



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional - CTDR
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira - DTS



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PRINCÍPIO DE BALANÇOS TERMOENERGÉTICOS EM CALDEIRAS GERADORAS DE VAPOR NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS

Valdir Bernardino da Silva Segundo

**Orientadora: Prof^a Dr^a Danielle
Christine Almeida Jaguaribe**

Fevereiro de 2014



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional - CTDR
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira - DTS



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PRINCÍPIO DE BALANÇOS TERMOENERGÉTICOS EM CALDEIRAS GERADORAS DE VAPOR NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS

Valdir Bernardino da Silva Segundo

Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia Sucroalcooleira no Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a Graduação em Tecnologia Sucroalcooleira.

**Orientadora: Prof^a. Dr^a. Danielle
Christine Almeida Jaguaribe**

Fevereiro de 2014

S586p Silva Segundo, Valdir Bernardino da.

Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas indústrias sucroalcooleiras. [recurso eletrônico] / Valdir Bernardino da Silva Segundo. -- 2014.

43 p. : il. color. + CD.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Orientador: Dra. Danielle Christine Almeida Jaguaribe.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – CTDR/UFPB.

1. Caldeira a vapor. 2. Usina sucroalcooleira. 3. Eficiência energética. 4. Energia. I. Jaguaribe, Danielle Christine Almeida. II. Título.

CDU: 621.18

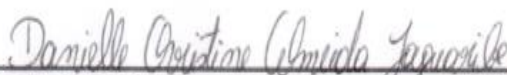
Catálogo na Publicação (CIP)
Biblioteca Setorial do CTDR/UFPB, PB, Brasil
Maria José Rodrigues Paiva – CRB 15/387

VALDIR BERNARDINO DA SILVA SEGUNDO

**PRINCÍPIO DE BALANÇOS TERMOENERGÉTICOS EM
CALDEIRAS GERADORAS DE VAPOR NAS INDÚSTRIAS
SUCROALCOOLEIRAS**

TCC aprovado em 13 de fevereiro de 2014, como requisito para a conclusão do curso de tecnologia em produção sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

BANCA EXAMINADORA:



Prof.^a Dra. Danielle Christine Almeida Jaguaribe - (UFPB -Orientador)



Prof.^a Dra. Erika Adriana Santana Gomes - (UFPB – Membro Interno)



Prof.^a Dra. Liana Filgueira Albuquerque - (UFPB – Membro interno)

DEDICATÓRIA

Dedico esta, bem como todas as minhas demais conquistas aos meus amados pais (Valdir Bernardino e Ana Cecília), irmãos e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pela força e coragem durante toda esta longa caminhada.

Ao amigo Ullysmar, e demais contribuintes da Usina Agroval pela receptividade, paciência e disponibilidade que sempre fui recebido. Devo agradecer também pela oportunidade de desenvolver este trabalho na empresa, sem a qual não seria possível a conclusão do curso.

Agradeço em especial a Prof. Dr^a. Danielle Jaguaribe, responsável pela realização deste trabalho.

A todos os professores e ex-professores do Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira que me acompanharam e incentivaram durante toda a graduação.

Aos demais professores de outros Departamentos pela compreensão e contribuição para minha formação.

A todos os meus colegas, principalmente Tatiana, Hugo, Samara, Felipe e Tiago, que estiveram comigo nas dificuldades e conquistas, fazendo com que esses 3 anos passassem rapidamente e se tornassem inesquecíveis.

Aos meus pais, (Valdir) e (Ana), a quem eu rogo todas as noites a minha existência.

E a todos que de alguma forma participaram deste trabalho. Meu sincero obrigado.

RESUMO

No atual cenário global de buscas por alternativas mais limpas e eficientes, a biomassa residual pode desempenhar um papel com grande capacidade energética. Este trabalho apresenta a avaliação da eficiência operacional energética de uma Usina sucroalcooleira, que utiliza precisamente o bagaço de cana como fonte geradora de vapor. Além da energia consumida em todo processo produtivo (térmica, elétrica e mecânica), a usina utiliza o excedente de bagaço para comercialização. Foi aplicado o princípio de um balanço energético no presente estudo, de grande importância para qualquer indústria, para que assim, se pudesse avaliar e garantir uma boa produção, detectando as deficiências do funcionamento operacional através da avaliação dos parâmetros energéticos. Analisando termodinamicamente o sistema foi possível definir os índices de desempenho das caldeiras desta planta industrial e concluiu-se que a usina apresenta um bom aproveitamento da sua energia, em cada um dos seus componentes.

Palavras Chave: Energia, vapor, caldeira, usina sucroalcooleira, eficiência energética.

ABSTRACT

The current scenario in the global search for cleaner and more efficient alternatives, the residual biomass can play a role with great energy capacity. This paper presents the evaluation of operating energy efficiency of a sugarcane mill, which specifically uses bagasse as a steam source. Besides, energy consumed throughout the production plant process (thermal, electrical and mechanical), uses surplus bagasse for marketing. The principle of energy balance was applied in this study, an utmost importance for any industry in order to assess and ensure a good production and detect anomalies in the operating process by evaluating the energy parameters. According to a thermodynamic analysis, that defined the performance indices of the boilers in this plant, it was concluded that the plant has an optimum utilization of its energy in each of its components.

Keywords: Energy, steam boiler, sugarcane mill, energy efficiency

Sumário

RESUMO	I
ABSTRACT	II
LISTA DE FIGURAS	IV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO GERAL.....	5
2.1. Objetivos Específicos	5
3. USINA AGROVAL	6
4. METODOLOGIA.....	6
5. PRINCÍPIO DO BALANÇO ENERGÉTICO NAS CALDEIRAS.....	8
5.1. Método Direto.....	8
5.2. Método Indireto.....	9
5.3. As Caldeiras.....	10
5.4. O Vapor	11
5.5. O Bagaço	12
5.6. O Bagaço Excedente	14
5.7. Consumo de bagaço.....	15
5.8. O Poder Calorífico do Bagaço	15
5.9. A Combustão do Bagaço	16
5.10. Relação entre o Teor de Oxigênio e a Eficiência da Caldeira	17
5.11. Impactos Ambientais Advindos da Combustão do Bagaço.....	18
5.11.1. Material Particulado	18
5.11.2. Impacto dos Óxidos de Nitrogênio, NOx, Oriundo da Combustão do Bagaço. 19	19
6. AVALIAÇÃO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA CALDEIRA	20
6.1. Perda de Calor Com os Gases da Combustão	21
6.2. Perda de Energia devido à Combustão Incompleta.....	21
6.3. Perda de Calor devido as Cinzas	21
6.4. Perda de Energia devido às Entalpias das Escórias	22
6.5. Perda de Calor pelo Mecanismo de Convecção	22
6.5.1. Velocidade Média de Escoamento de Vapor.....	22
6.6. Energia perdida devido à perda de carga no tubo	23
6.7. Perda por Convecção.....	23
7. BALANÇO ENERGÉTICO COM BASE NOS PARÂMETROS DE VAPOR.....	24
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	25
9. CONCLUSÕES.....	27
10. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	29
11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Geradores da Usina Agroval.....	4
Figura 2 - Caldeira 1.....	9
Figura 3 - Caldeira 2.....	9
Figura 4 - Balão superior caldeira 2.....	10
Figura 5 - Fluxograma do vapor	12
Figura 6 - Ternos de moenda impulsionados a vapor	12
Figura 7 - Saída do bagaço e medição de sua temperatura	13
Figura 8 - Chaminé e exaustor	17
Figura 9 - Gráfico da eficiência da caldeira versus o coeficiente de excesso de ar.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das caldeiras estudadas.....	10
Tabela 2 – Propriedades Físicas do Vapor.....	11
Tabela 3 – Propriedades e Composição Física do Bagaço Produzido.....	14
Tabela 4 – Composição Química do Bagaço Produzido na Agroval.....	14
Tabela 5 – Dados do Processo.....	25
Tabela 6 – Dados calculados.....	25
Tabela 7 – Parâmetros relacionados ao processo.....	26
Tabela 8 – Perdas Energéticas ao longo do Processo.....	26
Tabela 9 – Valores ótimos calculados.....	27

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

VHP – Very High polarization
E – Energia
Q – Calor
W – Trabalho
 h_i – Entropia inicial
 m_i – vazão mássica inicial
 h_s – Entropia saída
 m_s - vazão mássica saída
 ΔS – variação de entalpia
 ΔQ - variação de energia
 m_e – vazão mássica de entrada
 S_e – entropia
 m_s – vazão mássica saída
 S_s – entropia de saída
 η – Eficiência
 m –vazão mássica de combustível genérica
 Δh - variação de entropia
 E_s – energia de saída
 E_e – energia de entrada
 m_{comb} – vazão mássica de combustível
 E_{comb} – energia do combustível
PCI – Poder calorífico inferior
PCS – Poder calorífico superior
 Q_{entra} – Energia que entra
 Q_{sai} – Energia que sai
 η_{md} – Eficiência pelo método direto
 $Q_{útil}$ – Energia útil
 $Q_{disponível}$ – Energia Disponível
 η_{mi} – Eficiência método indireto
 f – Teor de fibra

w – Teor de umidade
 D – Teor de impurezas
 B_{exc} – Bagaço excedente
 B_T – Bagaço total
 B_{sf} – Bagaço consumido na safra
 B_{ef} – Bagaço consumido na entressafra
 B_{est} – Estoque de bagaço
 S – teor de açúcar
 φ – impureza residual do caldo
 MO_2 – Massa de oxigênio
 Var – Volume total de ar necessário para queimar um quilo de bagaço
 Mar – Massa de ar
 ρ_{ar} – Peso específico do ar
 Car – Coeficiente de excesso de ar
 V_{ai} – Volume de ar introduzido
 V_{gc} – Volume total dos gases da combustão
 V_{O_2} – Volume de Oxigênio
 V_{CO_2} – Volume de Dióxido de Carbono
 V_{N_2} – Volume de Nitrogênio
 V_{H_2O} – Volume de Água
 V_{gs} – Volume dos gases da combustão
 Q_2 – Calor perdido pelos gases de combustão
 c_{ps} – Calor específico dos gases da combustão
 c_{par} – Calor específico médio do ar
 T_{amb} – Temperatura ambiente
 T_{ref} – Temperatura de referência
 $T_{chaminé}$ – Temperatura da chaminé
 Q_3 – Perda de energia devido a combustão incompleta
 ε – Teor de cinzas

Q_4 – Perda de calor devido às cinzas

m_{vapor} – Vazão mássica de vapor

u – Velocidade média do vapor

A_s – Área superficial

ρ_{vapor} – Peso específico vapor

Re_d – Número de Reynolds

K – Condutividade do tubo

D – Diâmetro do tubo

L – Comprimento do tubo

Q_5 – Energia perdida devido a perda de carga no tubo

Q_6 – Perda por convecção

h - Coeficiente de convecção térmica

T_{vapor} – Temperatura do vapor

$T_{média}$ – Temperatura média ao longo da superfície do tubo

Nu - Número adimensional de Nusselt

Pr – Número de Prandtl

h_{vapor} – Entalpia do vapor

$h_{água}$ – Entalpia da água

P – Pressão em qualquer ponto do tubo

1. INTRODUÇÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso foi elaborado com a colaboração da Indústria Agroval, servindo às consolidações da pesquisa que culminou com a realização deste estudo.

O vapor desempenha um papel fundamental em uma indústria sucroalcooleira, sem o qual não seria possível a produção do açúcar. As caldeiras de geração de vapor são utilizadas para cozimento, acionamento das turbinas, bem como assegurar a evaporação e a condensação.

Uma caldeira é um dispositivo utilizado para mudar o estado da água de líquido para vapor, a fim de ser usado em aquecimento, acionamento de máquinas, em processos industriais, esterilização, e geração de energia elétrica. Naturalmente, que a preferência pelo vapor d'água como fluido de trabalho é justificada pelo seu alto calor específico e pela ampla disponibilidade da água no meio industrial.

Na verdade, a caldeira é um tipo de trocador de calor, que operando a uma pressão superior à pressão atmosférica, produz vapor, partindo da energia térmica de alguma fonte qualquer, a exemplo, da energia química oriunda da combustão.

Quase sempre a fonte geradora de calor é um combustível, especificamente utilizado para tal finalidade. Entretanto, calores residuais, oriundos de outros processos, também podem ser utilizados, e neste caso, referimo-nos as caldeiras de recuperação.

Para a produção de vapor d'água é necessário que haja combustão no interior da caldeira. Quanto mais viscoso o fluido combustível, mais difícil será a vaporização da água. Muitas vezes há a necessidade de haver um pré-aquecimento do fluido combustível, para que assim, haja uma diminuição da sua viscosidade. Assim, surge uma primeira classificação das caldeiras, ou seja, quanto ao tipo de combustível: (i) Combustíveis líquidos (óleo combustível, diesel); (ii) Combustíveis gasosos (gás natural, gás combustível nas refinarias) e Combustíveis sólidos (madeira, coque de carvão, coque de

petróleo, bagaço de cana). Nosso trabalho de balanço térmico da caldeira foi relacionado com o estudo do aproveitamento do bagaço de cana como combustível na Usina Agroval.

O vapor produzido na caldeira é então gerado pela transformação de energia química do combustível em calor. A energia introduzida na instalação em massa, ou volume de combustível, ou seja, essa energia química é denominada de **energia disponível (Q_d)**. Unidades (kJ/kg) ou (kJ/m³).

A quantidade de energia absorvida pelo fluido de trabalho, ou seja, o vapor pode ser utilizado além da geração de energia térmica, para a geração de energia elétrica. Essa energia é denominada de **energia útil (Q_1)**. Unidades (kJ/kg) ou (kJ/m³). Na verdade a variável (Q_1) representa o calor aproveitado para a formação do vapor.

A diferença entre a energia disponível e a energia útil, ou de fato utilizada, é devido às perdas que ocorrem durante o processo, inevitáveis e nos vários pontos da instalação. Essa energia é denominada de **energia de perdas (Q_p)**.

Apesar do sub aproveitamento deste resíduo de Biomassa existe um grande potencial para a produção de energia térmica, mecânica e também elétrica (MME; 2011).

A produção simultânea dessas formas de energia provenientes da queima do bagaço nas caldeiras geradoras de vapor das indústrias sucroalcooleiras, permitem o aproveitamento de cerca de 15% da energia excedente do bagaço (LOPES; BRITO; 2009).

O processo de produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana é totalmente automatizado e inserido nas linhas de produção das usinas. A planta, após a colheita, passa por quatro moendas, restando apenas o bagaço que é conduzido para as caldeiras, onde é realizada a sua queima.

Apesar do pouco investimento por parte governamental, nesta fonte alternativa de energia elétrica o Centro Nacional de Referência em Biomassa, com base na produção de 267 mil toneladas anuais de cana de açúcar para ao uso na cogeração de energia elétrica a partir do bagaço, em substituição aos

combustíveis fosseis, estima um potencial de 3.852 MW, podendo chegar a 20.000 MW por ano (FERREIRA et al.; 2010).

A energia produzida por meio de bagaço de cana pode contribuir não só para reduzir as emissões de poluentes, mas também para diversificar a matriz energética brasileira. Em 2004 o Brasil consolidou-se como o maior produtor de cana de açúcar do mundo. Esta consolidação reflete o bom desempenho o setor, impulsionado por uma maior demanda de álcool em todo mundo, como uma forma de reduzir os níveis de poluição no meio ambiente, através do uso de biocombustíveis.

Entretanto, a geração de energia elétrica com o bagaço desempenha um papel fundamental no cenário nacional, visto que, este tipo de indústria gera um negócio significativo, disponibilizando cerca de 1 milhão de empregos .

O preço da tonelada de bagaço é negociado, em média, a 90 reais durante o período de seca. Logo para a indústria sucroalcooleira a expectativa de aproveitamento deste subproduto, de grande valor comercial, traria benefícios de natureza econômica e social para as localidades adjacentes. E uma vez que nas fornalhas de todas as plantas sucroalcooleiras que utilizam o bagaço de cana, ainda existe um resíduo carbonáceo misturados às cinzas, este resíduo pode ser recolhido, tratado e aproveitado na ativação física deste material, produzindo carvão ativado.

Conclui-se, portanto que, o uso do bagaço de cana como combustível vai permitir que este material, antes desperdiçado pela indústria Sucroalcooleira, seja convertido em matéria prima que agregue considerável valor econômico.

Para permitir o total aproveitamento do subproduto bagaço de cana são propostos estágios de atualização e otimização tecnológica:

- Auto suficiência energética através de melhorias de sistema de geração de vapor, com a utilização de geradores de maior eficiência, que permitem geração de vapor superaquecido a altas pressões.
- Substituição das caldeiras antigas por caldeiras modernas para suportar essas altas pressões.

Enfim, para o aumento da capacidade de produção de energia elétrica em usinas, diversos investimentos em equipamentos são necessários, novos geradores de vapor, turbinas e aprimoramento na secagem do bagaço, visto que quanto maior o teor de umidade, menor a sua eficiência como combustível.

A Figura 1 abaixo representa os gerados de energia elétrica utilizados na Agroval.



Figura 1 – Geradores da Usina Agroval

Foi realizada uma análise dos diferentes parâmetros envolvidos na geração do vapor, a partir do bagaço de cana de açúcar, bem como calculadas, as eficiências das caldeiras, tomando como base, os dados coletados na Indústria Agroval.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso será composto por 8 Capítulos, incluindo a presente Introdução, Objetivos, Metodologia, Balanço Energético, Perdas Energéticas na Caldeira, Discussão, Conclusões e Referências Bibliográficas.

2. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho das caldeiras geradoras de vapor da Usina Agroval, onde o estudo termodinâmico e termo energético partem da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. No estudo do desempenho de tais caldeiras, alguns parâmetros serão abordados, tais como o calor útil para o processo, Poder Calorífico Superior e Inferior do Combustível.

2.1. Objetivos Específicos

- Calcular o rendimento das caldeiras através dos Métodos Direto e Indireto;
- Partindo da combustão do bagaço, analisar o regime ótimo de operação das caldeiras;
- Avaliar as perdas energéticas do processo, bem como sugerir a racionalização destas perdas.
- Verificar o consumo de bagaço de cana, relacionando-o com os valores ótimos do processo de geração de vapor, tais como, temperatura e pressão na caldeira.

3. USINA AGROVAL

A indústria onde este trabalho foi realizado (Usina Agroval) localiza-se no município de Santa Rita (PB), a mesma posiciona-se como uma das maiores fontes de rendas para a população local já que emprega cerca de 400 funcionários locais apenas na indústria. A mesma pertence a um tradicional grupo do setor, Japungu que possui outras Usinas tanto na Paraíba, como também no Centro-Sul.

O enfoque da empresa é a produção de açúcar cristal e VHP para o mercado externo e interno. Sua média de moagem gira em torno de 170 toneladas de cana moída por hora, que representarão mais de 700.000 toneladas de cana moídas no fim da safra, das quais são produzidos em média 6000 sacos por dia que totalizarão mais de um milhão de sacos quando a safra acabar.

Por tratar-se de uma empresa atualizada no que diz respeito às tecnologias utilizadas em seu processo, tornou-se proveitosa à realização de um estudo que faça um diagnóstico da realidade de aproveitamento energético do maior subproduto das usinas.

4. METODOLOGIA

Na linha de realização dos objetivos do presente trabalho a metodologia partiu de uma ampla pesquisa bibliográfica, bem como do levantamento dos parâmetros operacionais da Indústria Agroval. Foram coletados dados do histórico das duas caldeiras, objeto de estudo, das grandezas definidas como importantes nesta avaliação energética, além da análise da combustão do bagaço, como fonte de calor, ao longo do processo de fabricação de álcool e açúcar.

Nas aplicações que se seguem, foi realizado um estudo termodinâmico (Jones; Hawkins;1986) partindo-se da **lei da conservação de energia**, onde uma das principais considerações feitas é que as variações de energia cinética e potencial do sistema são supostas desprezíveis, em face da variação de energia interna U.

Pela 1ª Lei da Termodinâmica (ou lei da conservação da energia), escrita para sistemas abertos, ou volumes de controle (volume não deformável) – que são importantes em transferência de calor para fluidos em escoamento – a 1ª lei é escrita de acordo com a Equação 1:

$$E_2 - E_1 = Q - W + \sum h_i m_i - \sum h_s m_s \quad (\text{Equação 1})$$

Então, a **energia total** de um volume de controle e, portanto, a sua temperatura – pode variar não só por transferência de calor e/ou por realização de **trabalho**, mas também pela **entrada e/ou saída de matéria** do sistema aberto. Diz-se então que **energia está** entrando ou saindo do volume de controle por convecção, ou seja, energia é “**convectada**” (transportada) porque acompanha a matéria que está em movimento.

De acordo com a segunda Lei, a variação total aplicada ao supramencionado sistema aberto, é dada pela Equação 2:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} + \sum m_e S_e - \sum m_s S_s \quad (\text{Equação 2})$$

Este trabalho segue a maioria dos balanços efetuados, ou seja, a aplicação das Primeira e Segunda Lei, não contabiliza a qualidade da energia que está sendo desperdiçada. A eficiência das caldeiras irá relacionar o trabalho efetuado pelo sistema aberto com o trabalho hipoteticamente realizado pelo mesmo sistema, a uma mesma pressão e temperatura, no caso de não existirem perdas energéticas de acordo com a Equação 3:

$$\eta = \frac{W}{m\Delta h} \quad (\text{Equação 3})$$

Combinando a Equação (2) com a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica e desenvolvendo para a situação das caldeiras, tem-se:

$$\eta_{caldeira} = \frac{m_s E_s - m_e E_e}{m_{comb} E_{comb}} \quad \text{(Equação 4)}$$

Uma vez que estamos lidando com o bagaço de cana de açúcar como combustível na caldeira, a Equação (4) será utilizada em função do PCI do bagaço, ou seja, do Poder Calorífico Inferior do bagaço, que significa o calor transferido por 1 kg de bagaço.

5. PRINCÍPIO DO BALANÇO ENERGÉTICO NAS CALDEIRAS

Este trabalho consiste no estudo de caso de duas caldeiras da Indústria Agroval onde se avalia a viabilidade da utilização do bagaço de cana de açúcar, como combustível, para a geração de vapor nesta indústria.

Um balanço energético consiste basicamente na obtenção de índices que traduzem o rendimento destas caldeiras. O rendimento de uma caldeira caracteriza a perfeição com que o sistema térmico opera. Entretanto, a caldeira depende de uma série de dispositivos, cada um deles, consumindo uma parcela da energia que entra. Para tanto, dois métodos diferentes serão utilizados: (5.1) Método Direto e (5.2) Método Indireto.

Todo o equacionamento obtido foi a partir das literaturas especializadas (Hugot, 1967; Bejan, 1988; Camargo et al, 1990; Kota, 1993; Sonntag, 1998).

5.1. Método Direto

Do balanço de energia em uma caldeira, obtém-se:

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad \text{(Equação 5)}$$

Neste caso a eficiência do processo é definida por:

$$\eta_{md} = \frac{Q_{útil}}{Q_{disponível}} \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde o calor útil é aquele que realmente é utilizado para vaporizar a água e formar o vapor saturado, ou vapor superaquecido, com a vazão

desejada. Já o calor disponível, é todo aquele oriundo da combustão, neste caso específico, da queima do bagaço.

Trabalhos efetuados anteriormente mostram que a energia disponível pode ser considerada igual ao PCI.

5.2. Método Indireto

O cálculo da eficiência por este método é bem mais realista, uma vez que contabiliza todas as perdas de energia que ocorrem ao longo do processo, sendo estas, portanto, outra abordagem para estudo. Logo, conhecendo-se as perdas de energia, bem como as suas causas, pode-se encontrar a maneira de minimizá-las, tornando o funcionamento de uma caldeira mais adequado. Neste caso, tal eficiência é dada pela Equação 7:

$$\eta_{mi} = 100 - \frac{\sum Q_{perdas}}{Q_{disponível}} \quad \text{(Equação 7)}$$

Faz-se necessário ressaltar que na Q_{perdas} , contabiliza todo o calor perdido ao longo do processo.

Independentemente do método de cálculo utilizado para calcular a eficiência de uma caldeira, o rendimento térmico é sempre inferior a 100% e quanto menor a quantidade de perdas, maior será o seu rendimento.

A seguir encontram-se as ilustrações das duas caldeiras (Figuras 2 e 3).



Figura 2 - Caldeira 1



Figura 3 - Caldeira 2

5.3. As Caldeiras

São duas as caldeiras utilizadas na Usina Agroval para a geração de vapor. Ambas são do tipo Aquatubular, ou seja, neste tipo de caldeira, a água passa pelo interior dos tubos, que por sua vez, são envolvidos pelos gases da combustão.

As especificações das caldeiras utilizadas estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das caldeiras estudadas.

Características	CALDEIRA 1	CALDEIRA 2
Fabricante	Dedini	Dedini
Material	Ferro	Ferro
Vazão de Vapor nas duas caldeiras (ton/h)	79	
Capacidade de Vapor(kg/h)	54.000	25.000
Condutividade Térmica (W/m°C)	73	73
Área Superficial de Vaporização (m ²)	1.500	800
Tipo de Vapor Produzido	Saturado	Saturado
Pressão Máxima Suportada (kgf/cm ²)	25	37,5
Tubulações (pol)	2 e 3	2 e 3

A Figura 4 a seguir apresenta o balão superior da caldeira 2.



Figura 4 - Balão superior caldeira 2

5.4. O Vapor

O vapor tem uma grande importância como fonte industrial de calor. O vapor além de ser uma energia limpa proporciona um aquecimento rápido e uniforme. Um aquecimento a vapor apresenta 1,5 a 2 vezes mais eficiência do que aqueles que utilizam água quente.

As caldeiras que utilizam o bagaço como combustível, apresentam uma eficiência entre 70 a 80%, podendo haver um aumento dessa eficiência, se houver uma queima adicional de bagaço. Obviamente essa eficiência cairá, se a caldeira estiver suja, e se não houver manutenção periódica. Ou seja, as usinas de uma forma geral necessitam de uma parada periódica para manutenção (Ganapaty; 1987).

O vapor gerado em ambas as caldeiras é do tipo saturado, o que implica que a água e o vapor estão no ponto crítico, ou seja, coexistem no equilíbrio.

A Tabela 2 apresenta as propriedades físicas do vapor.

Tabela 2 – Propriedades Físicas do Vapor.

Temperatura de Saída do Vapor (°C)	300
ρ (kg/m³)	0,41
u (m²/s)	4,7 x 10 ⁻⁵
Título (%)	99
Pr	0,991
Entalpia (kJ/kg)	2.994,34
c_p (kJ/kg °C)	1,997
Condutividade térmica (W/m°C)	0,0379

As Figuras 5 e 6 abaixo demonstram o fluxograma do vapor e os ternos de moenda movidos à base do vapor.



Figura 5 - Fluxograma do vapor



Figura 6 - Ternos de moenda impulsionados a vapor

5.5. O Bagaço

A Usina Agroval produz cerca de 30.000 toneladas de bagaço ao mês, vendendo, em média 18.500 toneladas de bagaço excedente. As tabelas 2 e 3 apresentam as composições químicas e físicas do bagaço de cana produzido na Usina, muito embora, possa existir uma pequena variação nestas composições, devido ao tipo de equipamento empregado para a extração do caldo.

Conforme estudo realizado pelo CETESB, desde a década de 80, cerca de 90% da energia consumo da energia consumida pelas indústrias canavieiras

do Brasil, tinham origem na queima do bagaço de cana, o que corresponde a 0,9% de toda produção energética nacional, aproximadamente 35% total de óleo combustível de usado no país, além de ter seu uso assegurado para o seu excedente.

Ainda é uma fonte de energia muito menos impactante ao meio ambiente, em relação aos derivados de petróleo, uma vez que o carbono emitido para a atmosfera, durante a queima desse combustível, na forma de dióxido de carbono, volta a se fixar novamente no vegetal durante o seu crescimento. É tanto assim, que a energia advinda do bagaço é classificada como energia ecológica (FIESPE/CIESP; 2001).

A Figura 7 abaixo ilustra a saída de bagaço da moenda para as caldeiras e a medição da temperatura que o mesmo se encontra.



Figura 7 - Saída do bagaço e medição de sua temperatura

A composição física é utilizada para a determinação da quantidade de fibra no bagaço. Já a composição química nos permite fazer uma avaliação energética do bagaço como combustível, relacionando-o com o seu Poder Calorífico (PC). Dados expressos nas Tabelas 3 e 4 abaixo.

Tabela 3– Propriedades e Composição Física do Bagaço Produzido na Agroval

Umidade (w)	50 %
Impurezas e Sólidos Dissolvidos (D)	2 %
Teor de açúcar no bagaço(s)	3 %
Pureza residual do caldo (φ)	75,18 %
B	37,5 %
Temperatura que o bagaço entra	32
C_p médio do ar (kJ/kg °C)	1,795

Tabela 4 – Composição Química do Bagaço Produzido na Agroval

C (%)	46
H (%)	6
O (%)	44
Cinzas (ϵ)	4

O teor de fibra do bagaço é dado pela Equação 7:

$$f = 100 - w - D \quad \text{(Equação 7)}$$

Já a quantidade de bagaço produzida é uma função da quantidade de cana moída, bem como da quantidade de fibra do bagaço. Para cada 100 partes de cana moída, teremos B partes de quantidade de bagaço em porcentagem.

5.6. O Bagaço Excedente

Uma vez que a fração utilizada no processo produtivo da Agroval, cerca de 37,5 % da cana moída, é suficiente para atender a demanda, a usina vende o excedente, ou seja, cerca de 18.500 toneladas de bagaço por safra.

O bagaço excedente é calculado subtraindo-se o bagaço total produzido, menos o consumo do bagaço consumido durante a safra, durante a entressafra, bem como uma parcela correspondente a um estoque de segurança (Jaguaribe, et al., 2002; Lobo, et al., 2002 e Souza, 2004). A

Equação 8 utilizada para tal cálculo é a que se segue:

$$B_{exc} = B_T - B_{sf} - B_{ef} - B_{est} \quad \text{(Equação 8)}$$

5.7. Consumo de bagaço

O consumo de bagaço, B , para manter a planta operando durante a safra, B_{sf} , ou na entressafra, B_{ef} , é dado pelo produto do fluxo de bagaço consumido, m_b , em t/h, pela duração do período, N , em horas, h (Jaguaribe, et al., 2002; Lobo, et al., 2002 e Souza, 2004):

$$B = m_b \cdot N \quad \text{(Equação 9)}$$

5.8. O Poder Calorífico do Bagaço

A quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume de combustível é denominada de poder calorífico e é uma característica de cada combustível. A partir desta definição, surgem duas outras definições: PODER CALORÍFICO SUPERIOR e PODER CALORÍFICO INFERIOR.

O Poder Calorífico Superior é o calor produzido por 1 kg de bagaço a 0°C, sob pressão atmosférica.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) dependerá do calor latente do combustível e da formação de água no combustível.

As equações para o cálculo do PCS e do PCI do bagaço são as que seguem:

$$PCS = 19.246 \frac{f}{100} + 16.548 \frac{s}{100} + 17.154 \frac{i}{100} \quad \text{(Equação 10)}$$

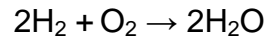
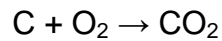
$$PCI = 19.246 \frac{f}{100} + 16.548 \frac{s}{100} + 17.154 \frac{i}{100} - 1.454 \frac{100-w}{100} - 2.510 \frac{w}{100} \quad \text{(Equação 11)}$$

Onde i , ou seja, a relação entre o poder calorífico do açúcar e das impurezas é dado pela seguinte relação:

$$i = \frac{100-\varphi}{\varphi} \times s \quad \text{(Equação 12)}$$

5.9. A Combustão do Bagaço

As reações estequiométricas de combustão do bagaço são as seguintes:



A massa de oxigênio necessária para oxidar totalmente a massa de bagaço é dada por:

$$MO_2 = 2,67 \frac{C}{100} + 8 \frac{H}{100} - \frac{O}{100} \quad (\text{Equação 13})$$

Já para o cálculo do volume total de ar necessário para que seja queimado 1 kg de bagaço é dada pela Equação 14:

$$Var = \frac{Mar}{\rho_{ar}} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde a massa do ar será dada em função da massa de oxigênio, considerando-se que 21% do ar atmosférico é composto de oxigênio, logo:

$$Mar = \frac{MO_2}{0,21} \quad (\text{Equação 15})$$

O volume de água será igual ao volume de oxigênio que entrou na combustão do bagaço, multiplicado por dois.

O processo de combustão pode ser completo, ou incompleto, este último muito indesejável do ponto de vista energético, uma vez que o combustível não é totalmente queimado. Esta parte de combustível não queimada, sai pela chaminé, em sua forma gasosa, juntamente com produtos nocivos ao meio ambiente e fuligem. A Figura abaixo apresenta o exaustor e chaminé da caldeira 1.



Figura 8 - Chaminé e exaustor

Na prática, utiliza-se um excesso de ar para se conseguir a completa oxidação de todo o combustível. Ressaltando-se neste ponto, que quanto maior for o excesso de ar, maior será o teor de CO₂ e conseqüentemente, menor será a eficiência da caldeira.

O coeficiente de excesso de ar é dado pela seguinte Equação 16:

$$C_{ar} = 1 + V_{ai} \quad (\text{Equação 16})$$

De acordo com BAZZO(1995), na maioria dos casos é impossível medir o fluxo de ar que entra na fornalha, devido à própria concepção do equipamento. Desta maneira, o procedimento padrão é a análise dos gases da combustão, tendo em vista as propriedades dos combustíveis, com conseqüente identificação do coeficiente de excesso de ar.

5.10. Relação entre o Teor de Oxigênio e a Eficiência da Caldeira

Normalmente, para o caso dos combustíveis sólidos, coeficiente de excesso de ar varia de 1,15 a 2. Com base na literatura utilizaremos os coeficientes de excesso de ar, para relacioná-los com a eficiência das caldeiras, uma vez que as condições de operação são bastante variáveis. Foram calculados rendimentos para diferentes valores de coeficiente de excesso de ar em certo intervalo, ou seja, $C_{ar} = 1.2, 1.35, 1.7$ e 2 (Ganapaty; 1987), correspondentes a diferentes valores de O₂, que varia de 2 a 9%.

5.11. Impactos Ambientais Advindos da Combustão do Bagaço.

As emissões potenciais e remanescentes dos principais poluentes emitidos pelo bagaço para a geração de vapor são: a emissão de material particulado proveniente da combustão nas caldeiras e os óxidos de nitrogênio, NO_x.

5.11.1. Material Particulado

As partículas dos gases de exaustão, medidas nas caldeiras geradoras de vapor, das usinas canavieiras, podem apresentar valores na faixa de 400 a 600 mg/Nm³. No entanto, como as usinas passaram a empregar filtros e lavadores de gás do tipo venturi, houve uma redução significativa dos teores destas partículas, reduzindo esta emissão de 80 a 200 mg/Nm³. Combinando-se as duas técnicas, há a garantia da concentração dessas partículas em torno dos 120 mg/ Nm³(Andrade; 2007).

Das tecnologias mais utilizadas para o controle do Material particulado estão (Olandl; 2002):

- Ciclones, ou separadores ciclônicos, que são equipamentos do tipo centrífuga, onde pequenos ciclones operam em paralelo, separando as partículas a partir de forças inerciais ou centrífugas.
- Lavadores a Gás, onde na remoção das partículas é utilizado um líquido, em geral água, para separar as partículas ou contaminantes gasosos da corrente de gás, que nestas caldeiras são as cinzas voláteis (*fly ash*) e óxidos de enxofre.
- Precipitadores Eletrostáticos, equipamentos também conhecidos como filtros de ar eletrostáticos, que capturam os poluentes e libera gás limpo para a atmosfera.
- Filtross de Manga. desenvolvido com o objetivo de separar partículas no fluxo de gases industriais, tais filtros representam a solução mais segura para se garantir um excelente controle na emissão dos poluentes. Através da passagem do ar carregado, as partículas de impureza ficam retidas nos filtros e nos poros dos filtros.

5.11.2. Impacto dos Óxidos de Nitrogênio, NOx, Oriundo da Combustão do Bagaço.

Em relação aos óxidos de nitrogênio, os valores de emissão estão na faixa de 100 a 200 mg/Nm³, concluindo-se portanto, que no campo das usinas sucroalcooleiras, esses teores estão dentro dos padrões nacionais estabelecidos para os limites de emissão (CONAMA), e cuja formação depende principalmente do coeficiente de excesso de ar. Essa dependência, causa uma instabilidade, não garantindo portanto, os padrões de qualidade exigidos (EPA).

Assim sendo, medidas devem ser tomadas, nas plantas industriais, para reduzir os teores de NOx em cerca de 30%. Uma destas medidas, seria a diminuição de 20% do excesso de ar introduzido na fornalha, para a realização da combustão completa (Mc Gowan; 2003).

Estudos mostraram que a concentração dos óxidos de nitrogênio “térmicos”, cresce ainda mais com o aumento da temperatura na zona de combustão, do que propriamente com a concentração do excesso de ar (Sigal, 1988).

A formação do NOx é perfeitamente controlada diminuindo-se a temperatura média da chama, muito embora, tal alternativa não assegure a combustão completa . Os óxidos de nitrogênio começam a se formar por volta de 900 a 1300°C, constituindo cerca de 70% da emissão de NOx (Oland; 2002).

O controle simultâneo da formação do NOx e da eficiência da combustão completa, pode ser garantida se (Mc Gowan;2003):

- Forem utilizados queimadores de mistura controlada, reduzindo a turbulência da região do queimador, reduzindo a temperatura da chama, removendo a energia adicional, antes que uma temperatura mais alta seja alcançada.
- Uso da combustão estagiada, onde apenas uma parte de ar em excesso é introduzida inicialmente. A quantidade de ar remanescente é adicionada posteriormente, para completar o processo de combustão. Uma outra forma

de combustão estagiada, é que parte do combustível total é adicionado com um excesso de ar de combustão, e o combustível remanescente, é adicionado em uma parte posterior do processo.

- Recirculação dos gases de exaustão (“FGR – *flue gas recirculation*”), na qual uma parte do gás de exaustão é misturada o ar de combustão no qual uma parte do gás de exaustão é misturada ao ar de combustão nnos queimadores, aumentando a massa de gás, reduzindo a temperatura da chama.
- Uso de queimadores multichama e combustão pobre da pré mistura, que quebram o calor adicionado em chamas menores, reduzindo assim a temperatura, e permitindo a remoção de calor mais rapidamente.
- Uso da combinação de ar e combustível gasoso, com a opção de adicionar gás de exaustão, causando desta maneira, uma combustão relativamente a uma temperatura mais baixa.
- Na prática utilizam-se várias destes métodos simultaneamente. Nas caldeiras mais modernas, utilizam-se queimadores com baixa emissão de NOx (LNB – *Low NOx Burner*), além da combustão fracionada.

6. AVALIAÇÃO DAS PERDAS ENERGÉTICAS NA CALDEIRA

Como já foi visto anteriormente, a eficiência da caldeira geradora de vapor, calculada pelo método indireto, é feita através das perdas de energia ao longo do processo, ou seja:

$$\eta_{mi} = 100 - \sum q_{perdas} \quad (\text{Equação 17})$$

Neste trabalho foram consideradas as perdas oriundas de:

- Calor junto aos produtos gasosos da combustão
- Calor devido à combustão incompleta
- Isolamento falho, havendo perda por convecção.
- Calor com o material purgado da caldeira.
- Calor junto às cinzas.

- Perda de carga.

6.1. Perda de Calor Com os Gases da Combustão

Os gases oriundos da combustão, e considerando também o excesso de ar introduzido são: N₂, O₂, CO₂ e H₂O. Logo o volume total dos gases de combustão é quantificado pela Equação 18:

$$V_{gc} = V_{O_2} + V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} \quad (\text{Equação 18})$$

Entretanto uma correlação (Equação 19) é bastante utilizada:

$$V_{gs} = V_{ar}(1 - w) + V_{ai}(1 - w) + 1,244w \quad (\text{Equação 19})$$

Finalmente, para calcular a perda de calor através dos gases de combustão, utiliza-se a seguinte equação:

$$Q_2 = V_{gs}c_{ps}(T_{chaminé} - T_{ref}) - V_{ar}c_{par}(T_{amb} - T_{ref}) \quad (\text{Equação 20})$$

6.2. Perda de Energia devido à Combustão Incompleta

Este cálculo é feito em torno do teor de CO₂ resultante da combustão incompleta. A fórmula para o cálculo de Q₃ é dada a seguir:

$$Q_3 = (MCO_2 \times \text{teor de } CO_2)V_{ar}C_{ar} \quad (\text{Equação 21})$$

O teor de dióxido de carbono, na Usina Agroval, é de 12%.

6.3. Perda de Calor devido as Cinzas

A equação utilizada para tal finalidade é a seguinte:

$$Q_4 = \frac{\varepsilon(33.820)100}{PCS} \quad (\text{Equação 22})$$

6.4. Perda de Energia devido às Entalpias das Escórias

Este tipo de perda energética inclui a entalpia da escória e a perda devido ao resfriamento de dutos e chaminés, não pertencentes ao sistema de circulação da caldeira. As escórias retiradas do fundo da fornalha estão a uma alta temperatura superior ao início da fusão das cinzas. Assim, parte do calor é transferido para a água de resfriamento da escória, que para caldeiras de fornalha fechada, a perda energética, está em torno dos 2%.

6.5. Perda de Calor pelo Mecanismo de Convecção

Um dos motivos da perda de calor por convecção é justamente as condições de escoamento do vapor na tubulação. Há de se verificar se o regime de escoamento é laminar ou turbulento, além da rugosidade do tubo, bem como de outros fatores que tendem a dificultar o escoamento.

6.5.1. Velocidade Média de Escoamento de Vapor

A velocidade média de escoamento do vapor é diretamente proporcional ao seu caudal mássico. Assim, a partir da vazão mássica de vapor fornecida, é possível calcular a velocidade média de escoamento, ou seja:

$$m_{vapor} = u \rho_{vapor} A_s \quad (\text{Equação 23})$$

Assim, com base na velocidade de escoamento pode-se calcular o tipo de regime de escoamento do vapor, se laminar, ou turbulento, através do número adimensional Re_D :

$$Re_d = \frac{u D}{K} \quad (\text{Equação 24})$$

E com o número de Reynolds calculado, o fator de atrito na tubulação, de acordo com a seguinte correlação (Petukhov; 1970):

$$F = (0,790 \ln Re_D - 1,64) - 2. \quad (\text{Equação 25})$$

São inúmeras as relações para o cálculo do fator de atrito de acordo com a literatura[], entretanto, escolheu-se esta, uma vez que engloba uma ampla faixa de número de Reynolds, desde o regime laminar ao turbulento.

6.6. Energia perdida devido à perda de carga no tubo

Uma vez que existe o fator de atrito, a velocidade do escoamento do vapor muda, ao longo do tubo, havendo mais perda de energia.

Conhecidos a velocidade média de escoamento, e o fator de atrito, esta perda para tubos horizontais, pode ser dada pela Equação 26:

$$Q_5 = f \frac{\rho u}{2D} L \quad (\text{Equação 26})$$

6.7. Perda por Convecção

A perda de calor por convecção é dada pela Lei de Newton do resfriamento, que aplicada à caldeira, se transcreve:

$$Q_6 = h(T_{vapor} - T_{média}) \quad (\text{Equação 27})$$

A temperatura média é variável ao longo do tubo, e essa variação é pequena (280 a 315°C) (Ganapaty; 1987). Geralmente, tomam-se como base as temperaturas de entrada e de saída do vapor do tubo, aqui tomaremos a temperatura inferior de 280°C. Onde o coeficiente de convecção térmica é calculado pelo número adimensional de Nusselt da forma que se segue:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (\text{Equação 28})$$

A correlação a ser utilizada para o cálculo do número adimensional de Nusselt médio, para fluxos em cilindros, é a relação de Churchill e Bersnstein,

apresentada abaixo (Equação 29). É importante salientar que a escolha da seguinte correlação foi feita devido à sua adequação à número de Pr moderados ($0,6 < Pr < 10$) e regimes de escoamento com $10^2 < Re < 10^7$.

$$Nu_m = 0,3 + \frac{0,62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{[1 + (\frac{0,4}{Pr})^{2/3}]^{1/4}} [1 + (\frac{Re}{280.000})^{5/8}]^{4/5} \quad (\text{Equação 29})$$

7. BALANÇO ENERGÉTICO COM BASE NOS PARÂMETROS DE VAPOR

A Tabela 2 apresenta os dados do vapor fornecidos pela Usina Agroval.

Aqui serão consideradas as energias trocadas entre o bagaço e a água, no interior da fornalha, para formar o vapor. Desta forma, considerar-se-á o calor de saída, ou seja, a diferença de entalpia entre a água e o vapor, à mesma temperatura. O calor consumido pela água para a conversão em vapor será dado pela seguinte expressão:

$$Q_{saída} = \frac{m_{vapor}(h_{vapor} - h_{água})}{3600} \quad (\text{Equação 30})$$

O calor na entrada da caldeira é calculado por:

$$Q_{entrada} = \frac{Q_{saída}(100)}{\eta} \quad (\text{Equação 31})$$

O consumo de bagaço (combustível) ótimo é fornecido pela seguinte relação:

$$B = \frac{Q_{saída}(3600)}{PCI} \quad (\text{Equação 32})$$

E finalmente, para um regime de escoamento de vapor, totalmente desenvolvido no interior da caldeira, a pressão em qualquer ponto do tubo será dada por:

$$P = \frac{\rho_{\text{vapor}} \times \eta \times \text{PCI} \times B}{m_{\text{vapor}}} \quad (\text{Equação 33})$$

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 5 apresenta os dados do processo.

Tabela 5 – Dados do Processo

Temperatura_{amb} (°C)	34
Temperatura_{ref} (°C)	30
Temperatura da chaminé (°C)	110
Temperatura do Bagaço (°C)	35
Volume de Ar Introduzido (m³)	0,67
C_p dos produtos da combustão (kJ/kg °C)	1,60
C_p médio do ar (kJ/kg °C)	1,33
Coefficiente de Excesso de Ar	1,15

A Tabela 6 apresenta o resultado da aplicação do equacionamento, utilizando os parâmetros coletados na Agroval.

Tabela 6 – Dados calculados

B (%)	48
B_{calc} (%)	37,5
PCS	9.904,34
PCI	7.922,34
Volume de ar teórico (m³)	4,67
Volume de ar seco (m³)	5,37
Volume de ar húmido (m³)	5,92
Volume dos gases da Combustão (m³)	4,50
η_{md} utilizando o B	80,50
η_{md} utilizando o B_{calc} (%)	68,65

O primeiro ponto a ser notado é que, utilizando a fração de bagaço, efetivamente utilizado pela usina, e que atende a demanda de todo o processo produtivo, apresenta uma eficiência excelente, em comparação àquela calculada com base na fração de bagaço que poderia ser utilizada, sem o excedente que é vendido.

A Tabela 7 apresenta parâmetros relacionados ao escoamento do vapor, bem como coeficiente convectivo do processo.

Tabela 7 – Parâmetros relacionados ao processo

Velocidade Média de Escoamento (m/s)	83,78
Número de Reynolds	1,087x10 ⁶
Tipo de Escoamento do Vapor	Turbulento
Nusselt Médio	580
Coefficiente de Convecção (W/m²)	36,07
Fator de Atrito	7,340

A Tabela 8 apresenta as perdas energéticas, ao longo do processo para o cálculo da eficiência, utilizando o método indireto.

Tabela 8 – Perdas Energéticas ao longo do Processo

Perda de calor com os produtos gasosos da combustão (%)	5,49
Perda de Calor devido à combustão incompleta (%)	0,23
Perda de Calor pelo mecanismo de convecção (%)	7,28
Perda de Calor com a Entalpia das Escórias (%)	2
Perda de Calor junto às cinzas (%)	0,137
Estimativa de Perda Por radiação (estimativa) (%)	3

O que significa que aplicando os dados da Tabela 8 ao cálculo da eficiência através do método indireto, temos:

$$\eta_{mi} = 81,86 \%$$

Assim, pode-se concluir que a caldeira apresenta uma excelente eficiência, inclusive, levando-se em conta, que o cálculo através do método indireto é mais preciso. A diferença entre os dois métodos para o cálculo das eficiências foi de apenas 1,36 %.

A Tabela 9 apresenta os valores ótimos, calculados a partir das Eqs.30 a 33.

Tabela 9 – Valores ótimos calculados

Calor de Entrada com MI (kW/h)	78.664
Calor de Saída (kW/h)	64.395
Quantidade de bagaço ótimo (ton/h)	23.406
Pressão em qualquer ponto do tubo (kgf/m²)	114,76

9. CONCLUSÕES

A conclusão do presente trabalho permite dizer que os objetivos foram alcançados com êxito.

Pode-se concluir do ponto energético, que as caldeiras da Usina Agroval, operam com uma ótima eficiência e dentro dos parâmetros almejados para caldeiras geradoras de vapor.

Utilizando métodos distintos para o cálculo do rendimento das caldeiras, observou-se que a diferença entre tais eficiências era mínima, de apenas 1,36%. Ambas apresentaram uma eficiência acima dos 80%.

A Figura 9 abaixo demonstra a variação da eficiência em função do coeficiente de excesso de ar. Avaliando a Figura 9 podemos comprovar que a eficiência da caldeira é inversamente proporcional ao coeficiente de excesso de ar. Além disso, com o coeficiente de excesso de ar de 1,15, correspondente a

um teor de oxigênio de aproximadamente 2 %, nesta condição o bagaço é queimado totalmente com um rendimento adequado.

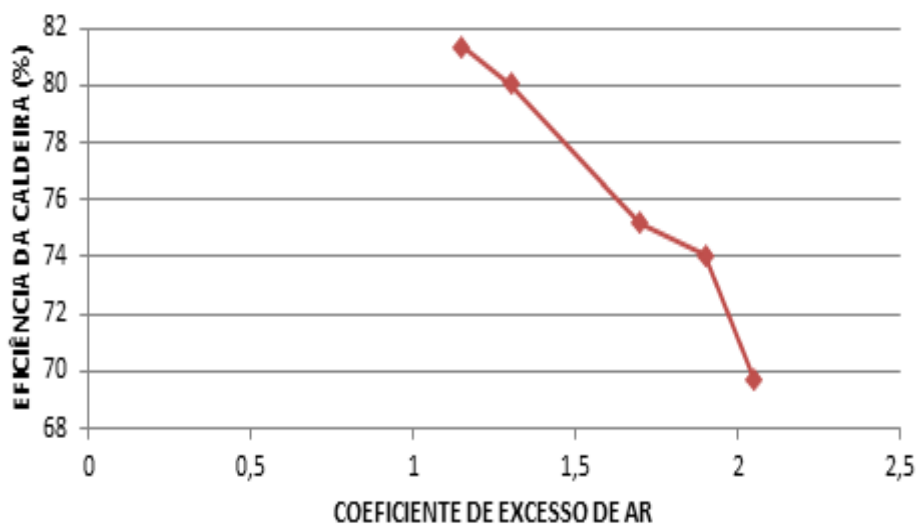


Figura 9 - Gráfico da eficiência da caldeira versus o coeficiente de excesso de ar

Foi verificado que as maiores perdas de calor, nas linhas de vapor, eram oriundas do mecanismo de convecção, radiação e pelos produtos gasosos da combustão, sendo as demais perdas, praticamente desprezíveis.

Quanto à perda por convecção, seria interessante para a Agroval, buscar um isolamento mais eficiente, tendo como consequência um aumento ainda maior na eficiência de suas caldeiras.

Importante salientar que o PCS e o PCI do bagaço produzido pela Agroval estão dentro dos valores apresentados por diversas Usinas de grande porte, tanto a nível nacional, quanto internacional.

Sabe-se que os poderes caloríficos do bagaço podem ser aumentados com a redução da umidade, bem como o teor de açúcar presente na fibra. Este último item, prejudica, de certa forma a combustão do bagaço. Entretanto, a usina opera com um teor ótimo desses dois supramencionados parâmetros.

As boas condições operacionais das caldeiras, também deve-se ao fato da Usina Agroval ter uma manutenção periódica, bem como uma instrumentação adequada e estruturada para as condições operacionais.

10. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Discussão da viabilidade de investimentos na ampliação do sistema de cogeração de energia, considerando o preço do bagaço e os custos de geração de energia, por um período de tempo determinado. Analisar a viabilidade de tornar esta Usina autossustentável em energia, empregando turbo geradores de múltiplo estágio, que operam com entrada de vapor, gerando assim, energia elétrica para o acionamento das moendas, picadores e outros equipamentos que fazem parte do processo produtivo.

De uma maneira geral, estudar a viabilidade do uso mais racional do bagaço, através de simulações de investimento, custos e benefícios, se de fato é mais rentável a venda do excedente, in natura, ou usá-lo para cogerar eletricidade.

Utilizando outra abordagem conceitual, como consequência deste trabalho, e tendo em vista a atual conjuntura mundial, que busca um meio ambiente mais salutar, além do conceito de *fábrica fechada*, ou seja, plantas industriais que reaproveitem toda água, energia e químicos utilizados ao longo do processo fabril, é interessante analisar os impactos ambientais provocados pela queima do bagaço, mesmo sendo este subproduto conhecido como energia ecológica. Inserido neste contexto, fazer um estudo sobre as técnicas mais viáveis de remoção dos poluentes emitidos pela combustão do bagaço, quer seja do ponto de vista técnico, quanto do ponto de vista econômico.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bazzo, E. 1995**, “Geração de Vapor”, 2ª Ed., UFSC, Brasil.
- Bejan, Adrian, 1998**, “Advanced Engineering Thermodynamics”, A Wiley-Interscience Publication, New York.
- Camargo, Carlos A., et al., 1990**, “Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e Álcool: manual de recomendações”, Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, São Paulo.
- Churchill, S. W. and M. Bersnstein, 1977**, “A Correlation Equation for Forced Convection from Gases and Liquids to a Circular Cylinder in Cross Flow. J. Heat Transfer, 99: 300-306.
- FERREIRA, F. M. et al.,2010**, “Cogeração no Setor Sucroalcooleiro em Goiás”, Monografia (MBA em Gestão Sucroalcooleira) – Centro Universitário de Lins – Unilins.
- FIESP/CIESP, 2001**, “Ampliação da Oferta de Energia Através da Biomassa”, São Paulo, Brasil.
- Ganapaty, V., 1987**, “Steam Plant Calculations Manual”, 2nd edition, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc.
- Hugot, Emile, 1969**, “Manual da Engenharia Açucareira”, Ed. Mestre Jou, São Paulo, Vol. I e II. Proceedings of ENCIT 2004 -- ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 -- Dec. 03, 2004
- Jaguaribe, E. F., Lobo, P. C., Lima Neto, J. R., Souza, W. L., Rocha, F. A. AA., 2002**, “Ampliação de uma planta de cogeração de uma destilaria de cana de açúcar visando a auto-suficiência energética – estudo de um caso”, Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2002, trabalho CPB0130, João Pessoa-PB.
- Jaguaribe, E. F., Lobo, P. C., Lima Neto, J. R., Souza, W. L., Rocha, F. A. A., 2002**, “Estudo termoeconômico da ampliação de um sistema de cogeração de energia em uma destilaria de cana de açúcar”, Anais do IX Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas, ENCIT 2002, trabalho CIT02-0240, Caxambu, 2002.

Jones, J. B., Hawkins, G. A., 1986, “Engineering Thermodynamics – an introductory textbook”, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Kotas, T. J., 1995, “The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”, Krieger Publishing Company, Reprint edition, Florida, USA.

Lobo, P. C., Jaguaribe, E. F., Lima Neto, J. R., Rocha, F. A. A., Souza, W. L., 2002, “Comparison Between two Cogeneration Schemes in Sucro-Alcohol Plants”, Proceeding of the 15th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2002, v. III, pp 1448-1454. Edited by G. Tsatsaronis, M. J. Moran, F. Czesla and T. Bruckner. ISBN 3-00-009533-0. Berlin, Germany.

Lobo, P. C., Jaguaribe, E. F., Lima Neto, J. R., Rocha, F. A. A., Souza, W. L., 2002, “Análise comparativa de sistemas de cogeração usados em duas diferentes plantas sucro-alcooleiras”, Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2002, trabalho CPB0131, João Pessoa-PB.

LOPES, A. G.; BRITO, E. C., 2009, “Cogeração de energia elétrica derivada da queima do bagaço da cana-de-açúcar”. 2009. Monografia (Curso Sequencial de Gestão Ambiental) – Centro Universitário de Lins – Unilins.

Mc Gowann, T., 2003, “NOx Control for Stationary Sources, International Joint Power Generation Conference, Georgia World Conference Center, Atlanta, Georgia, USA.

MME, Ministério de Minas e Energia, 2001, “Balanço Energético Nacional”, Brasília.

Oland, C. B., 2002, “Guide to Low Emission Boiler and Combustion Emission Selection”, U.S., Department of Energy, Office of Industrial Technologies.

Petukhov, B. S.; 1970, “Heat Transfer and Friction in turbulent Pipe Flow with Variable Physical Properties”. Adv. Heat Transfer 6, 503 – 565.

Sigal, I.Y.H., 1988, “Atmospheric Protection during Fuel Combustion”, 2nd Ed., Niedra Publishing House, Lenigrad.

Sonntag, Richard E., Borgnakke, Claus, Wylen, Gordon J. Van, 1998, “Fundamentos da Termodinâmica”

Souza, Wilson L., 2004, “Comparações Termo-Energéticas e Econômicas

de Opções de Cogeração de uma Destilaria”, Dissertação de Mestrado, João Pessoa-PB.