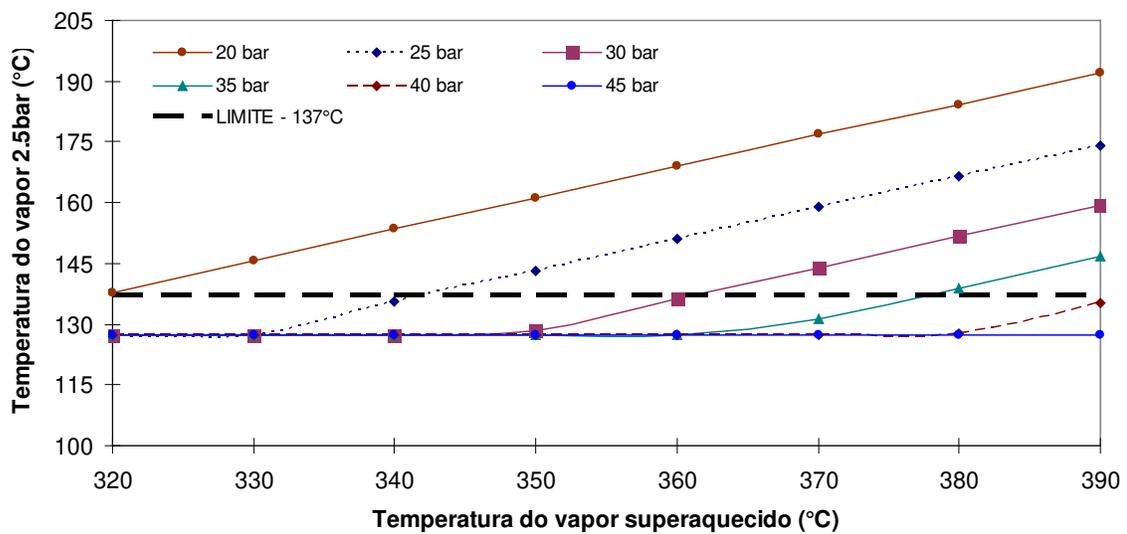


Figura 4.2. Resultados simulação – temperatura do fluxo de vapor de baixa pressão a 2,5bar na entrada processo.

A temperatura de 137°C, considerada como necessária, e indicada na figura por uma linha horizontal segmentada, é para garantir que mesmo com perdas de energia a demanda de vapor de processo possa ser atendida. Pode-se verificar na Figura 4.2, que para o vapor gerado a 20 bar, em qualquer temperatura do intervalo analisado, o vapor a 2,5 bar atende a condição de temperatura acima de 137 °C na entrada do processo, entretanto para o vapor gerado a 25 bar, a temperatura do vapor gerado deve estar acima de 340 °C, para que o vapor à 2,5 bar atenda as condições à entrada do processo (se gerado a 340 °C após a mistura estaria a temperatura de 135,5 °C). No caso da geração de vapor à pressão a 30bar, o vapor deve ser gerado acima de 360 °C, (quando a temperatura do vapor a 2,5 bar atinge 136,2 °C). Seguindo a análise dos resultados, observa-se que com a geração de vapor a 45 bar não seria possível satisfazer a condição de geração de vapor abaixo de 400 °C, bem como a condição associada ao estado termodinâmico do vapor à entrada do processo.

Os resultados de geração de potência obtidos indicam que em todos os casos a demanda elétrica mínima do processo industrial pode ser atendida. A eletricidade que poderia ser comercializada com a rede, ou repassada à unidade produtora de etanol por hidrólise, varia de 20 a 50% do consumo próprio, estimado em 28 kWh/t cana, considerando a eletrificação de todo acionamento mecânico da planta.

A configuração na qual se gera vapor no maior nível de pressão e temperatura, e que atende as condições impostas é de 40 bar e temperatura de 390 °C, apresentando resultados de potência elétrica gerada, iguais a 40,8 kWh por tonelada de cana processada, com produção de 319 kg de vapor por tonelada de cana e temperatura do vapor na entrada do processo a 135,4°C. Portanto, todas as condições impostas são atendidas.

Na Figura 4.3 são apresentados resultados da potência elétrica gerada para os cinco níveis de pressão do vapor gerado, em função da temperatura do vapor gerado.

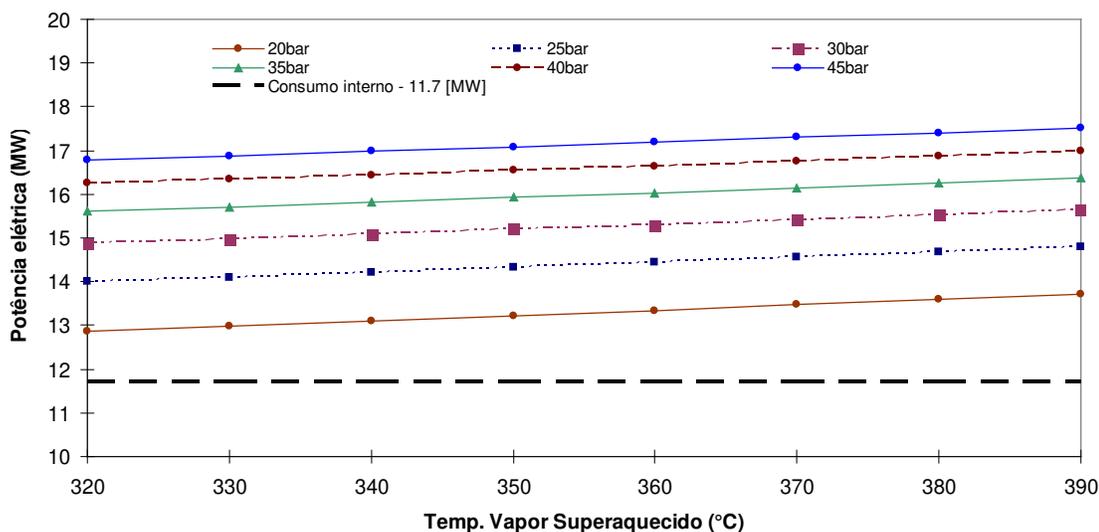


Figura 4.3. Resultados simulação – potência elétrica gerada.

Unicamente do ponto de vista da geração de potência elétrica, a diferença entre a maior e a menor capacidade de geração é cerca de 3,5 MW. Em todos casos é possível a produção de energia elétrica excedente, com capacidade excedente que varia de pouco mais de 2 MW até aproximadamente 6 MW. Deve ser lembrado que no Caso 1 a prioridade não é a maximização da geração de excedente elétrico.

Alguns dos resultados apresentados devem ser eliminados, por não atenderem todas as condições de contorno. Assim, todos os resultados apresentados anteriormente, nos quais o estado termodinâmico após a mistura de fluxos a 2,5 bar não atinge um nível mínimo de superaquecimento de 8 a 10°C (temperatura da mistura entre 135 e 137°C) do vapor devem ser descartados. Entre as situações estudadas, a geração de vapor seria possível no máximo a 40 bar, e nesse caso apenas entre 380 e 390 °C.

Como o principal objetivo é evitar os problemas operacionais associados à formação de depósitos e incrustações, a temperatura do vapor gerado deve ser menor possível. Tendo apenas esse objetivo, entre as situações analisadas a melhor solução seria a geração a 20 bar/320°C, mas seria possível reduzir ainda mais a pressão e a temperatura do vapor gerado. O benefício

adicional seria o menor investimento na redução da demanda de vapor de processo, ou a possibilidade de complementar parte da demanda térmica do processo de produção por hidrólise.

Evidentemente que, na prática, a melhor configuração seria decidida a partir dos resultados do estudo de viabilidade econômica, que não é um objetivo desta dissertação. Entretanto, mesmo sem a realização da análise de viabilidade econômica, algumas conclusões são possíveis, tendo por base simples hipóteses.

A redução da demanda de vapor de processo exige investimentos, e esses devem ser tanto maiores quanto menor for o consumo de vapor. Dentro de uma lógica econômica simples, os maiores custos da redução da demanda de vapor deveriam ser cobertos pelo benefício adicional, que é a geração de potência. Assim, entre as soluções consideradas factíveis, a diferença entre os casos de menor e maior geração de excedentes – geração de vapor a 20 bar/320°C e a geração a 40 bar/390°C – a diferença na geração de excedentes é apenas 6,7 kWh/t cana, algo como 4 kW no caso da usina considerada. É um pequeno excedente adicional, que requer investimentos em um sistema relativamente mais caro – geração de vapor 40 bar, e não a 20 bar – e maior redução na demanda de vapor de processo – aproximadamente – 14 kg/t cana. Aparentemente não seria justificável economicamente a geração de mais eletricidade excedente, e em princípio, as alternativas de geração de vapor a menor pressão e temperatura seriam melhores.

Em resumo, além da necessária análise econômica, as questões determinantes para a escolha da configuração seriam:

- Como há risco de formação de depósitos e incrustações, a solução mais conservadora é gerar vapor a menor pressão e temperatura e, nesse caso, a geração de vapor a 20 bar, 320-330°C. Todas as restrições seriam atendidas, e a capacidade de produção de energia elétrica excedente seria menor que 1,5 MW.
- Caso seja difícil atender a demanda de vapor de processo na unidade de produção de etanol por hidrólise do bagaço apenas com a queima da lignina, é adequado se ter excedente de vapor na unidade de produção convencional. No caso, a melhor alternativa também é gerar vapor a menor pressão e temperatura, com o benefício de se ter uma solução conservadora do ponto de vista dos problemas operacionais do gerador de vapor que queima palha da cana.
- Caso seja difícil atender a demanda de energia elétrica na unidade de produção de etanol por hidrólise do bagaço em um sistema de cogeração que queima apenas a

lignina, é adequado gerar vapor a maior pressão e temperatura; entre as alternativas consideradas, a geração de vapor deveria ser a 40 bar, 390°C, com maior investimento e maior risco de problemas operacionais no gerador de vapor que queima palha.

- Caso haja restrições á recuperação da palha para ser usada como combustível, a melhor alternativa também é gerar vapor a menor pressão e temperatura.

Em resumo, é adequado se ter como conclusão mais geral da análise do Caso 1 que, aceito o sacrifício da geração de potência elétrica, e desde que não haja problemas para o atendimento do consumo próprio de eletricidade nas unidades de produção de etanol por via convencional e por hidrólise, a geração de vapor deve ocorrer a menor pressão e temperatura possíveis.

4.2 Caso 2: Superaquecimento externo do vapor gerado

A diferença fundamental entre os Casos 2 e 1 é que, no primeiro, um dos objetivos é maximizar, para as condições de contorno impostas, a geração de potência elétrica excedente. Como anteriormente descrito, o Caso 2 é definido para as mesmas condições de contorno do Caso 1, ou seja, disponibilidade de biomassa restrita e necessidade de atendimento das demandas térmica e elétrica próprias. Com a queima exclusiva da palha da cana, vapor deve ser gerado a pressões mais elevadas e no máximo a 400 °C. Neste caso foram avaliados sistemas de cogeração que operariam a 82 bar, 90 bar e 100 bar. Foi avaliada a possibilidade do vapor ser aquecido externamente a 525°C, com queima de biogás produzido da biodigestão da vinhaça.

Portanto o estudo tem como objetivo identificar uma configuração que permita atender simultaneamente as restrições impostas para operação da planta, entre elas, suprir a demanda mínima de vapor de 300 kg/t de cana moída, e a geração de potência elétrica capaz de garantir a auto-suficiência, mas com a maximização da produção de excedentes para exportação.

Assim como no Caso 1, dos resultados os parâmetros inicialmente avaliados foram o fluxo de vapor na entrada do processo e seu estado termodinâmico, a potência elétrica produzida e, em um segundo momento, a produção de eletricidade excedente e o volume de biogás consumido no superaquecimento.

O fluxo de vapor na entrada do processo é resultante da mistura dos fluxos expandidos na turbina de contrapressão e nas válvulas redutoras. Os estados termodinâmicos da água na saída do desaerador e do vapor condensado na saída do processo são os mesmos descritos no Caso 1. A temperatura do vapor na saída do superaquecedor foi definida (no simulador) de acordo com a resultante da transferência de energia térmica do biogás para o vapor.

Os resultados obtidos na simulação da configuração de um sistema de cogeração com superaquecimento externo, considerado três níveis de pressão (82, 90 e 100bar), e oito níveis de temperatura do vapor gerado, sempre inferiores a 400 °C são apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.9. Alguns resultados apresentados são para situações factíveis, nas quais o vapor seria superaquecido a temperaturas bem maiores do que as que são limites para o uso de aços comuns (535-538°C). Inicialmente, a temperatura do vapor na saída do superaquecedor é calculada supondo a queima de todo o biogás disponível.

Tabela 4.7. Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 82 bar e temperaturas abaixo de 400°C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
82 bar/390°C	142,7	331,5	-	203,6	62,95	34,95
82 bar/380°C	144,4	335,5	-	191,3	62,14	34,14
82 bar/370°C	146,0	339,2	-	180,6	61,58	33,58
82 bar/360°C	147,8	342,9	-	169,5	61,07	33,07
82 bar/350°C	149,8	346,8	-	157,8	60,41	32,41
82 bar/340°C	151,8	351,0	-	145,6	59,80	31,80
82 bar/330°C	154,1	356,2	-	132,3	59,17	31,17
82 bar/320°C	156,7	362,2	99,11	127,4	58,50	30,50

Tabela 4.8. Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 90 bar e temperaturas abaixo de 400°C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
90 bar/390°C	143,8	334,1	-	189,2	63,54	35,54
90 bar/380°C	145,4	337,8	-	178,5	62,97	34,79
90 bar/370°C	147,3	341,5	-	167,2	62,38	34,38
90 bar/360°C	149,2	345,6	-	155,6	61,80	33,80
90 bar/350°C	151,3	349,9	-	143,3	61,18	33,18
90 bar/340°C	153,6	354,9	-	130,3	60,54	32,54
90 bar/330°C	156,2	360,8	98,87	127,4	59,87	31,87
90 bar/320°C	159,2	368,0	97,28	127,4	59,18	31,18

Tabela 4.9. Resultados das simulações – Caso 2, vapor gerado a 100 bar e temperaturas abaixo de 400°C.

Pressão/Temperatura Vapor gerado	Vapor Produzido (t/h)	Vapor Processo (kg/t cana)	Título do Vapor Processo (%)	Temperatura Vapor (°C)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
100 bar/390°C	145,1	335,9	100	174,4	64,45	36,45
100 bar/380°C	146,9	340,5	100	163	63,86	35,86
100 bar/370°C	148,9	344,7	100	151,2	63,25	35,25
100 bar/360°C	151,0	349,1	100	138,7	62,63	34,63
100 bar/350°C	153,5	354,4	99,81	127,4	61,98	33,98
100bar/340°C	156,1	360,7	98,37	127,4	61,32	33,32
100bar/330°C	159,1	366,9	96,73	127,4	60,60	32,60
100bar/320°C	162,7	375,4	94,83	127,4	59,81	31,81

Os resultados que indicam a máxima temperatura atingida pelo vapor após a passagem pelo superaquecedor, quando da queima de todo o biogás produzido, são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10. Resultados das simulações – Temperatura do vapor após o superaquecedor.

Pressão/Temperatura vapor gerado	Temperatura do vapor superaquecido (°C)	Pressão/Temperatura vapor gerado	Temperatura do vapor superaquecido (°C)	Pressão/Temperatura vapor gerado	Temperatura do vapor superaquecido (°C)
82bar/390°C	562	90bar/390°C	557	100bar/390°C	550
82bar/380°C	548	90bar/380°C	542	100bar/380°C	535
82bar/370°C	534	90bar/370°C	527	100bar/370°C	519
82bar/360°C	519	90bar/360°C	512	100bar/360°C	503
82bar/350°C	503	90bar/350°C	495	100bar/350°C	485
82bar/340°C	487	90bar/340°C	478	100bar/340°C	467
82bar/330°C	470	90bar/330°C	460	100bar/330°C	447
82bar/320°C	451	90bar/320°C	440	100bar/320°C	425

Os resultados das simulações apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.9 mostram que a demanda de vapor de processo pode ser atingida em todos os casos, e que o estado termodinâmico limite é alcançado em vários deles. Demandas máximas de vapor de processo entre 320 e 350 kg/t de cana podem ser atendidas.

Os resultados das simulações indicam que para a geração de vapor a 82bar/320°C, o fluxo de vapor a 2,5bar não atinge o nível de temperatura considerada ideal, pois está a 127,4°C na entrada do processo. Neste caso, tem-se o menor índice de geração eletricidade – 58,5 kWh/t de cana. Portanto, pode ser considerado que apenas a partir do ponto 82bar/340°C, a condição ideal do vapor é satisfeita, tornando viável a geração de vapor apenas em temperaturas acima de 340°C. Da tabela 4.10 conclui-se que não é preciso todo o biogás para superaquecer o vapor, uma vez que a temperatura do vapor superaquecido não pode estar acima do limite de uso dos aços comuns. Portanto, os resultados de geração de vapor acima de 370°C precisam ser revistos.

Para a geração de vapor a 90 bar, não seria possível gerar vapor com a queima da palha abaixo de 340°C (na configuração 90 bar/340°C a temperatura dos fluxos na entrada do processo é de 130,3°C, inferior ao considerado adequado). Portanto, para geração de vapor 90bar o vapor deveria ser gerado acima de 350°C. Por outro lado, para o emprego de aços comuns, não é preciso todo o biogás para superaquecer o vapor, se as temperaturas do vapor gerado estiverem acima de 370°C. Assim os resultados correspondentes anteriormente apresentados precisam ser revistos.

Já para a geração de vapor a 100bar, apenas os casos em que as temperaturas do vapor gerado, com a queima da palha, estão acima de 360°C resultam no atendimento da restrição do vapor de processo. O melhor índice de geração de potência elétrica entre as configurações analisadas é o da geração de vapor a 100bar/390°C, com 64,4 kWh/t de cana (índice de geração de excedente estimado em 36,4 kWh/t de cana), mas este caso tampouco é factível como apresentado, pois o vapor não pode ser superaquecido a 550°C portanto o resultado precisa ser reavaliado.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados da temperatura do vapor a 2,5bar, em função da temperatura do vapor gerado, aceitando que todos os resultados são factíveis.

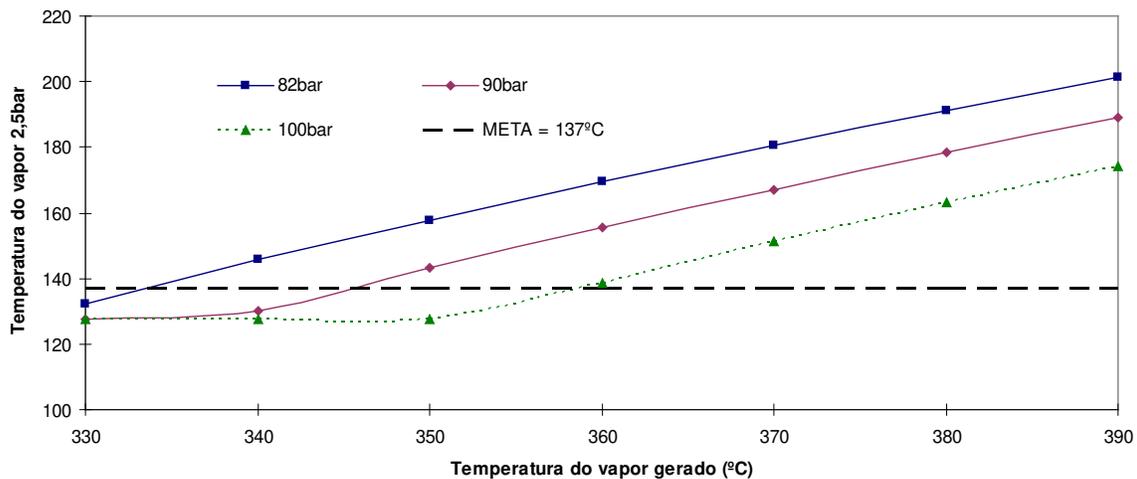


Figura 4.4. Resultados da simulação – Temperatura do fluxo de vapor resultante da expansão a 2,5bar.

Entre os resultados factíveis, ainda antes dos ajustes que são descritos na sequência, o melhor resultado em termos de geração de potência elétrica é o que corresponde à geração de vapor a 100 bar, 370°C, quando a geração de eletricidade excedente seria equivalente a 35,25 kWh/tc e a demanda de vapor de processo que poderia ser atendida seria 344,7 kg vapor/t cana.

Optou-se por estender a análise do caso considerando a geração de vapor até a 430°C, e não mais até 400°C. Há duas razões principais. Primeiro, dos resultados anteriormente apresentados é possível notar que quanto maior a temperatura do vapor gerado no gerador de vapor, com queima exclusiva de palha, maior o índice de geração elétrica. Assim, faz sentido explorar alternativas que permitam a maximização da geração de eletricidade. Segundo, como não se conhece exatamente qual a temperatura limite para a geração de vapor quando da queima da palha, e como no Caso 2 as soluções desnecessariamente conservadoras são injustificáveis, optou-se por explorar outros arranjos. No caso da planta de cogeração da BIOWANZE, descrita no Capítulo 2, com a queima de biomassa mais crítica do que a palha da cana, a geração de vapor ocorrer a 430°C.

Para as mesmas três pressões foram feitos os cálculos de geração de potência para a faixa de 370°C a 430°C, que são situações em que há biogás disponível para superaquecer o vapor até 525°C. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.11 a 4.13, que reúnem os índices de geração

elétrica e geração de excedente elétrico, bem como o percentual consumido de biogás produzido, em relação ao volume que pode ser produzido.

Tabela 4.11. Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 82bar.

Pressão/Temperatura vapor gerado	Biogás consumido (%)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
82bar/430°C	52,1	57,00	29,00
82bar/420°C	58,5	57,60	29,60
82bar/410°C	65,1	58,17	30,17
82bar/400°C	72,0	58,77	30,77
82bar/390°C	79,3	59,41	31,41
82bar/380°C	85,5	60,00	32,00
82bar/370°C	95,0	60,85	32,85

Tabela 4.12. Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 90bar.

Pressão/Temperatura vapor gerado	Biogás consumido (%)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
90bar/430°C	53,4	58,13	30,13
90bar/420°C	60,0	58,73	30,73
90bar/410°C	67,0	59,34	31,34
90bar/400°C	74,2	60,00	32,00
90bar/390°C	81,8	60,67	32,37
90bar/380°C	89,9	61,39	33,39
90bar/370°C	98,5	62,15	34,15

Tabela 4.13. Resultados das simulações – Caso 2, potência elétrica gerada e consumo de biogás no superaquecedor para vapor gerado a 100bar.

Pressão/Temperatura vapor gerado	Biogás consumido (%)	Índice de geração (kWh/t. cana)	Índice Exportável (kWh/t. cana)
100bar/430°C	55,2	59,40	31,40
100bar/420°C	62,2	60,00	32,00
100bar/410°C	69,5	60,70	32,70
100bar/400°C	75,4	61,40	33,40
100bar/390°C	85,4	62,14	34,14
100bar/380°C	94,0	62,93	34,93
100bar/370°C	100	63,25	35,25

Os resultados indicam uma diminuição na produção de vapor em função do aumento da temperatura do vapor gerado e, conseqüentemente, uma redução no consumo de biogás no superaquecedor. Com a diminuição do fluxo de vapor que é turbinado há redução na geração de potência elétrica, e essa redução atinge cerca de 6% no intervalo de temperatura analisado.

Na Figura 4.5 é apresentada a tendência de queda no consumo de biogás em função do aumento da temperatura do vapor gerado com queima de palha, com temperatura final do vapor a 525°C após superaquecimento devido à queima do biogás produzido.

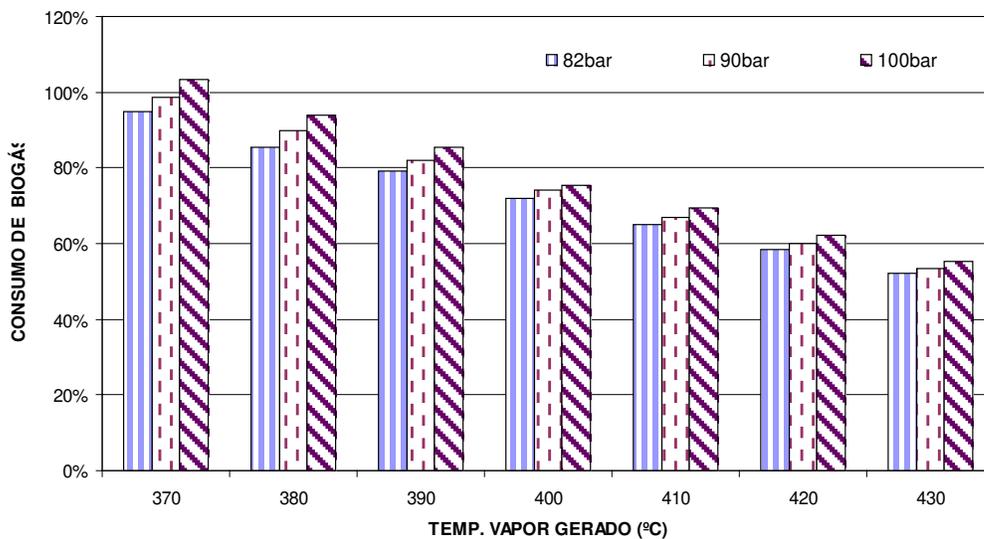


Figura 4.5. Resultados da simulação – Caso 2 consumo de biogás em função da temperatura do vapor gerado.

De acordo com os resultados, pode ser verificado que para as configurações com geração de vapor a partir de 400°C grande quantidade de biogás poderia deixar de ser produzido, reduzindo, assim, expressivos investimentos no sistema de biodigestão. Porém, o rendimento térmico do sistema poderia ser significativamente ampliado com a utilização do volume excedente de biogás na geração de vapor.

Como o objetivo do Caso 2 é maximizar a geração de energia elétrica, é lógico imaginar soluções nas quais o biogás que não é necessário para o superaquecimento do vapor, em função de sua máxima temperatura (525°C), poderia ser melhor aproveitado. Havendo excedente de

biogás, esse poderia ser usado como combustível auxiliar no gerador de vapor, permitindo maior geração. Os resultados dessa variante são apresentados na próxima seção.

4.3 Resultados de ações de otimização do Caso 2

O biogás remanescente é utilizado como combustível auxiliar no gerador de vapor a palha de cana, aumentando a geração de vapor. Como o objetivo é maximizar a geração de potência elétrica, o maior fluxo de vapor seria levado à condensação. Coerentemente com a hipótese de se maximizar a geração de potência, foi considerada que a demanda de vapor de processo seria reduzida para 320 kg/t de cana ou mesmo para 300 kg/t de cana.

Alternativamente, poderia ser considerada que a demanda de vapor de processo poderia ser maior, com menor investimento na racionalização do uso do vapor, e as turbinas de contrapressão seriam mantidas. Resultados dessa alternativa não são apresentados nesta dissertação.

O procedimento de cálculo é iterativo, pois o montante de biogás excedente apresentado na Tabela 37 não pode ser totalmente empregado como combustível auxiliar no gerador de vapor que queima palha.

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados quando da geração de vapor a 90 bar/430°C e 100 bar/430°C. Nos dois casos, gera-se todo o vapor possível, em função da disponibilidade de combustível, e o fluxo de vapor é todo ele superaquecido a 525°C, unicamente com a queima de biogás. Em uma situação a demanda de vapor de processo é reduzida para 320 kg/t de cana, e na segunda para 300 kg/t de cana.

A geração de potência elétrica adicional deve-se ao aumento do fluxo de vapor no primeiro corpo, e a expansão do fluxo adicional em relação à demanda de processo até a condensação. Para a usina considerada, com moagem total de 1,8 milhão de toneladas de cana na safra, o ganho de potência é superior a 3 MW quando a demanda de vapor é de 320 kg/t de cana, e de 5 – 6,5 MW, para o caso de uma demanda de vapor de processo de 300 kg/t de cana.

Tabela 4.14. Resultados da simulação – Comparativo entre os casos considerando a geração de vapor a partir da utilização de biogás como combustível extra.

Geração de vapor	Índice	Caso 2 – Sem queima de biogás na caldeira	Caso 2.1 – Demanda processo (300 kg/t. de cana)	Caso 2.2 – Demanda processo (320 kg/t de cana)
90bar/430°C	Consumo de biogás no superaquecedor (%)	53,4	58,2	58,2
	Consumo de biogás na caldeira (%)	0	41,7	41,7
	Índice de geração (kWh/t. cana)	58,2	71,4	67,9
	Índice exportável (kWh/t. cana)	30,13	43,3	39,8
100bar/430°C	Consumo de biogás no superaquecedor (%)	55,2	59,1	59,1
	Consumo de biogás na caldeira (%)	0	40,9	40,9
	Índice de geração (kWh/t. cana)	59,4	75,6	69,8
	Índice exportável (kWh/t. cana)	31,4	45,7	41,8

Na Figura 4.6 é apresentada uma comparação entre os resultados da geração de excedente elétrico, supondo a queima complementar e a não queima complementar do biogás no gerador de vapor.

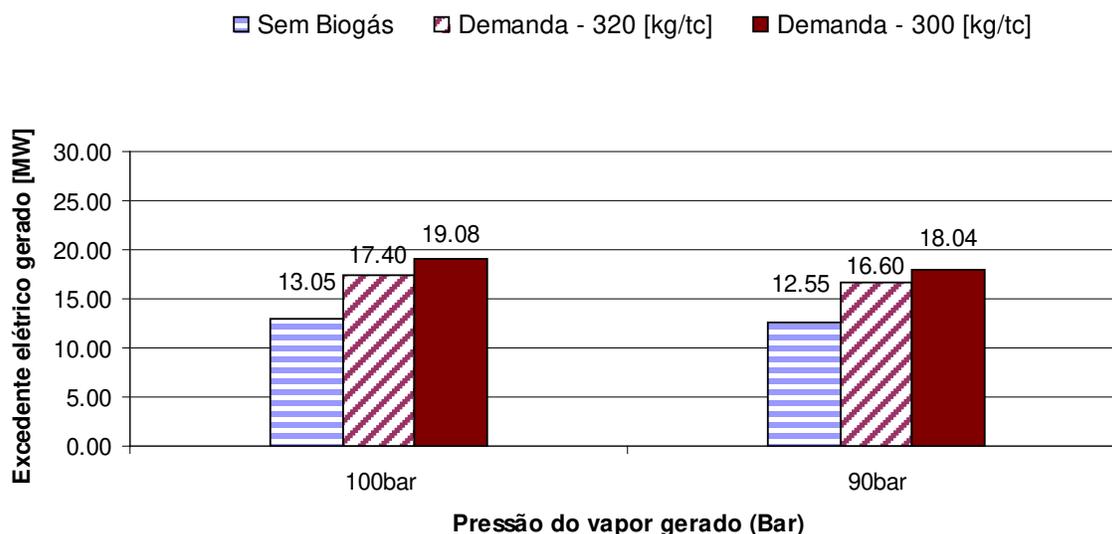


Figura 4.6. Resultados comparativos do excedente elétrico disponível com a utilização do biogás como combustível auxiliar na geração de vapor.

Os resultados indicam os ganhos com o esforço da maximização da geração de potência do Caso 2, que são estimados em 15,9-18,4 kWh/t de cana exportável, nos casos mais favoráveis, e implicam ganhos estimados em 5 a 6 MW que poderia ser comercializada. São ganhos expressivos em termos relativos, mas não tanto em termos absolutos, se forem considerados os custos que estão associados.

Os resultados apresentados são para uma usina com capacidade de 1,8 milhão de toneladas de cana por safra, que é menor do que as usinas médias atuais. Para maiores capacidades o excedente seria elevado.

A alternativa referente ao Caso 2, desde que otimizada, pode viabilizar a produção de excedentes elétricos consideráveis, desde que aplicada a unidades com elevada capacidade produtiva, que possam estar integradas ao processo de hidrólise do bagaço de cana. De forma comparativa, os níveis de produção de eletricidade podem ser avaliados para outros sistemas de cogeração, projetando os resultados do sistema proposto em função da escala de produção da unidade. Na Figura 4.7 são apresentados resultados da capacidade instalada e da capacidade excedente, supondo a instalação de configuração melhorada do Caso 2 (o Caso 2.1) em usinas com capacidade de moagem de 1,8, 3 e 4 milhões de toneladas de cana por safra.

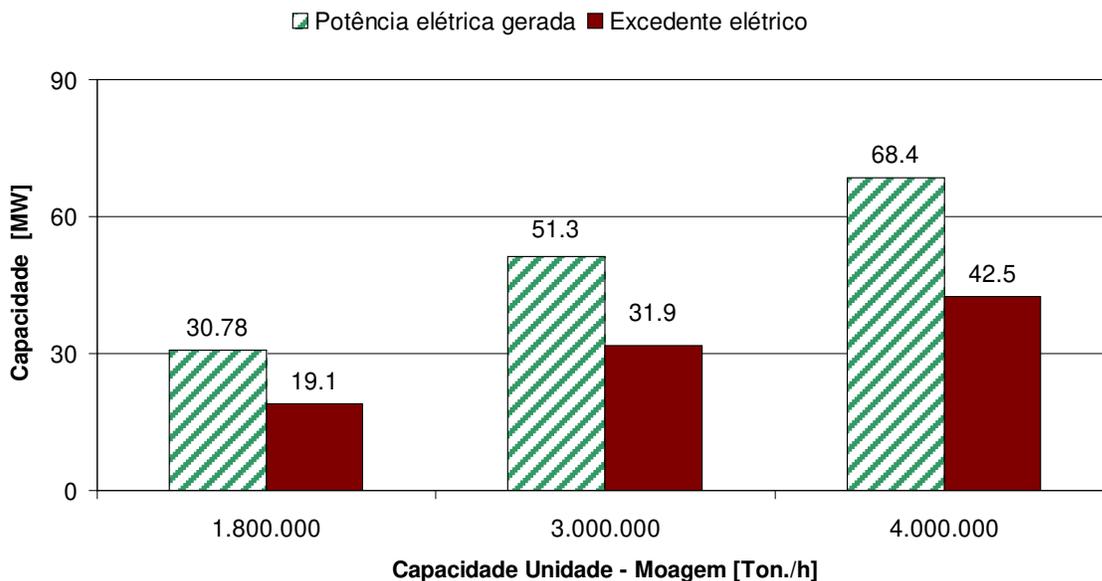


Figura 4.7. Potencial de geração de potência elétrica e de excedente para diferentes níveis de produção, com geração de vapor a 100 bar/430°C.

Evidentemente, a geração de 32-42 MW de potência excedente é um resultado considerável, e economicamente o investimento poderia ser justificável. Deve ser observado que a configuração que corresponde ao Caso 2 não está otimizada do ponto de vista térmico, e que resultados melhores podem ser alcançados. De qualquer forma, é necessário ao menos um estudo de pré-viabilidade econômica para que as alternativas que correspondem ao Caso 2 sejam melhor avaliadas.

Se uma das principais justificativas do Caso 2 é a maximização da geração de eletricidade excedente, faz sentido o melhor aproveitamento da energia do biogás que pode ser gerado, e a redução da demanda de vapor de processo. Resta saber, evidentemente, se a geração de potência adicional é justificável do ponto de vista econômico.

Ainda em relação ao Caso 2, é oportuno considerar que é preciso otimizar as configurações, para que seja maximizada a eficiência termodinâmica e a geração de potência excedente. Os principais pontos de otimização são o desaerador, a melhor recuperação do condensado, e a redução do fluxo de vapor pela válvula redutora.

Na comparação entre as pressões de geração do vapor, foi verificada vantagem para a geração de vapor a 100 bar. E, em função da pressão, a definição da temperatura de superaquecimento do vapor poderá ser ajustada. É evidente que, economicamente, na medida em que se aumenta a temperatura do vapor gerado com queima da palha, menos justificável é o superaquecimento externo com queima de biogás. Portanto, é preciso conhecer quais os reais limites operacionais para geradores de vapor que queima exclusivamente da palha da cana.

4.4 Comparativo entre o caso 1 e caso 2:

Nesta seção faz-se uma comparação entre o Caso 1 e Caso 2. Essa comparação não é de toda lógica, pois intrinsecamente há uma importante diferença entre os dois casos, no que diz respeito aos objetivos quanto a geração de potência excedente. As comparações feitas consideram os dois valores extremos de pressão do vapor gerado em cada caso, e os valores de temperatura do vapor gerado que representam soluções possíveis nos dois casos. Para o Caso 2 os resultados apresentados são da situação de referência, sem o uso do biogás remanescente no gerador de vapor.

Na Figura 4.8 é apresentada comparação entre as possíveis demandas máximas de vapor de processo, em função da temperatura do vapor gerado. Observa-se que as demandas de vapor de processo que podem ser atendidas são mais reduzidas no Caso 1.

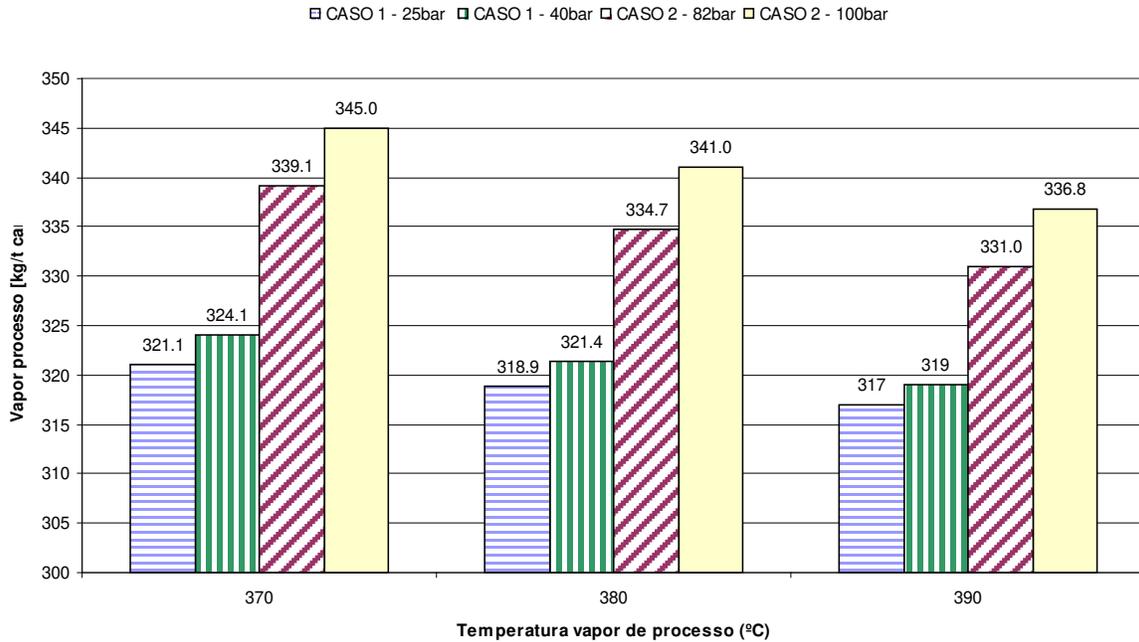


Figura 4.8. Comparativo entre geração de potência no Caso 1 e Caso 2.

Na Figura 4.9 a comparação feita é para o total de potência elétrica gerada, também em função da temperatura do vapor gerado.

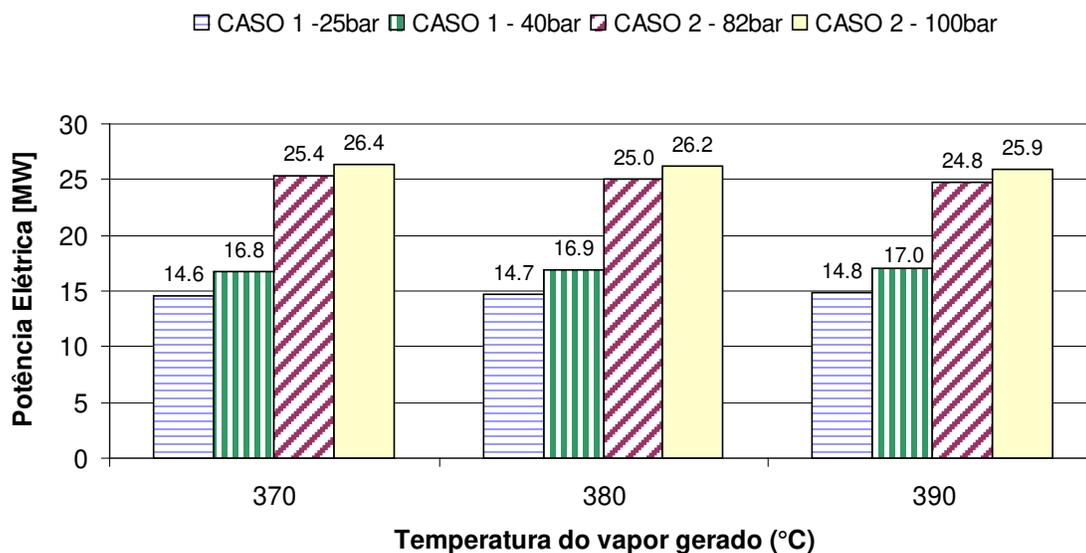


Figura 4.9. Comparativo entre geração de vapor no caso 1 e caso 2.

Deve ser repetido que o objetivo nesta dissertação é a análise da viabilidade técnica de duas configurações alternativas de sistemas de cogeração que operariam exclusivamente com palha da cana. Sem uma análise de viabilidade econômica, ainda que preliminar, não é possível avançar muito na comparação dos dois casos estudados nesta dissertação. De qualquer forma, algumas conclusões são possíveis.

- Quanto mais crítica for a palha da cana como combustível para a geração de vapor, mais conservadora deverá ser a configuração do sistema de cogeração. Caso a palha seja um combustível muito crítico, configurações com as do Caso 1 são justificáveis, e pressões e temperaturas do vapor gerado deveriam ser ainda mais baixas do que as analisadas nesta dissertação. Por outro lado, se a palha não for um combustível crítico, o que é pouco provável, sistemas convencionais devem ser a melhor opção, em detrimento das soluções Caso 1 e Caso 2. Mas se a palha for um combustível intermediário, e se a produção de eletricidade excedente for justificável, as configurações otimizadas do Caso 2 devem ser as melhores alternativas.
- Exclusivamente a respeito da eletricidade excedente, caso existam boas oportunidades de comercialização, o Caso 2 é justificável. Caso contrário, o Caso 1 é a melhor opção. O Caso 2 é mais justificável também se pólos industriais forem construídos no

entorno das unidades de produção de etanol por via convencional e por hidrólise, o que faz sentido supondo futuras biorrefinarias.

- O Caso 2 também deve ser tanto mais justificável quanto maior for sua capacidade de geração de potência (i. e., usinas maiores), por causa dos efeitos de escala.
- Caso seja difícil atender a demanda de vapor de processo na unidade de produção de etanol por hidrólise do bagaço apenas com a queima da lignina haveria, em princípio, vantagem do Caso 2 em relação ao Caso 1. Mas se forem empregadas turbinas de contrapressão no Caso 2 as suas vantagens são reduzidas e, possivelmente, uma configuração que corresponde ao Caso 1, com vapor gerado a baixa pressão e baixa temperatura, seria equivalente sob esse aspecto, e mais barata. E mais, o biogás poderia ser empregado como combustível auxiliar também no Caso 1, aumentando a geração de vapor.
- Embora não tenha sido explorado nesta dissertação, no caso de haver restrições à recuperação da palha para ser usada como combustível é de se imaginar que sistemas mais baratos serão a melhor alternativa, já que a geração de vapor será comprometida e quanto menor a geração de vapor, menor a geração de potência elétrica.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

Por razões econômicas, ambientais e/ou estratégicas, há grande interesse no uso da biomassa. Especificamente a respeito da geração de potência a partir de biomassa residual, uma das dificuldades está nos riscos de problemas operacionais em função do teor de cinzas e de sua composição, o que pode resultar na formação de depósitos, incrustações e corrosão.

A palha da cana de açúcar não tem sido empregada como combustível, por causa da sua queima antes da colheita e também porque até o presente não houve razão para a substituição do bagaço, que é combustível empregado nos sistemas de cogeração das usinas de açúcar e etanol. Com o avanço do cronograma de proibição da queima da cana e o avanço da colheita mecanizada, a palha estará disponível em grande quantidade nas usinas, podendo ser usada como combustível.

Há grande esforço no desenvolvimento da tecnologia de produção de etanol por hidrólise de biomassa celulósica e, no caso do Brasil, o grande interesse está no uso do bagaço de cana como matéria prima. O interesse deve-se ao fato de que o bagaço já está disponível nas usinas, em grande quantidade, e seu custo de oportunidade é baixo. Mas para que a produção de etanol por hidrólise do bagaço seja maximizada, será preciso que a palha seja usada como combustível, em substituição parcial ou total ao bagaço.

A palha da cana de açúcar tem teor e composição das cinzas que levam a supor que os problemas operacionais quando de sua queima em geradores de vapor deverão ser significativos. Como foi possível concluir da análise comparativa apresentada no Capítulo 2, a palha da cana não é biomassa tão crítica quanto a palha de arroz, ou de trigo, mas é praticamente certo que haverá formação de depósitos e de incrustações e, possivelmente, corrosão das superfícies de troca térmica, quando da sua combustão em geradores de vapor.

Uma das alternativas seria o pré-tratamento da palha, para redução das cinzas e dos teores de alguns óxidos. Mas os processos conhecidos têm eficiência questionável, e envolvem lavagem da biomassa, com captação d'água, necessidade de tratamento de efluentes, e umidificação do

combustível. Outra possibilidade é a redução da temperatura do vapor gerado, o que prejudica o rendimento térmico e a geração de potência elétrica.

O objetivo desta dissertação era a análise técnica da produção de eletricidade em uma planta convencional de etanol, integrada a uma planta de produção por hidrólise de bagaço de cana, operando apenas com palha de cana como combustível na geração de vapor.

Foram estudadas duas configurações dos sistemas de potência que queimariam exclusivamente palha de cana. As configurações foram concebidas para que os problemas de formação de depósitos e de incrustações sejam evitados. Foram considerados parâmetros de uma destilaria autônoma convencional de produção de etanol, e parâmetros de uma unidade integrada de produção de etanol por hidrólise, que deverá operar anexa à primeira.

O primeiro caso considerado corresponde à redução da temperatura do vapor gerado, com o objetivo de impedir os potenciais problemas adversos. Na simulação dessa configuração foram considerados sistemas de cogeração com turbinas a vapor de contrapressão. O segundo caso considerado consiste na geração de vapor a temperaturas iguais ou inferiores a 400°C no gerador de vapor, mas a pressões mais elevadas do que no primeiro caso. No gerador de vapor a palha da cana seria usada como combustível único. Então, o vapor gerado seria superaquecido externamente ao gerador de vapor, até temperaturas compatíveis com o objetivo de se maximizar a geração de potência elétrica, empregando-se gás de biodigestão da vinhaça como combustível.

Nos dois casos a máxima disponibilidade de palha foi fixada em 50% da palha existente no campo, antes da colheita. A geração de potência elétrica deve ao menos assegurar a auto-suficiência da unidade industrial, e a demanda de vapor de processo não pode ser inferior a 300 kg de vapor por tonelada de cana, no processo convencional.

Conclui-se que ambas configurações são tecnicamente factíveis, e atendem às restrições impostas. Os sistemas que correspondem ao Caso 2 deverão ser mais caros, e justificáveis apenas quando houver boas oportunidades de comercialização da eletricidade excedente. Em adição, os sistemas chamados nesta dissertação de Caso 2 terão vantagem se a palha da cana não for uma biomassa muito crítica, situação na qual uma solução mais conservadora, como as que correspondem ao Caso 1, seria justificável.

Não há muitas alternativas de otimização das configurações chamadas de Caso 1. Já no Caso 2, em que o objetivo é maximizar a produção de eletricidade, há várias alternativas de otimização termodinâmica que devem ser exploradas, tais como a otimização do desaerador, a

minimização do fluxo de vapor pelas válvulas de alívio, a consideração de maiores níveis de recuperação do condensado, etc.

O objetivo nesta dissertação não era se fazer a análise de viabilidade econômica das configurações estudadas e, por essa razão, ao menos estudos de pré-viabilidade são recomendados.

Tampouco se sabe com certeza o quão crítica é a palha da cana, e é preciso que estudos específicos sejam feitos, para determinação dos níveis seguros da temperatura do vapor gerado. Esses estudos dificilmente poderão ser feitos sem o apoio e a participação da indústria de geradores de vapor e das unidades industriais do setor.

REFERÊNCIAS

ARVELAKIS S., FRANDBSEN, F. J. *Melting behavior of ashes from the co-combustion of coal and straw*. Energy & Fuel. cap. 21, pp. 3004 – 3009, 2007.

BAXTER L. L., MILES T. R., JENKINS B. M., MILES T. J., MILNE T., DAYTON D., BRYERS R. W., ODEN L. L., *The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences*. Fuel Processing Technology; vol. 54, pp. 47–78, 1998.

BRYERS R.W., *Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat transfer surface due to impurities in steam-raising fuels*. in: Prog. Energy Combustion Science. Vol. 22, pp. 29; Elsevier, 1996.

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, Disponível em www.ctc.com.br, 2010.

DAYTON D. C., JENKINS B. M., TURN S. Q., BAKKER R. R., WILLIAMS R.B., BELLE-ODRY D., HILL L. M., *Release of inorganics constituents from leached biomass during thermal conversion*. Energy & Fuels. Vol. 13, p. 860-870, 1999.

DERMIBAS A., *Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power system and combustion related environmental issues*. Progress in Energy and Combustion Science; vol. 31, 2005.

DIAS M. O. S., *Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço* – Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

FOX R. W., McDONALD A. T., PRITCHARD P. J., *Introdução à mecânica dos fluidos*. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798p.

HASSUANI S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., *Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash* – CTC – Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, 2005.

JENKINS B.M., BAXTER, L.L, MILES Jr., T.R., MILES, T.R., *Combustion properties of biomass*. In: *Fuel Processing Technology*; 54: 17–46; Elsevier, 1998.

JENKINS B.M., BAKKER, R.R., WEI, J.B., *On the properties of washed straw*. In: *Biomass and Bioenergy*; 10(4), p. 177-200; Elsevier, 1996.

LABAT G. A. A., *Estudo Cinético da Oxidação de Ligninas Obtidas da Palha e do Bagaço de cana e aplicações de ligninas de bagaço em resinas à base de materiais naturais*. Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo, 2008.

LAMONICA, H., *Potencial de geração de excedentes de energia elétrica com o biogás produzido a partir da biodigestão da vinhaça na indústria sucro-alcooleira brasileira* – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

MICHELSSEN H. P., FRANDBSEN, F., DAM-JOHANSEN, K., LARSEN, O.H. *Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler*. In: *Fuel processing technology*; 54, 95–108; Elsevier; 1998 .

MILES T. R., MILES JR. T. R., BAXTER L. L., BRYERS R.W., JENKINS B.M., ODEN L. L. *Alkali deposits found in biomass power plants: a preliminary investigation of their extent and nature*. National Renewable Energy Laboratory – Summary Report, 1995.

PITARELO A. P., *Avaliação da suscetibilidade do bagaço e da Palha de cana-de-açúcar à Bioconversão Via Pré-Tratamento a Vapor e Hidrólise Enzimática* – Dissertação de mestrado em Química apresentada à Universidade Federal do Paraná, Faculdade de Química, Curitiba, 2007.

PRONOBIS M., *Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations*. *Biomass and Bioenergy*; vol. 28, p. 375–383; Elsevier, 2005.

RIPOLI M. L. C., *Mapeamento do palhico enfardado de cana de açucar (saccharum spp.) e do Seu Potencial Energético* – Dissertação de mestrado em Agronomia – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2002.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia, Disponível em www.udop.com.br, 2010.

WALTER et al., PNUD/MME. *Relatório Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*. Ministério de Minas e Energia, Brasília; 2005.

WALTER A., LIAGOSTERA, J., *Gas turbine integration to sugarcane trash boilers comparative energy analysis* . In: Proceedings of ECOS, 2007.

WALTER A., *CHP plant of BioWanze S.A.* Technical report to BioWanze. 2008.

WALTER A., Ensinas, A. V. *Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues*. In: Proceedings of ECOS, 2008.

WOYTIUK K. – *Sugar cane trash processing for heat and power production*. Master's Thesis. Lulea, University of Technology. Sweden, 2006.

APÊNDICE A – Exemplo de cálculo do consumo de energia elétrica no sistema de bombeamento no *software* Cycle-Tempo.

The screenshot shows the Cycle-Tempo software interface. The title bar reads "Cycle-Tempo Release 5.0 - [...\ecos\100bar\100bar_resultado_defesa_105.gui] - [100bar_resultado_defesa_105: System effic...". The menu bar includes File, Edit, Search, Options, General Data, Calculation, View, Window, and Help. The main window displays a table with the following data:

	No.	Apparatus	Type	Energy [kW]	Totals [kW]	Exergy [kW]	Totals [kW]
Absorbed power	3	Reheater	2	10422.22		17598.50	
	1	Boiler	1	132588.23		367167.41	
					143010.45		364765.91
Delivered gross power	1	Generator	G	26495.51		26495.51	
					26495.51		26495.51
Aux. power consumption	8	Pump	8	5.90		5.90	
	9	Pump	8	2.23		2.23	
	11	Pump	8	596.63		596.63	
					604.76		604.76
Delivered net power					25890.75		25890.75
Efficiencies gross				18.527 %		6.886 %	
				18.104 %		6.729 %	

At the bottom of the window, there are three status boxes: "100:0", "100%", and "Modified".