



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas  
Gerais

Campus Avançado Arcos  
Bacharelado em Engenharia Mecânica

Geovanne Tavares Faria

Análise de Rendimento Energético da Caldeira  
Alimentada com Bagaço de Cana-de-Açúcar

Arcos - MG

2021

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas  
Gerais

Geovanne Tavares Faria

**Análise de Rendimento Energético da Caldeira  
Alimentada com Bagaço de Cana-de-Açúcar**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio

Arcos - MG

2021

## FICHA CATALOGRÁFICA

Faria, Geovanne Tavares

Análise de Rendimento Energético da Caldeira Alimentada com Bagaço de Cana-de-Açúcar / Geovanne Tavares Faria

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, 2021.

Orientador: Dr. Ricardo Carrasco Carpio.

1. Energia 2. Vapor 3. Caldeira. I. Ricardo Carrasco Carpio. II. Análise do rendimento energético de caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar.

**Geovanne Tavares Faria**

## **Análise de Rendimento Energético da Caldeira Alimentada com Bagaço de Cana-de-Açúcar**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao colegiado do curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 02 de Dezembro de 2021.

### **Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Ricardo Carrasco Carpio  
(Orientador)

Prof. Dr. Francisco de Sousa Júnior  
(Professor)

Júlio Inácio da Silva Fonseca  
(Engenheiro Mecânico - Empresa Raízen)

*Dedico este trabalho, primeiramente a Deus, criador do Universo, e à minha família, pelo amor e apoio incondicional, por acreditar e investir em mim, me dando força e esperança para seguir em frente e, principalmente, pela presença física e espiritual remetendo segurança e certeza de que nunca estive sozinho nessa caminhada.*

## Agradecimentos

Inicialmente, agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades, e aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Ao Professor e orientador Ricardo Carrasco pelo aprendizado, conhecimento e dedicação aplicada, o que muito contribuiu para o êxito da conclusão deste trabalho.

Agradeço também ao IFMG/Arcos, seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, pautado pela confiança, mérito e ética aqui presentes.

Agradeço a todos os professores por compartilhar conhecimento e experiências preciosos do mundo acadêmico, não apenas de forma racional, mas sob a ótica do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional. Pela dedicação incansável e sentimento de missão cumprida na regência da arte de ensinar e aprender. Entendendo-se que o conhecimento não se finda, a palavra “mestre”, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais, sem nominar, terão os meus eternos agradecimentos.

Agradeço aos administradores da usina pesquisada pela confiança e apoio com relação às informações disponibilizadas para o propósito dessa dissertação, principalmente ao engenheiro Júlio Inácio, e também os parabens pela competência e eficiência com que coordenam as atividades da usina.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a minha formação acadêmica, o meu muito obrigado.

## Resumo

No atual cenário global, a corrida pelo desenvolvimento econômico sustentável constitui-se em um dos maiores desafios da humanidade. Neste contexto, a produção e utilização de energia de forma eficiente muito pode contribuir para impactar positivamente no meio ambiente e nas relações econômicas industriais. A biomassa residual tem se destacado como importante alternativa energética no reaproveitamento dos recursos naturais renováveis. Entre as matérias primas mais explorada está o bagaço da cana-de-açúcar que, em usinas termelétricas é utilizado como combustível na geração de energia (térmica/mecânica/elétrica) para a produção de vapor. Dentre os geradores de vapor, em usinas termelétricas destacam-se as caldeiras aquatubulares, as quais são basicamente um trocador de calor que trabalha com pressão superior à atmosférica, produzindo vapor através de energia térmica fornecida por uma fonte quente. Estas caldeiras podem apresentar ainda diversos equipamentos integrados, os quais permitem a obtenção de maior rendimento térmico e de segurança. O presente trabalho apresenta a avaliação da eficiência operacional energética da caldeira aquatubular de uma usina sucroalcooleira, cujo combustível utilizado é o bagaço da cana. Para o cálculo de eficiência da caldeira aplicou-se um princípio de balanço de massa e balanço energético que tem importância considerável a diversos segmentos industriais, no intuito de mensurar os níveis de produção e aproveitamento da energia térmica, além das perdas de calor do processo. Para tal fim, utilizou-se os métodos direto e indireto. Durante o desenvolvimento do trabalho, foi possível detectar deficiências do funcionamento operacional da caldeira através da avaliação dos parâmetros energéticos, e sugerir possíveis melhorias para aumentar a eficiência da mesma. Analisando termodinamicamente o sistema, foi possível definir os índices de desempenho da caldeira desta planta industrial e, verificou-se bom nível de eficiência na produção, geração e distribuição de energia gerada pelo bagaço da cana.

**Palavras-chave:** Energia. Vapor. Caldeira.

## Abstract

In the current global scenario, the race for sustainable economic development constitutes one of the greatest challenges facing humanity. In this context, the production and use of energy efficiently can contribute to positively impact the environment and industrial economic relations. Residual biomass has emerged as an important energy alternative in the reuse of renewable natural resources. Among the most exploited raw materials is sugarcane bagasse which, in thermoelectric plants, is used as fuel in the generation of energy (thermal/mechanical/electrical) for the production of steam. Among the steam generators in thermoelectric power plants, the watertubular boilers stand out, which are basically a heat exchanger that works with pressure higher than atmospheric, producing steam through thermal energy supplied by a hot source. These boilers can also have several integrated equipment, which allow obtaining greater thermal and safety efficiency. The present work presents the evaluation of the operational energetic efficiency of the aquatubular boiler of a sugarcane mill, whose fuel used is sugarcane bagasse. To calculate the boiler efficiency, a mass balance and energy balance principle was applied, which is of considerable importance to several industrial segments, in order to measure the levels of production and use of thermal energy, in addition to the heat losses of the process. For this purpose, the direct and indirect methods were used. During the development of the work, it was possible to detect deficiencies in the operational functioning of the boiler through the evaluation of energy parameters, and to suggest possible improvements to increase its efficiency. Analyzing the system thermodynamically, it was possible to define the boiler performance indexes of this industrial plant, and it was verified a good level of efficiency in the production, generation and distribution of energy generated by sugarcane bagasse.

**Keywords:** Energy. Steam. Boiler.



## Lista de Figuras

1	Ciclo ideal de Rankine . . . . .	16
2	Ciclo ideal x Ciclo real de Rankine . . . . .	17
3	Diagramas esquemáticos de sistemas de cogeração de turbina a vapor . . .	18
4	Usina Sucroalcooleira Raízen . . . . .	19
5	Componentes de uma caldeira flamotubular . . . . .	21
6	Componentes principais de uma caldeira aquatubular . . . . .	23
7	Ciclo de Rankie real . . . . .	28
8	Vantagens e desvantagens dos Métodos Direto e Indireto. . . . .	32
9	Caldeiras da usina Raízen . . . . .	37
10	<i>Layout</i> da caldeira CALDEMA . . . . .	38
11	Distribuição de ar da caldeira CALDEMA - Vista superior . . . . .	39
12	Distribuição de ar e gases de exaustão da caldeira CALDEMA - Vista lateral	40
13	Circulação de água e vapor na caldeira CALDEMA . . . . .	42
14	Diagrama de <i>Sankey</i> das perdas de calor . . . . .	46
15	Gráfico - Eficiência x Perdas de calor . . . . .	47

## Lista de Tabelas

1	Composição química do gás natural . . . . .	24
2	Composição química do óleo combustível usado em caldeiras . . . . .	24
3	Composição química do bagaço . . . . .	25
4	Parâmetros do bagaço . . . . .	25
5	Equações de balanço de massa e energia da caldeira . . . . .	29
6	Balanço de energia térmica na caldeira . . . . .	44
7	Porcentagem das perdas e calor associado. . . . .	46
8	Parâmetros para o balanço de energia na caldeira . . . . .	59
9	Parâmetros para cálculo do rendimento térmico . . . . .	60

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos . . . . .	13
1.1.1	Objetivo Geral . . . . .	13
1.1.2	Objetivos Específicos . . . . .	13
1.2	Justificativa . . . . .	14
1.3	Estrutura do trabalho . . . . .	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	Usinas Termelétricas . . . . .	16
2.2	Usinas Sucroalcooleiras . . . . .	19
2.2.1	Geradores de Vapor . . . . .	20
2.2.1.1	Tipos de caldeiras . . . . .	21
2.2.1.2	Componentes de uma caldeira aquatubular . . . . .	22
2.3	Combustíveis . . . . .	24
2.3.1	Bagaço de cana-de-açúcar . . . . .	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>26</b>
3.1	Estequiometria da combustão . . . . .	27
3.2	Balanco de massa e energia na caldeira para o ciclo Rankine real	27
3.2.1	Análise do rendimento energético . . . . .	29
3.3	Método Direto . . . . .	30
3.4	Método Indireto . . . . .	31
3.4.1	Perdas devido ao calor sensível dos gases secos ( $q_2$ ) . . . . .	33
3.4.2	Perda por umidade do combustível ( $q_3$ ) . . . . .	33

3.4.3	Perdas de calor por radiação e convecção ( $q_4$ ) . . . . .	34
3.4.4	Perdas associadas aos incombustos ( $q_5$ ) . . . . .	34
3.4.5	Perdas associadas aos não contados ( $q_6$ ) . . . . .	35
3.4.6	Perda Total ( $q_{tot}$ ) . . . . .	35
3.5	<b>Taxa de Evaporação e Rendimento Térmico</b> . . . . .	35
3.6	<b>Dados da usina - Estudo de caso</b> . . . . .	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
4.1	Melhorias para o aumento do rendimento térmico e da capacidade de geração de vapor . . . . .	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	52
	Referências . . . . .	53
	Apêndice A - Estequiometria da combustão do bagaço . . . . .	56
	Apêndice B - Balanço de massa e energia na caldeira . . . . .	59
	Apêndice C - Método do Balanço Direto . . . . .	60
	Apêndice D - Método de Balanço Indireto . . . . .	61

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a questão ambiental vem ganhando relevância no desenvolvimento industrial e econômico de cada país. O crescimento econômico com responsabilidade ambiental faz parte da nova ordem mundial. O setor de energia ocupa papel imprescindível nas relações industriais frente à globalização da economia. Dessa forma, aumentou-se significativamente o consumo de energia, sobretudo, a energia a vapor, ocasionando assim, a produção de caldeiras em diferentes escalas de mercado.

Diante de um mercado cada vez mais exigente, a busca por técnicas que garantam a eficiência do sistema de geração de energia através do vapor tem sido um grande desafio para as indústrias brasileiras. Para ajudar no processo de aumento da produção de vapor e reduzir o consumo de combustível nas caldeiras, diferentes técnicas em função das características de produção estão sendo aplicadas, como por exemplo, uma melhor utilização dos insumos à serem queimados, aproveitando assim com maior êxito a energia produzida pela caldeira (ANDRADE, 2014).

Nesse contexto, o país busca ampliar sua matriz energética investindo no uso de energias renováveis e alternativas, como o uso crescente da biomassa a partir da utilização do bagaço da cana de açúcar. A biomassa representa um grande potencial energético para o Brasil, que é tradicionalmente um grande produtor de cana-de-açúcar, uma matéria-prima que pode ser integralmente aproveitada. Além da produção de açúcar, a cana é amplamente utilizada na produção de álcool combustível, e seu bagaço é utilizado como fonte de combustível renovável na geração de energia e age como uma alternativa que contribui para reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Porém, apesar da alta concentração desse recurso energético, os sistemas de geração de vapor enfrentam dificuldades significativas, como o bom uso do combustível, de forma a diminuir o desperdício de energia térmica, e aumentar a eficiência na produção.

Em vista disso, uma forma de conhecer a quantidade do desperdício energético é mediante o cálculo do rendimento térmico dos geradores de vapor. Este parâmetro é de suma importância para unidades industriais, visto que leva em consideração a proporção da transformação da energia do combustível em vapor de processo.

## 1.1 **Objetivos**

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste estudo consiste em avaliar, através de um estudo de caso realizado em uma usina sucroalcooleira, a eficiência térmica de uma caldeira aquatubular de alta capacidade que utiliza o bagaço de cana-de-açúcar como combustível. Utilizou-se ferramentas de balanço de massa e energia, com a finalidade de melhorar o rendimento térmico do gerador de vapor.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre a geração de vapor assim como o estudo de balanço de massa e energia em usinas sucroalcooleiras;
- Compreender o processo de geração de vapor, assim como entender o funcionamento de cada componente da caldeira;
- Levantamento dos principais parâmetros em campo, da caldeira da usina, objeto de estudo, assim como realizar a verificação dos mesmos, com os profissionais que operam a caldeira na Usina;
- Compreender e apresentar o equacionamento do rendimento térmico da caldeira com base nos métodos direto e indireto;
- Avaliar as perdas energéticas do processo de geração de vapor, bem como sugerir a racionalização destas para o aumento do rendimento térmico e da capacidade de geração de vapor.
- Validação dos resultados obtidos com os dados obtidos na usina em estudo.

## 1.2 Justificativa

Nos últimos anos, as questões ambientais têm se tornado cada vez mais importantes no desenvolvimento industrial e econômico do país. O crescimento econômico com responsabilidade ambiental faz parte da nova ordem mundial. No Brasil, essa situação não é diferente. Em virtude do impacto ambiental devido ao uso de combustíveis fósseis (Petróleo, carvão leve, gás natural etc.), o país busca expandir sua base energética investindo no uso de energias renováveis e alternativas, como o uso crescente de biomassa.

A biomassa representa um grande potencial energético para o Brasil, que é tradicionalmente um grande produtor de cana-de-açúcar, uma matéria-prima que pode ser integralmente aproveitada (objeto do presente estudo). Além da produção de açúcar, a cana é amplamente utilizada para a produção de álcool combustível, uma alternativa que contribui para reduzir o consumo de combustíveis fósseis. O Brasil também se beneficia do fato de que domina a matriz energética mais renovável do mundo industrializado. Porém, apesar da alta concentração do recurso energético em referência, os sistemas de geração de vapor precisam garantir o bom uso do combustível, de forma a diminuir o desperdício de energia térmica.

A eficiência térmica de caldeiras aquatubulares pode oscilar entre uma faixa de 80 a 85% (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005). Dessa forma, rendimentos menores evidenciam perdas excessivas de energia, sendo necessária uma correção imediata. Uma eficiência baixa faz com que se queime mais combustível para produzir a mesma quantidade de vapor, tornando todo o processo de geração de vapor mais oneroso e de maior impacto para o meio ambiente.

O presente estudo se justifica, devido a importância de conhecer a quantidade de desperdício energético através do cálculo do rendimento térmico dos geradores de vapor. Este parâmetro é de suma importância para unidades industriais, o qual leva em consideração a proporção da transformação da energia do combustível em vapor de processo. Assim, quanto mais perdas de calor houver, menor será o rendimento térmico e maior o custo de um determinado produto industrializado.

Desde o ponto de vista acadêmico, este projeto contribuirá com futuros trabalhos relacionados a termodinâmica e transferência de calor, pois poderá subsidiar pesquisas relacionadas aos métodos de geração de energia através do vapor e ao cálculo de rendimento térmico de caldeiras.

## 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é apresentado na forma de capítulos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 1 - Introdução: apresenta-se brevemente um conteúdo introdutório do tema, contendo os objetivos gerais e específicos, a justificativa do trabalho e o seu conteúdo através da descrição resumida de capítulos.

Capítulo 2 - Fundamentação teórica: este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos principais temas relacionados à pesquisa: usinas termelétricas e sucroalcooleiras, ciclo termodinâmico (ciclo Rankine), geradores de vapor e seus principais componentes, além dos combustíveis utilizados.

Capítulo 3 - Metodologia: neste capítulo encontra-se a descrição do método de pesquisa utilizado no trabalho, bem como a base para todos os cálculos que foram realizados no mesmo e o estudo de caso realizado em uma usina de cana de açúcar.

Capítulo 4 - Resultados e Discussões: no presente capítulo é realizado uma breve discussão e análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5 - Conclusão e Sugestões para Trabalhos Futuros: finalmente, este capítulo avalia se os objetivos propostos foram alcançados. Assim como apresenta as possíveis melhorias que podem ser implementadas na usina objeto de estudo. Além de oferecer sugestões para trabalhos futuros, que complementem as análises realizadas no presente estudo.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Usinas Termelétricas

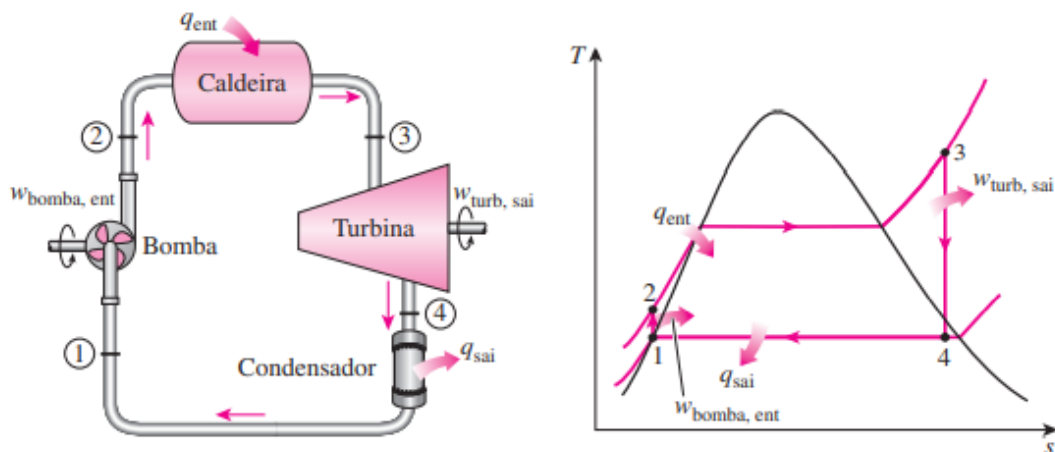
Usina termelétrica é uma instalação industrial que produz energia através da geração de calor, procedente da queima (combustão) de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. Podem também ser classificados como renováveis ou não renováveis.

Geralmente usinas termelétricas utilizam água como fluido de trabalho, desse modo, o calor gerado na combustão do combustível, dentro da caldeira, é utilizado para gerar vapor d'água que ao sair da caldeira, aciona turbinas a vapor acopladas mecanicamente à geradores elétricos, produzindo energia.

De acordo com Corrêa Neto e Ramon (2002), a transformação da energia térmica em energia mecânica, que ocorre em uma central termelétrica, é realizada por diferentes equipamentos cuja construção é baseada em algum dos diversos ciclos termodinâmicos conhecidos. Em relação ao setor sucroalcooleiro, a geração de energia é tradicionalmente realizada através do ciclo ideal de Rankine (Figura 1).

- **Ciclo ideal de Rankine:**

Figura 1: Ciclo ideal de Rankine



Fonte: CENGEL; BOLES (2013)

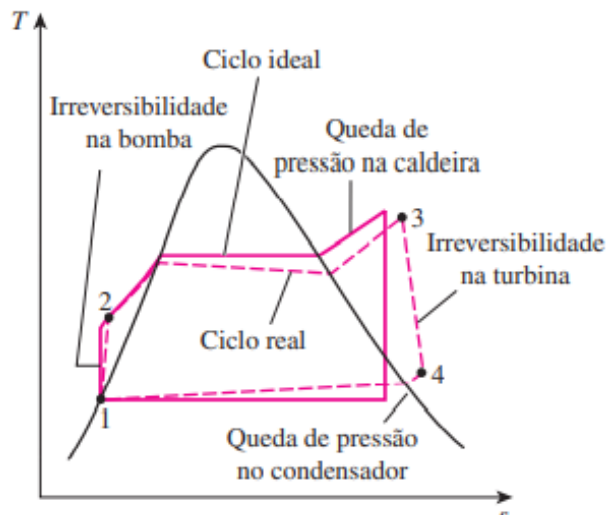
Segundo DINÇER e ZAMFIRESCU (2014), a configuração básica do ciclo de Rankine ideal consiste nos quatro processos seguintes (Figura 1):

- 1-2 → Compressão isentrópica do fluido de trabalho no estado líquido na bomba;
- 2-3 → Fornecimento de calor a pressão constante (caldeira);
- 3-4 → Expansão isentrópica do vapor superaquecido em uma turbina a vapor;
- 4-1 → Condensação do fluido de trabalho até atingir estado líquido (condensador).

Entretanto, de acordo com ÇENGEL (2013) o ciclo real de potência a vapor difere do ciclo de Rankine ideal (Figura 2) por meio das irreversibilidades em vários componentes. As fontes mais comuns de irreversibilidades são o atrito do fluido e a perda de calor para a vizinhança. O atrito do fluido nas tubulações entre os diversos componentes provoca queda de pressão do mesmo na caldeira e no condensador. Assim como a pressão na entrada a turbina a vapor é mais baixa que a pressão na saída da caldeira, devido a queda de pressão nas tubulações de conexão. Já a queda de pressão no condensador é geralmente muito pequena. Assim, para compensar essas quedas de pressão, a água deve ser bombeada até uma pressão suficientemente mais alta do que aquela que o ciclo ideal pede.

A outra fonte importante de irreversibilidade é a perda de calor do vapor para a vizinhança à medida que esse escoar através dos componentes do ciclo. Sendo assim, é necessário transferir mais calor para o vapor da caldeira a fim de compensar essas perdas indesejáveis de calor. Em consequência disso, a eficiência do ciclo diminui (ÇENGEL, 2013).

Figura 2: Ciclo ideal x Ciclo real de Rankine

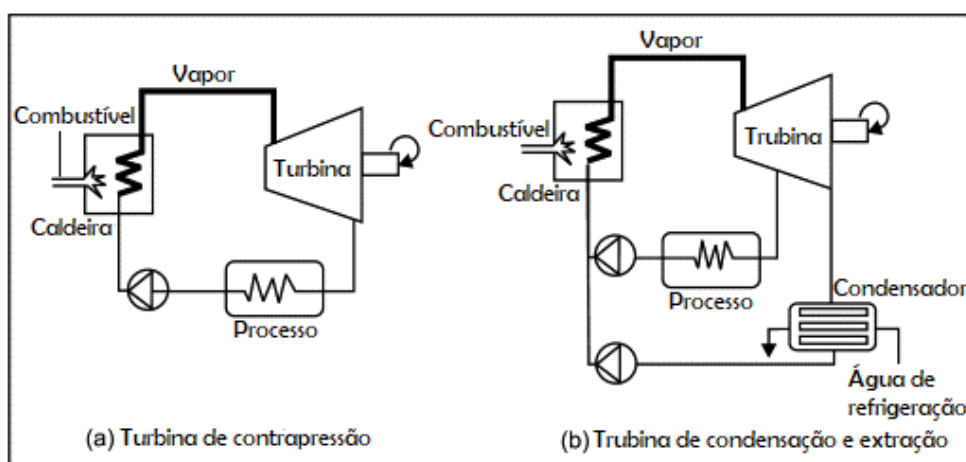


Fonte: CENGEL; BOLES (2013)

Segundo Cremonez (2013), o processo de rejeição de calor em um condensador é o principal ponto onde a cogeração é incluída, pois antes do fluido (vapor) ser retornado ao estado líquido, ele pode ser usado no processo industrial para diversos fins como evaporação, cozimento, secagem entre outras aplicações. Desse modo, existem dois ciclos básicos de cogeração: o ciclo a vapor com turbinas de contrapressão e o ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração.

- **Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão:** o vapor superaquecido entrará na turbina de contrapressão e será despressurizado pela mesma até a pressão desejada para o processo fabril. Neste ciclo o vapor de exaustão das turbinas não é condensado antes de ser utilizado no processo industrial, ou seja, o vapor de exaustão que sai das turbinas é utilizado para suprir as necessidades de calor do processo produtivo, como por exemplo o acionamento mecânico de moendas, bombas e outros equipamentos (Figura 3-a).
- **Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração:** o vapor que entra na turbina de condensação sai sob vácuo e segue para o condensador, onde há troca de calor com água fria, proveniente da torre de resfriamento, onde há condensação do vapor. Posteriormente, o vapor regressa à caldeira em estado líquido (condensado). Assim este ciclo consiste em condensar totalmente ou parcialmente o vapor de exaustão das turbinas para atender às necessidades mecânicas do processo de produção e geração de energia. Esta característica propicia maior flexibilidade no processo produtivo, pois o fluido condensado (estado líquido) também pode ser utilizado em várias etapas da produção, fato este que faz com que a geração termelétrica não seja condicionada apenas ao consumo do vapor (Figura 3-b).

Figura 3: Diagramas esquemáticos de sistemas de cogeração de turbina a vapor



A escolha entre turbina de contrapressão e turbina de extração-condensação depende principalmente das quantidades de energia e calor, e de fatores econômicos. Os pontos de extração de vapor da turbina podem ser mais de um, dependendo dos níveis de temperatura de calor exigidos pelos processos.

Na atualidade, em relação aos novos sistemas de Cogeração, existe a combinação entre os dois tipos de turbina, mas ainda assim, a tecnologia mais utilizada para cogeração no setor sucroalcooleiro brasileiro é a do ciclo a vapor com turbinas de contrapressão.

## 2.2 Usinas Sucroalcooleiras

Uma boa opção para utilização de termelétrica de biomassa atualmente são as usinas sucroalcooleiras (Figura 4). Muitas dessas usinas passaram a gerar sua própria energia, utilizando seus subprodutos como o bagaço de cana de açúcar. Dessa forma, o bagaço, que não teria utilidade e seria descartado, passa a ser aproveitado. Além disso, as usinas conseguem economizar com gastos em energia (geração autossuficiente), vendendo o excedente de energia para as concessionárias de energia, melhorando o abastecimento de energia e diversificando seu portfólio de produtos.

Figura 4: Usina Sucroalcooleira Raízen



**Fonte:** RAÍZEN (2021)

No Brasil, desde a instituição do Proálcool (Programa Brasileiro do Álcool), grande parte das usinas sucroalcooleiras passaram a gerar sua própria energia, através do bagaço da cana de açúcar.

Segundo SOUZA (2003), frequentemente, a geração de excedentes apresenta vantagens comparativas em relação a outros tipos de geração. Souza enumera algumas delas:

- Caracteriza-se pela forma descentralizada (próximo a demanda, podendo atender a sistemas isolados);
- Ocorre em períodos secos, quando a oferta hidrelétrica pode estar baixa; Utiliza combustíveis e equipamentos locais (com baixa influência cambial);
- É relativamente menos agressora ao meio ambiente; O insumo é renovável;
- Os investimentos em capital são relativamente menores;
- Rápida entrada em operação comercial;
- Emprega mão de obra em zona rural;
- Emite menos  $CO_2$ , sendo menos agressora ao meio ambiente;

Como a utilização do bagaço de cana de açúcar para geração de energia é caracterizado como fonte renovável, há possibilidades de receita adicional com a comercialização das Reduções Certificadas de Emissão (RCEs). Isso atrai investimentos para projetos que fazem parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O MDL prevê a redução da emissão de gases de efeito estufa pelos países signatários do protocolo de Kyoto, cujas RCEs podem ser transacionadas (SANCHES, 2003).

As usinas sucroalcooleiras têm contribuído para a redução do efeito estufa, vendendo seus excedentes de energia para as concessionárias de energia. Desta forma, parte da geração de energia fóssil é substituída pela energia renovável.

Conforme FERREIRA *et al.* (2010), em uma usina de açúcar e álcool, a energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho para o acionamento de moendas ou transformada em energia elétrica através de gerador de eletricidade, sendo a energia térmica utilizada como fonte de calor no processo industrial de fabricação de açúcar e/ou álcool.

### 2.2.1 Geradores de Vapor

Geradores de vapor ou caldeiras são equipamentos que utilizam o calor gerado pela combustão de um combustível para transformar a água líquida em saturado ou superaquecido. Os gases quentes procedentes da combustão trocam calor com a água líquida, gerando vapor para uso em muitas atividades industriais, como: movimentação de máquinas e principalmente geração de energia.

### 2.2.1.1 Tipos de caldeiras

Altafini (2002) diz que existem diversos tipos de caldeiras, as quais podem ser classificadas de acordo com diferentes critérios, porém segundo uma classificação mais genérica, as caldeiras se classificam em flamotubulares (fogatubulares) e aquatubulares.

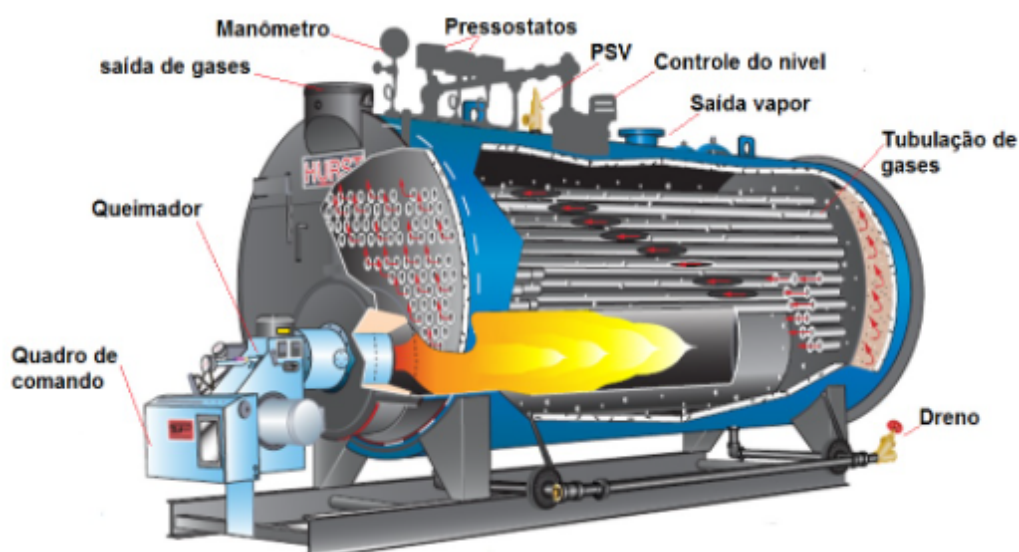
#### Caldeiras Flamotubulares

Uma caldeira flamotubular caracteriza-se pela circulação interna dos gases de combustão através dos tubos no interior da caldeira, os quais ficam envoltos com água e fixados nos espelhos por meio de uma mandrilagem (Figura 5). Esse equipamento é construído para operar com pressões limitadas e pode utilizar diversos tipos de combustíveis. O queimador está localizado na parte frontal da fornalha (BEGA, 2003).

Segundo BIZZO (2003), caldeiras flamotubulares constituem-se da grande maioria das caldeiras, onde os gases de combustão circulam por dentro de tubos, vaporizando a água que fica por fora dos mesmos. São utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar), chegando algumas vezes a 15 ou 20 bar.

Vale ressaltar algumas desvantagens desse tipo de caldeira, tais como: partida lenta devido a grande massa de líquido; dificuldades para instalação de economizador, superaquecedor e pré-aquecedor. Além disso, devido a dificuldade de instalar grelhas para combustíveis sólidos, as caldeiras Flamotubulares utilizam combustíveis líquidos ou gasosos.

Figura 5: Componentes de uma caldeira flamotubular



### Caldeiras Aquatubulares

Em uma caldeira aquatubular, a água no estado líquido passa por tubulações, sendo assim aquecidas pelos gases de combustão provenientes da queima de um combustível, fazendo com que haja a formação de vapor.

Segundo LEME (2005), para a geração de vapor com bagaço de cana, é utilizada caldeira do tipo aquatubular, na qual os gases de combustão escoam por fora dos tubos e o fluido de trabalho por dentro deles.

De acordo com SECAMAQ (2018), as caldeiras aquatubulares possuem também algumas vantagens em relação as flamotubulares, dentre elas: maior produção de vapor; trabalho com altas pressões; trabalho em altas temperaturas; maior variedade nos tipos de combustíveis e possuem uma maior durabilidade na vida útil, comparado a outros tipos de caldeiras, como por exemplo as caldeiras flamotubulares.

Segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005), atualmente, a eficiência térmica ou o rendimento total que pode ser obtido na caldeira do tipo aquatubular supera o correspondente à caldeira do tipo flamotubular. Na primeira tem-se obtido eficiência (usando a norma ASME) de 80% a 85% ou maiores em caldeiras com superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar; na última é impossível superar valores de 75% a 78% nas melhores condições de limpeza.

#### 2.2.1.2 Componentes de uma caldeira aquatubular

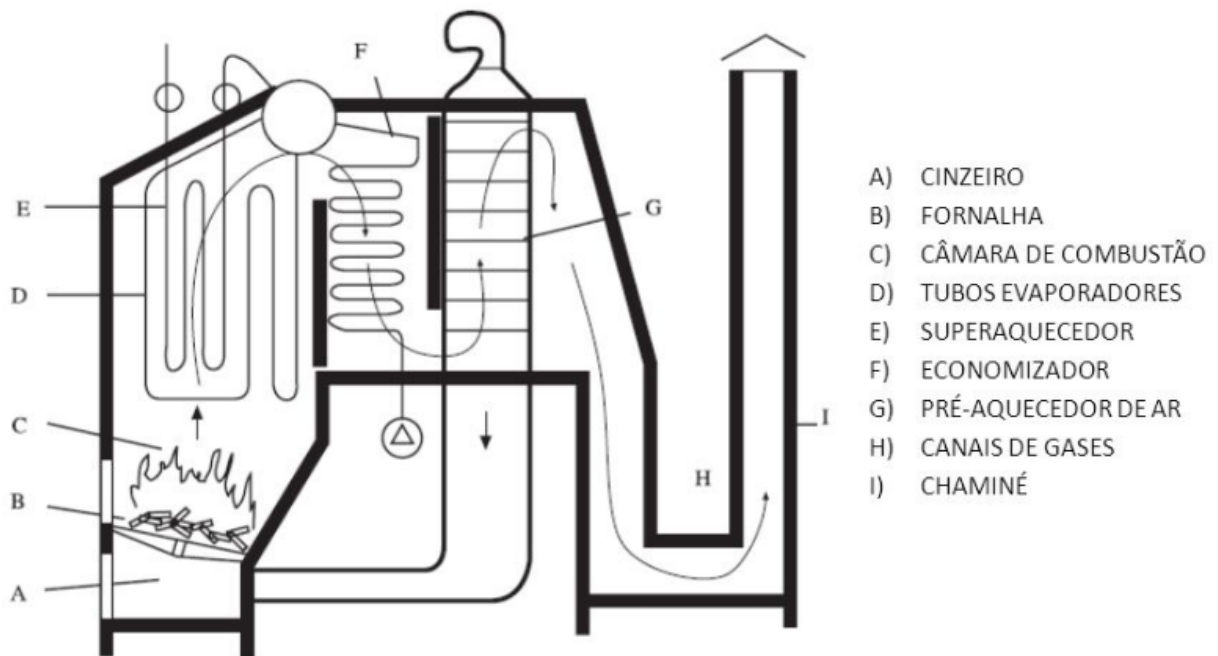
Segundo BAZZO (1995), Stuchi et al. (2015) e Centrais Elétricas Brasileiras (2005), os principais componentes de uma caldeira aquatubular a combustão típica (Figura 6) e suas respectivas funções são:

- **Cinzeiro** - é o local onde se depositam as cinzas e ou, eventualmente, restos de combustíveis não queimados.
- **Fornalha** - é o local onde se inicia o processo de queima seja de combustíveis sólidos (líquidos ou gasosos), e tem como objetivo produzir e fornecer a energia térmica necessária ao processo de vaporização da água na câmara de combustão;
- **Câmara de combustão** - é o local aonde o calor gerado pela fornalha propicia a combustão da biomassa.
- **Tubos evaporadores** - os tubos evaporadores ou paredes d'água, se constituem de diversos tubos dispostos um ao lado do outro, revestindo as paredes da fornalha, e têm a função de receber calor dos gases que se originam no processo de combustão para transformar a água líquida em vapor.



- **Tubulão** - fica na parte superior da caldeira aquatubular e funciona como um reservatório que abriga água tanto no estado líquido quanto no gasoso (vapor);
- **Superaquecedor** - o superaquecedor consiste de um ou mais feixes tubulares, destinados a aumentar a temperatura do vapor saturado gerado na caldeira.
- **Economizador** - consiste em um trocador de calor onde a temperatura da água de alimentação sofre elevação, aproveitando o calor sensível residual dos gases da combustão direcionados à chaminé.
- **Pré-aquecedor de ar** - é um componente que aproveita o calor dos gases de combustão, pré-aquecendo o ar de combustão para introduzi-lo na fornalha.
- **Canais de gases** - são canais que conduzem os gases da combustão até a chaminé.
- **Chaminé** - é a parte que garante a expulsão dos gases de combustão com velocidade e altura determinadas para o ambiente e, indiretamente, promove a boa circulação dos gases quentes da combustão através de todo o sistema pelo chamado de tiragem.

Figura 6: Componentes principais de uma caldeira aquatubular



Fonte: PÊRA (1990)



## 2.3 Combustíveis

Diversos são os tipos de combustíveis utilizados para a queima em caldeiras. Eles podem ser do tipo natural como carvão mineral ou madeira, ou derivados como é o caso do gás natural e óleo, que são os combustíveis mais utilizados para a queima em processos industriais.

O gás natural contém uma mistura de hidrocarbonetos leves, entre os quais se destaca o metano ( $CH_4$ ), que se deposita no subsolo da terra que é gerado através da decomposição da matéria orgânica, além disso o gás natural é uma energia carente de enxofre cuja a composição é mostrada na Tabela 1 (BAZZO, 1995).

Tabela 1: Composição química do gás natural

Elemento	%
Metano ( $CH_4$ )	73
Etano ( $C_2H_6$ )	14
Propano ( $C_3H_8$ )	3
Butano ( $C_4H_{10}$ )	2
Nitrogênio ( $N_2$ )	7
Dióxido de carbono ( $CO_2$ )	1

Fonte: BAZZO (1995)

Já o óleo combustível é obtido a partir do processamento do petróleo, constituindo as frações mais pesadas desse produto. A composição do óleo combustível possui várias derivações e depende do tipo de refino e do petróleo, sendo caracterizado pela grande quantidade de carbono e a presença de enxofre, como verificado na Tabela 2 (BAZZO 1995).

Tabela 2: Composição química do óleo combustível usado em caldeiras

Elemento	%
Carbono ( $C$ )	83
Hirogênio ( $H$ )	10
Enxofre ( $S$ )	6
Outros	1

Fonte: BAZZO (1995)

### 2.3.1 Bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço é um material adquirido a partir da moagem da cana-de-açúcar para a extração do caldo e produção de açúcar e etanol. As usinas sempre aproveitaram parte do bagaço para a produção de bioeletricidade, que a partir da queima desse material em uma caldeira para tornaram autossuficientes (CERQUEIRA, 2010).

A energia gerada através da queima do bagaço nas caldeiras movimentam os equipamentos da usina, e a quantidade excedente pode ser vendida aos distribuidores de energia elétrica. A demanda por bagaço é o principal motor da autossuficiência das usinas sucroalcooleiras brasileiras, pois, mesmo na entressafra, parte do bagaço armazenado é destinado à geração de energia elétrica (SOUZA, 2006).

No estado de São Paulo, em menor escala, porém no restante do país, praticamente todas as indústrias do setor sucroalcooleiro são auto-suficientes em energia elétrica em virtude da grande quantidade de bagaço gerado.

Dentre todos os resíduos da indústria sucroalcooleira, o bagaço da cana-de-açúcar é um dos mais atrativos devido ao seu alto poder calorífico e pela sua composição química (Tabelas 3 e 4), o que o torna a principal fonte energética para a produção de energia elétrica (CORDEIRO, 2008; SOUZA, 2007).

Tabela 3: Composição química do bagaço

Elemento	% Úmido	% Seco
C	23,91	48,30
H	2,94	5,93
O	21,34	43,12
Cinzas	0,1	2,65

Fonte: RAÍZEN

Tabela 4: Parâmetros do bagaço

Parâmetro	UN
Umidade	50,5%
Excesso de ar	30%
PCS	9322 kJ/kg
PCI	7403 kJ/kg
Ar total de combustão	3,719 $kg_{Ar}/kg_{Comb}$

Fonte: RAÍZEN

### 3 METODOLOGIA

Na linha de realização dos objetivos do presente trabalho, a metodologia partiu de uma ampla pesquisa bibliográfica acerca das principais obras, trabalhos e artigos científicos que tratam sobre o tema proposto no presente trabalho, visando obter o máximo de conhecimento possível tanto da parte teórica quanto da parte dos cálculos.

Realizou-se o estudo de caso na caldeira CALDEMA da Usina objeto de estudo. Este gerador de vapor possui capacidade de produção de 250.000 kg/h de vapor, com pressão de trabalho de 67  $Kgf/cm^2$  e temperatura 490 °C.

Este estudo contou com um levantamento dos parâmetros operacionais da usina através de pesquisas de campo realizadas com profissionais que atuam na área de produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana. Foram coletados dados do histórico da caldeira, das grandezas definidas como importantes nesta avaliação energética, das propriedades físico-químicas e poder calorífico da biomassa (bagaço de cana), através de relatórios da empresa, fornecidas pelo engenheiro responsável. Além disso, com base nos registros de operação da caldeira, também foram obtidos os dados experimentais envolvendo as características dos fluxos que entram e saem do gerador de vapor, visto que a Usina possui relatórios técnicos recentes com medições das temperaturas, entalpias e consumo de combustível.

Desse modo, através dessas informações coletadas realizou o balanço energético da caldeira, o qual envolveu o cálculo do rendimento térmico da mesma. Vale ressaltar que este cálculo do rendimento térmico foi realizado utilizando os métodos de balanço direto e indireto.

Por fim, realizou-se uma análise do estudo de caso na caldeira da usina, avaliando as perdas energéticas do processo, e também sugerindo a racionalização destas, além de pontuar possíveis melhorias para o aumento do rendimento térmico e da capacidade de geração da caldeira e a distribuição de energia.

## 3.1 Estequiometria da combustão

A estequiometria da combustão geralmente é feita para minimizar perdas. E para isto, é necessário ter um suprimento adequado de ar, uma mistura ar/combustível apropriada, temperaturas compatíveis e tempo suficiente de combustão.

Reação genérica de combustão:



Para tanto, considera-se a composição elementar, em base mássica do bagaço seco. Assim, o balanço estequiométrico da combustão do bagaço de cana com a quantidade de ar teórico (sem considerar o excesso de ar) pode ser obtida.

Vale ressaltar que, para realizar a combustão é necessária uma quantidade de ar estequiométrica, chamada ar teórico. Entretanto, para assegurar a combustão completa é necessário um 'excesso de ar' de modo a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama. O excesso de ar é fator determinante da eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão.

Desse modo, portanto, calcula-se o excesso de ar e obtém-se uma nova equação balanceada, considerando o excesso de ar (Apêndice A).

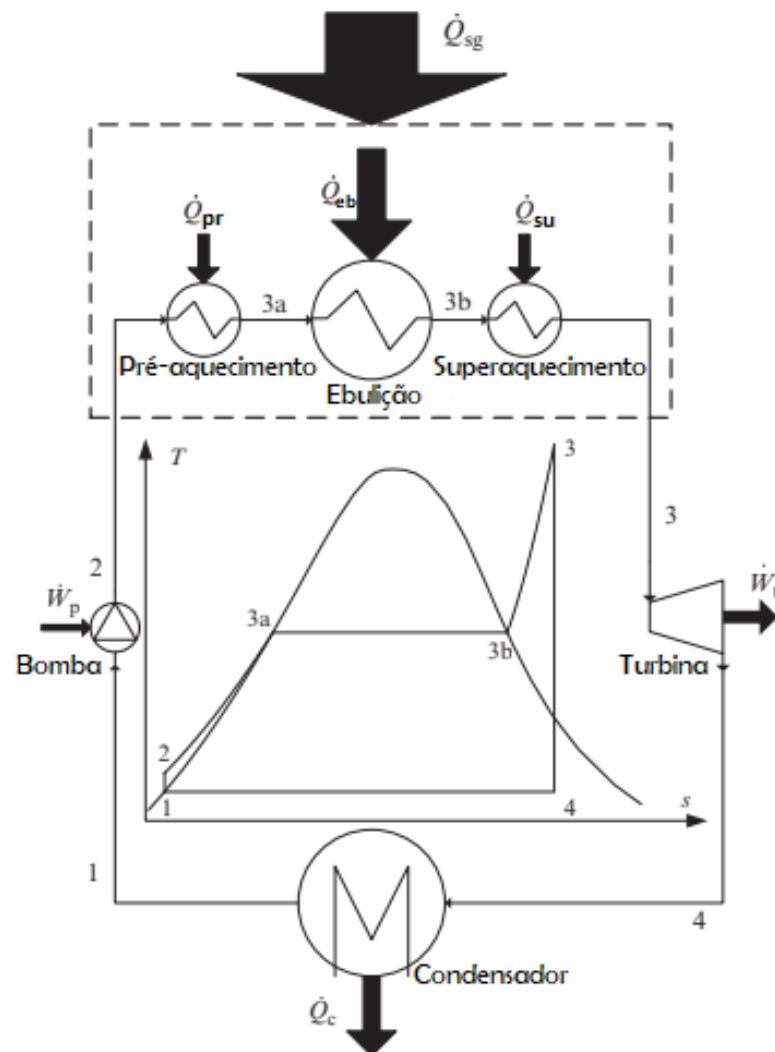
Após a realização do balanço estequiométrico da combustão, a razão ar/combustível (A/C) expressa em base mássica com a quantidade teórica de ar é determinada tomando a razão entre a massa do ar e a massa do combustível.

Entretanto, segundo BIZZO (2003), o teor de umidade de biomassas e combustíveis sólidos em geral é um parâmetro que apresenta maior variabilidade que a composição elementar. Assim é interessante calcular-se a relação A/C estequiométrica na base seca e corrigi-la conforme a umidade presente para se obtê-la na base úmida.

## 3.2 Balanço de massa e energia na caldeira para o ciclo Rankine real

As equações dos balanços de massa e energia, especificamente da caldeira, para o ciclo de Rankine real são dadas na Tabela 5. Para um melhor entendimento, foi analisado os processos do ciclo de Rankine mostrados na Figura 7.

Figura 7: Ciclo de Rankine real



Fonte: DINÇER e ZAMFIRESCU (2014)

Onde:

- $\dot{Q}_{pr}$  = taxa de entrada de calor na seção de pré-aquecimento (kJ/kg);
- $\dot{Q}_{eb}$  = taxa de entrada de calor na seção de ebulição (kJ/kg);
- $\dot{Q}_{su}$  = taxa de entrada de calor na seção superaquecimento (kJ/kg);
- $\dot{Q}_c$  = taxa de saída de calor no condensador (kJ/kg);
- $\dot{W}_p$  = trabalho da bomba (kJ/kg);
- $\dot{W}_t$  = trabalho gerado pela turbina (kJ/kg);

Tabela 5: Equações de balanço de massa e energia da caldeira

Componente		Equações de balanço
Caldeira (2-3)	Pré-aquecimento (2 - 3a)	$MBE : \dot{m}_2 = \dot{m}_{3a} = \dot{m}$ $EBE : \dot{Q}_{pr} = \dot{m}_{3a}(h_{3a} - h_2)$
	Ebulição (3a - 3b)	$MBE : \dot{m}_{3a} = \dot{m}_{3b} = \dot{m}$ $EBE : \dot{Q}_{eb} = \dot{m}(h_{3b} - h_{3a})$
	Superaquecimento (3b - 3)	$MBE : \dot{m}_{3b} = \dot{m}_3 = \dot{m}$ $EBE : \dot{Q}_{su} = \dot{m}(h_3 - h_{3b})$

Fonte: DINÇER e ZAMFIRESCU (2014)

Onde:

- $MBE$  = equação de balanço de massa;
- $EBE$  = equação de balanço de energia;
- $\dot{m}$  = vazão mássica de vapor em cada ponto do ciclo (kg/s);
- $h$  = valor de entalpia em cada ponto do ciclo (kJ/kg);

### 3.2.1 Análise do rendimento energético

O principal parâmetro de desempenho de uma caldeira é a eficiência térmica. Para realizar o cálculo do rendimento energético é necessário determinar a energia envolvida no processo, ou seja, o calor gerado no interior da fornalha, o calor transferido ao fluido de trabalho, o calor associado aos fluxos de massa, a ocorrência de combustão parcial e o calor perdido para o meio ambiente por condução, convecção ou radiação (BAZZO, 1995).

A eficiência ou rendimento térmico de uma caldeira é obtida através da razão entre a energia que realmente é absorvida pela água no interior do equipamento e o consumo de energia contida no combustível. Para isso, existem duas formas de efetuar o cálculo do rendimento energético em geradores de vapor: pelo método direto e pelo método indireto. Vale salientar que o método indireto fornece resultados mais confiáveis pois este considera as devidas perdas de calor durante o processo.

As duas metodologias que serão apresentadas para o cálculo da eficiência da caldeira, baseiam-se na aplicação direta da Primeira Lei da Termodinâmica que é a Lei de Conservação de Energia, e que sugere que para um sistema fechado, a energia que entra é igual a soma da variação da energia interna do sistema com a energia que sai.

### 3.3 Método Direto

A eficiência pelo método direto é dada pelo quociente entre a energia útil, que representa aquela parcela que realmente é absorvida pela água no interior do equipamento, e a energia disponível, que é à energia líquida resultante apenas do processo de combustão. Além disso, de acordo com SOSA (2007) a eficiência através deste método, pode ser avaliada na base PCI e PCS; por meio das equações:

$$\eta = 100 \cdot \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_d} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCI} \quad \text{ou} \quad \eta = 100 \cdot \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCS}$$

- $\dot{q}_u$  = Energia útil (kW);
- $\dot{q}_d$  = Energia disponível(kW);
- $\dot{m}_v$  = Vazão mássica de vapor (kg/s);
- $\dot{m}_{cb}$  = Vazão mássica de combustível (kg/s);
- $h_v$  = Entalpia do vapor (kJ/kg);
- $h_a$  = Entalpia da água de alimentação (kJ/kg);
- $PCI$  = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg bagaço);
- $PCS$  - Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg bagaço).

Vale ressaltar que este método necessita de medições diretas e precisas de todos os fluxos mássicos e parâmetros destes (temperatura e pressão), nas saídas e entradas da caldeira. Entre estas medidas primárias requeridas têm-se:

- Fluxo mássico da água entrando na caldeira;
- Pressão e temperatura das correntes do fluido de trabalho (tais como água de alimentação, vapor de saída);
- Fluxo mássico do combustível.

Este método tem como vantagem a execução mais rápida do cálculo, porém devido as mudanças que podem ocorrer no fluxo de vapor, o método se torna menos confiável. Entretanto, quando a medida de algumas dessas variáveis for imprecisa ou não puder ser obtida, como freqüentemente ocorre, o valor da eficiência pode ser obtido pelo método indireto (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

## 3.4 Método Indireto

Segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005), a eficiência energética de um sistema, de maneira geral, indica o quanto um equipamento real aproxima-se de um comportamento ideal, no qual não existem perdas. Como perdas sempre significam maiores custos, busca-se constantemente minimizar estes valores de energia perdida procurando-se trabalhar com equipamentos de alto rendimento e manter a eficiência em um nível máximo. Desta maneira, a determinação do valor da eficiência é de relevante importância.

O método indireto, ou Método do Balanço de Energia, utiliza a análise das perdas do gerador de vapor para obter o valor da eficiência. Também neste método são necessárias várias medidas, que, da mesma maneira, podem estar associadas a erros.

O cálculo do rendimento pelo método indireto é realizado com base nas perdas de calor no sistema de geração de vapor. Devido que as perdas de calor são menos flutuantes, este método proporciona maior confiabilidade que o método direto (BAZZO, 1995).

Vale salientar que a determinação da eficiência através deste método necessita da identificação e medida de todas as perdas de energia. As medições primárias para a determinação da eficiência da caldeira, neste caso, são:

- Análise química do combustível (determinação de conteúdo de carbono, hidrogênio, nitrogênio);
- Determinação da umidade do bagaço e a presença de cinzas;
- Determinação das temperaturas dos fluxos de ar e dos gases na entrada e na saída da caldeira;
- Presença de não queimados nas cinzas da fornalha.

No entanto, é importante notar que este método de avaliação de perdas pode não produzir valores precisos, porque na verdade é impossível medir e avaliar todas as perdas possíveis de calor e energia com uma precisão razoável, porque nem sempre existem dados ou condições favoráveis para tanto. Como resultado, algumas perdas são insignificantes na ordem de magnitude, porque o esforço para avaliá-las pode não tem muita importância.

Portanto, a maior vantagem desse método é a possibilidade avaliar as perdas mais significativas e fornecer condições e dados para minimizá-las, o que afeta diretamente o desempenho do sistema e o melhor aproveitamento da energia.



Assim, a eficiência térmica, da caldeira, através deste método pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\eta = 100 - \sum \text{Perdas} \quad (1)$$

Onde:

- Perdas: Energia perdida na caldeira (por exemplo, com os gases de exaustão, calor por radiação e convecção, umidade do combustível, combustível não queimado, etc);

As vantagens e desvantagens destes dois métodos, de acordo à norma ASME PTC 4, 1998, são apresentadas na Figura 8.

Figura 8: Vantagens e desvantagens dos Métodos Direto e Indireto.

Vantagens	Desvantagens
<b>Método Direto</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer poucas medições;</li> <li>• Não precisa estimar as perdas não mensuráveis;</li> <li>• Os parâmetros primários desde a definição da eficiência (entradas e saídas) são diretamente mensuráveis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A vazão do combustível, o poder calorífico, a vazão do vapor, e as propriedades do vapor precisam ser medidas com muita precisão para reduzir as incertezas;</li> <li>• Não ajuda a localizar as fontes de possível ineficiência.</li> <li>• Requer o uso do método do balanço de energia para corrigir os resultados dos testes para padronizar ou garantir as condições.</li> </ul>
<b>Método Indireto</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• As medições primárias (análises e temperatura dos gases) podem ser feitas com muita aproximação;</li> <li>• Permite correções dos resultados dos testes para padronizar ou garantir as condições;</li> <li>• A eficiência "as tested" frequentemente tem menor incerteza devido a que as quantidades medidas (perdas) representam apenas uma pequena fração da energia total;</li> <li>• Os efeitos de erros substanciais nas medições secundárias e valores estimados são mínimos;</li> <li>• Fontes de perdas grandes são identificadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requer mais medições;</li> <li>• Não produz automaticamente dados de capacidade e saída;</li> <li>• Algumas perdas são praticamente não mensuráveis e seus valores devem ser estimados.</li> </ul>

Fonte: Norma ASME PTC 4 (1998)

Assim, a eficiência da caldeira ( $\eta$ ) segundo este método é determinada através da seguinte equação:

$$\eta = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

Onde cada termo indica as seguintes perdas de calor:

- $q_2$  = Perdas devido ao calor sensível dos gases secos;
- $q_3$  = Perdas devido a umidade do combustível;
- $q_4$  = Perdas de calor por radiação e convecção;
- $q_5$  = Perdas associadas aos incombustos (combustão parcial ou incompleta);
- $q_6$  = Perdas associadas aos não contados (vazamentos e falta de isolamento térmico);

#### 3.4.1 Perdas devido ao calor sensível dos gases secos ( $q_2$ )

Os gases de exaustão liberados pela chaminé, no meio ambiente, carrega uma grande quantidade de calor gerado pela combustão. A perda de calor sensível está relacionada aos gases secos que saem da chaminé e ao vapor d'água encontrado nesses gases. Desse modo, de acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (2005) a perda associada aos gases secos gerado na combustão pode ser representada por:

$$q_2 = m_{GS} \cdot cp_{ar} \cdot (T_{CH} - T_{Ref})$$

Onde:

- $q_2$  = perdas associadas ao calor sensível nos gases secos de combustão (%);
- $m_{GS}$  = vazão mássica dos gases de combustão, ( $kg/s$ );
- $cp_{ar}$  = calor específico médio do ar entre  $T_{CH}$  e  $T_{Ref}$  ( $kJ/kg^{\circ}C$ ).
- $T_{CH}$  = Temperatura da chaminé ( $^{\circ}C$ );
- $T_{Ref}$  = Temperatura de referência ou ambiente ( $^{\circ}C$ ).

Esta perda corresponde a 6,57% do calor total (dado fornecido pela Usina).

#### 3.4.2 Perda por umidade do combustível ( $q_3$ )

Uma das características fundamentais do bagaço de cana-de-açúcar é o seu poder calorífico, o qual é função do grau de umidade (50%) e do teor de açúcar residual. Como o teor de açúcar é normalmente baixo, tem-se a umidade como principal fator limitante do poder calorífico.

Os problemas da presença de umidade do combustível são a evidente redução no poder calorífico do combustível e a redução na temperatura de combustão devido ao alto calor específico e calor latente de vaporização da água. Além disso, vale ressaltar que é possível reduzir o teor de umidade, através das seguintes soluções:

- A umidade causada pela incidência e chuvas ou alagamentos sobre o combustível, pode ser eliminada por ventilação forçada em tempo seco ou em estufa com temperatura próxima a  $50^{\circ}C$ ;
- A umidade higroscópica, que está presente em uma quantidade de solo coletada e deixada secar ao ar, é de difícil separação, sendo eliminada apenas na queima ou por secagem a temperatura acima de  $110^{\circ}C$ ;
- A umidade pode ser de constituição, quando combinada com sais na forma de cristalização.

Esta perda corresponde a 22,52% do calor total (dado fornecido pela Usina).

### 3.4.3 Perdas de calor por radiação e convecção ( $q_4$ )

A medição das perdas de calor por radiação e convecção, que acontecem pelas laterais das caldeiras, é geralmente difícil, devido às diversas e complexas medições necessárias para sua obtenção. Entretanto, de acordo com GASPAR (2004) esta perda pode ser obtida através da seguinte equação:

$$q_4 = A \cdot U \cdot (T_s - T_a)$$

Onde:

- $A$  = área da superfície ( $m^2$ );
- $U$  = coeficiente global de transmissão de calor ( $W/m^2.K$ );
- $T_s$  = temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ );
- $T_a$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ );

Sendo assim, esta perda corresponde a 0,29% do calor total (dado fornecido pela Usina).

### 3.4.4 Perdas associadas aos incombustos ( $q_5$ )

A perda de calor associada aos incombustos ou combustível sólido não queimado envolve fuligem, escória e combustível que cai da grelha. A perda causada pela fuligem é difícil de medir e sua reinjeção pode aumentar entre 2% a 3% o rendimento do gerador de vapor (BAZZO, 1995).

Esta perda acontece devido a falta e ajuste da curva de combustão da caldeira, inserção de uma quantidade de bagaço maior que a necessária, ao desajuste da relação ar/combustível, a falta ou excesso de ar na combustão ou altas temperaturas. Assim se a ventilação (entrada de ar) é pouca e a tiragem é muita, o ciclo de queima do bagaço dentro da fornalha não é concluído e o mesmo é arrastado pelo exaustor para os dutos até as caixas de fuligem ou acabam caindo da grelha da fornalha.

Dessa forma, perde-se um pouco da eficiência na caldeira e também da eficiência energética dos incombustos ou bagaços não queimados. Esta perda corresponde a 1,3% do calor total (dado fornecido pela Usina).

### 3.4.5 Perdas associadas aos não contados ( $q_6$ )

Estas perdas associadas aos não contados estão relacionadas à perdas de energia devido à vazamentos em alguma tubulação da caldeira, à alguma chaparia danificada, à perda de calor que a caldeira possui e também à falta de isolamento térmico em algumas partes. Esta perda corresponde a 1% do calor total (dado fornecido pela Usina).

### 3.4.6 Perda Total ( $q_{tot}$ )

Finalmente, com a posse dos valores de todas as perdas, calcula-se a perda total ( $q_{Tot}$ ):

$$q_{tot} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6$$

## 3.5 Taxa de Evaporação e Rendimento Térmico

A taxa de evaporação representa a quantidade de vapor gerado por unidade de massa de combustível queimado, e é dada pela equação (BAZZO, 1995):

$$m_v = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{cb}}$$

- $m_v$  = Taxa de evaporação(kg/kg bagaço);
- $\dot{m}_v$  = Vazão mássica de vapor (kg/s);
- $\dot{m}_{cb}$  = Consumo de combustível (kg/s);

Já o rendimento térmico pelo método indireto é dado pela equação:

$$\eta = 100 - q_{Tot} = 100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)$$

## 3.6 Dados da usina - Estudo de caso

O estudo de caso foi realizado na Usina Raízen Energia S.A, localizada no município de Lagoa da Prata (MG), que atua há mais de 20 anos no mercado sucroalcooleiro e se posiciona como uma das maiores fontes de receita do mercado local porque emprega cerca de 600 funcionários locais.

Esta usina tem se concentrado na produção de álcool e açúcar, e no ano de 2021, a produção total se dividiu em 62% de álcool e 38% em açúcar. Estes valores podem variar ano após ano, visto que é levado em consideração o preço de mercado, impostos, inflação, etc.

Em relação a safra, depende da projeção de cada ano e da quantidade de cana que se tem para moer. A média anual vai de 7 a 8 meses de safra. A Usina possui 6 ternos de moenda e a taxa média de moagem para cada safra da usina é de cerca de 583 toneladas de cana-de-açúcar por hora, o que representa mais de 2.55 milhões toneladas de cana moída no final da safra, com uma produção de 3,673 milhões de sacas de açúcar e 78,060 milhões de litros de etanol são produzidos em média.

Entretanto, vale ressaltar que a necessidade de buscar a modernização fabril tornou-se uma excelente oportunidade para diversificação dos produtos, e desse modo, a Usina Raízen adotou a produção autossuficiente de energia, e o excedente é vendido para concessionária de energia. No final da safra em um ano, a energia que é vendida pode chegar até aproximadamente 90,332 MW.

A usina é equipada com duas caldeiras de alta pressão, uma caldeira da CALDEMA com pressão de  $67 \text{ kgf/cm}^2$ , capaz de gerar 250 ton/h de vapor a  $490^\circ\text{C}$ ; e a outra caldeira HPB modelo VS-500/1 com pressão de  $67 \text{ kgf/cm}^2$ , capaz de gerar 200 ton/h de vapor a  $490^\circ\text{C}$  de temperatura (Figura 9).

Desse modo, por tratar-se de uma usina moderna no que diz respeito às tecnologias utilizadas em seu processo, tornou-se proveitosa à realização de um estudo que faça uma análise da realidade de aproveitamento térmico da mesma no processo de geração de energia.

Figura 9: Caldeiras da usina Raízen



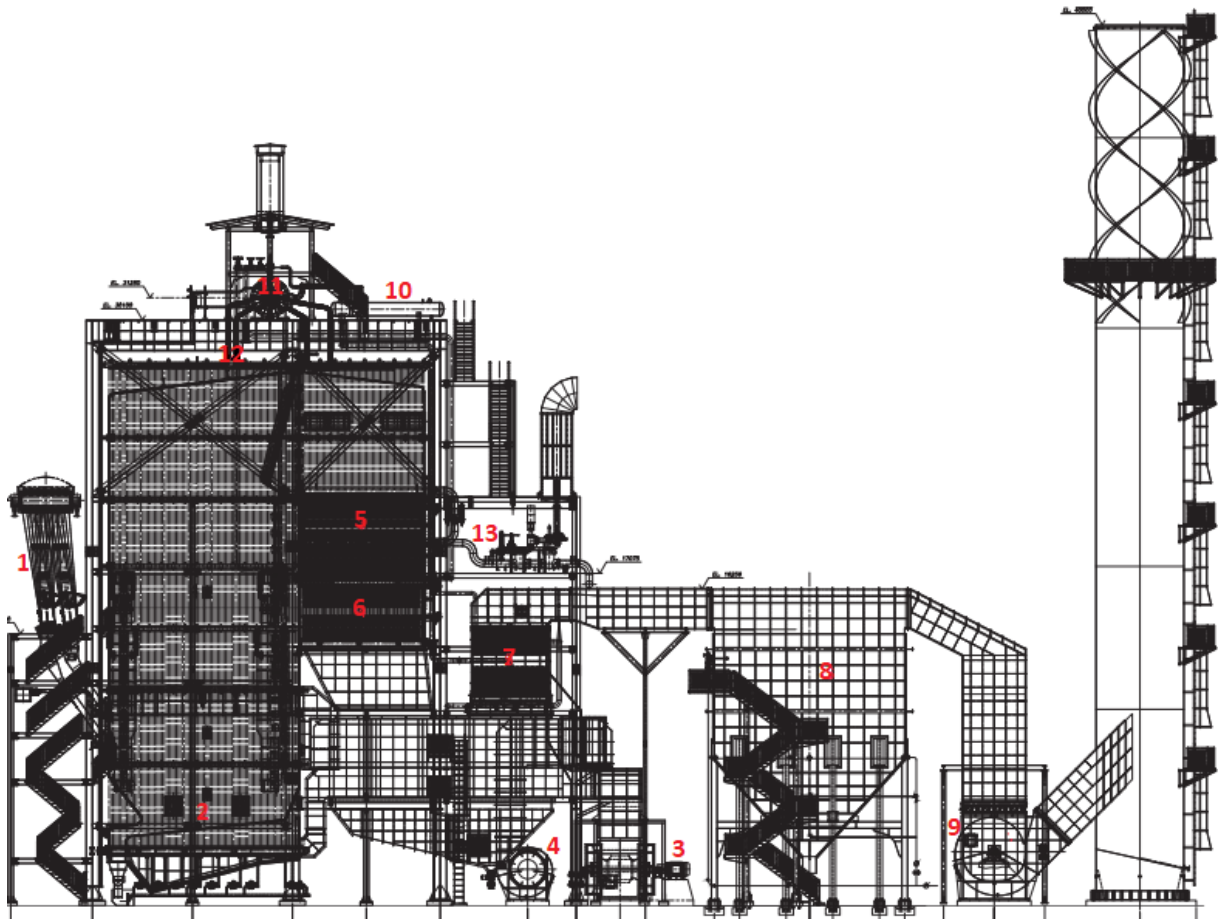
Fonte: RAÍZEN

- **Processo de geração de vapor das caldeiras da Usina Raízen**

Primeiramente, após a colheita, toda a cana é moída nas moendas. Vale ressaltar que, segundo dados da usina, aproximadamente 27% da cana moída é bagaço, ou seja, a cada 100 toneladas de cana moída, 27 toneladas de bagaço são geradas. Ao sair da moenda, o bagaço passa por esteiras de borracha na frente das caldeiras até os dosadores, que fazem a alimentação da caldeira de forma automatizada (Figura 10, ponto 1).

Desse modo, ao ser introduzido na caldeira, o bagaço cairá sobre a grelha da fornalha (Figura 10, ponto 2). Entretanto, para que o bagaço seja distribuído em toda a área da grelha, existe um ventilador expandidor logo abaixo dos dosadores, que realiza esta função.

Ademais, vale ressaltar que a caldeira possui três ventiladores, sendo um primário e dois secundários (Figura 10, pontos 3 e 4 respectivamente). Os ventiladores secundários são responsáveis por introduzir ar quente (devido a passagem em um pré aquecedor de ar) nas laterais da caldeira, e o ventilador primário introduz ar quente na parte inferior da caldeira, por baixo da grelha da fornalha (Figura 11). O ar introduzido pelo ventilador primário faz a suspensão do bagaço, que por sua vez, queima em suspensão. De acordo com dados das caldeiras, 70% do bagaço é queimado em suspensão e 30% na grelha.

Figura 10: *Layout* da caldeira CALDEMA

Fonte: RAÍZEN

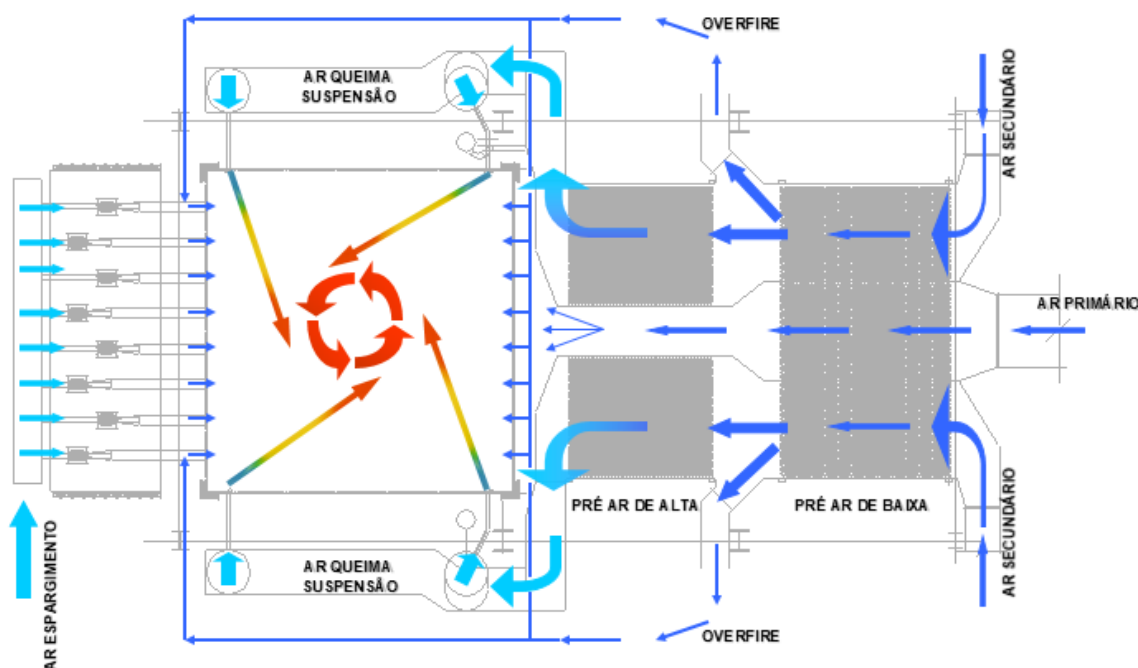
É possível observar e ter uma noção de toda a estrutura e principais componentes de uma caldeira de alta pressão que são mostrados na Figura 10, a qual mostra o *layout* da caldeira CALDEMA, objeto em estudo.

Descrição dos componentes apresentados na Figura 10:

- |                             |                                      |
|-----------------------------|--------------------------------------|
| 1. Esteiras de borracha;    | 8. Lavador de gases;                 |
| 2. Grelha da fornalha;      | 9. Exaustor de tiragem de combustão; |
| 3. Ventilador I;            | 10. Condensador;                     |
| 4. Ventiladores II;         | 11. Tubulão;                         |
| 5. Seperaquecedores I e II; | 12. Coletores de água;               |
| 6. Evaporadores I e II;     | 13. Saída do vapor.                  |
| 7. Economizadores I e II;   |                                      |

Por outro lado, o ar proveniente dos ventiladores secundários, nas laterais da caldeira, são introduzidos na fornalha através de bicos de ar posicionados estrategicamente de modo que a direção do ar faça um ciclone do bagaço em suspensão para obter uma queima balanceada, queimando também aquele bagaço que não conseguiu queimar em suspensão, ou não queimados (Figura 11).

Figura 11: Distribuição de ar da caldeira CALDEMA - Vista superior



Fonte: RAÍZEN

A combustão do bagaço é controlada de forma automática, e de acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (2005), tem o objetivo de controlar três principais grandezas:

- o consumo de combustível;
- o consumo de ar para a combustão;
- a extração, através da exaustão dos gases formados.

O controle destas três grandezas visam:

- Manter o suprimento de calor da fonte supridora (fornalha), de acordo com a demanda do processo;
- Assegurar um mínimo de consumo de combustível para atingir as condições propostas, ou seja, alcançar a máxima eficiência;
- Manter as condições de operação da fornalha dentro de parâmetros satisfatórios.

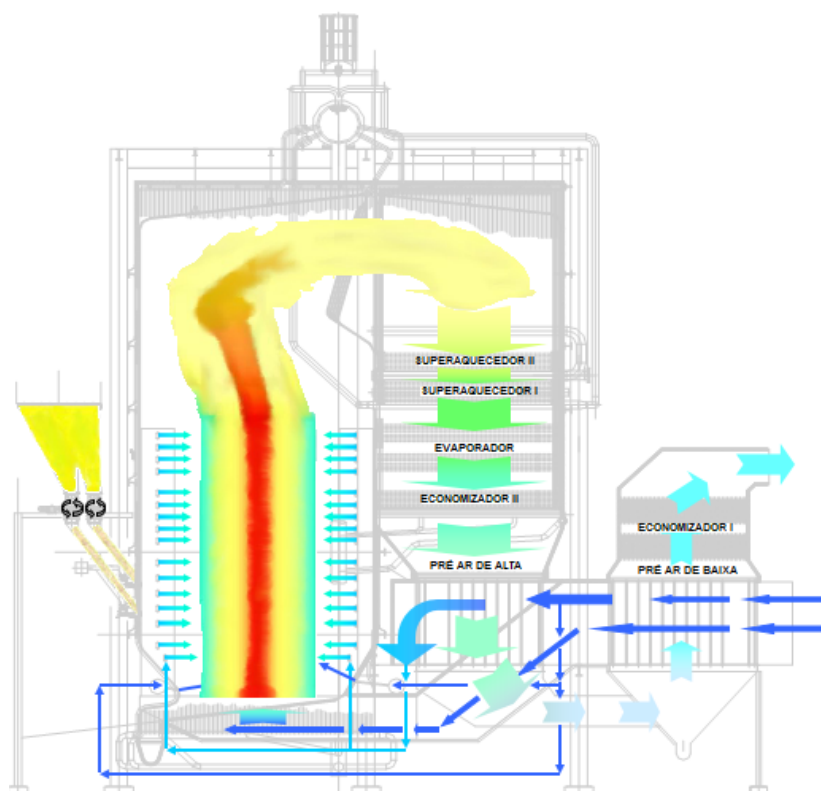


A quantidade de combustível se ajusta com a pressão da caldeira, de modo que uma queda na pressão significa falta de combustível e excesso significa combustível a mais. Portanto, a regulação da pressão de forma a mantê-la dentro dos limites fixados na operação implica necessariamente modificação do suprimento de combustível (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

Ademais, a intervenção na fonte de calor determina a modificação do volume de ar necessário para sua queima, dentro dos parâmetros compatíveis com uma combustão completa. Esta variação provocada na formação de gases de combustão deve ser monitorada por uma ação paralela que garanta a sua extração completa, para assegurar uma pressão definida na câmara de combustão da caldeira (Centrais Elétricas Brasileiras, 2005).

A queima do bagaço libera gases de combustão dentro da fornalha, que por sua vez, passam nas serpentinas (tubos) do superaquecedor primário e secundário (Figura 10, ponto 5), nas serpentinas do evaporador primário e secundário (Figura 10, ponto 6), nas serpentinas do economizador primário e secundário (Figura 10, ponto 7) e por fim são destinados ao lavador de gases (Figura 10, ponto 8). Em seguida, um exaustor de tiragem de combustão (Figura 10, ponto 9) encaminha os gases do lavador de gases para a chaminé, conforme demonstrado na Figura 12.

Figura 12: Distribuição de ar e gases de exaustão da caldeira CALDEMA - Vista lateral



Fonte: RAÍZEN

Em relação a água de alimentação das caldeiras, esta deve ser desmineralizada e 100% pura, e para isto é necessário passar por um desaerador, que é responsável pela remoção de oxigênio e outros gases dissolvidos na água de alimentação para os geradores de vapor, e também faz parte do sistema de aquecimento de água de alimentação.

Desse modo, dentro deste desaerador a temperatura da água é elevada de  $32^{\circ}C$  para  $120^{\circ}C$ . Também vale ressaltar que a água não está em ebulição devido a pressurização que a mesma está submetida. Assim, a água passa pela bomba de alimentação e é bombeada para a caldeira com uma pressão de  $110\text{ Kgf/cm}^2$ .

Logo de início, a água passa pelo economizador, que é um trocador de calor com 52 serpentinas divididas em 6 passos, e recebe calor dos gases de combustão vindos da fornalha, aumentando sua temperatura de  $120^{\circ}C$  para  $180^{\circ}C$  (Figura 13).

Este processo de pré aquecer a água é essencial para aumentar a eficiência na caldeira, visto que a água chegará com temperatura elevada no tubulão, e assim, gastará menos combustível (bagaço) para transformá-la do estado líquido para o gasoso (vapor), ou seja, quanto mais quente a água chegar, menos bagaço será gasto para transformá-la em vapor.

Entretanto, esta caldeira da usina possui um diferencial, visto que após passar pelo economizador, a água ainda passa por um condensador (Figura 10, ponto 10) antes de chegar até o tubulão (Figura 10, ponto 11). Este condensador também é um trocador de calor com serpentinas, que recebe um vapor saturado de  $320^{\circ}C$  proveniente do tubulão, que por sua vez é condensado para auxiliar no equilíbrio da temperatura do vapor mais adiante. A água que entra no condensador com aproximadamente  $180^{\circ}C$ , sai com temperatura de  $210^{\circ}C$  em direção ao tubulão.

No tubulão, a pressão é de  $74\text{ Kgf/cm}^2$  e a água chega com aproximadamente  $210^{\circ}C$ . O nível do tubulão fica próximo à 50% de água e 50% de vapor. A distribuição de água é feita através de coletores (Figura 10, ponto 12), que mandam a água para as paredes d'água (tubos evaporadores), e percorre o caminho de baixo para cima, transformando-se em vapor (Figura 13).

Os modos de transferência de calor dentro da câmara de combustão são por radiação da chama em contato com a parte externa dos tubos evaporadores, e também por convecção dos gases quentes provenientes da combustão do bagaço. A água começa a virar vapor em uma altura de aproximadamente 60% da altura total da parede d'água, que corresponde a mesma altura da chama da fornalha, que varia em uma faixa de 12 a 14 metros e pode chegar a temperatura de até  $900^{\circ}C$ .

O vapor saturado, gerado nas paredes d'água, retorna para o tubulão e se direciona para o superaquecedor (Figura 13). O superaquecedor também é um trocador de calor com serpentinas, por onde passa o vapor saturado, que troca calor com os gases de combustão do bagaço. O vapor entra no superaquecedor com aproximadamente  $340^{\circ}\text{C}$  e sai a uma temperatura de  $490^{\circ}\text{C}$  (Figura 10, ponto 13).

Entretanto, para manter a temperatura do vapor equilibrada utiliza-se um mecanismo automático o qual aproveita o condensado vindo do condensador, conforme mencionado anteriormente, pulverizando-o no vapor superaquecido para mantê-lo na temperatura de  $490^{\circ}\text{C}$ . Vale salientar que é necessário manter o vapor superaquecido a temperatura de  $490^{\circ}\text{C}$  para obter uma eficiência maior nas turbinas visto que, as turbinas existentes suportam vapor até esta temperatura.

Figura 13: Circulação de água e vapor na caldeira CALDEMA



**Fonte:** RAÍZEN

Atualmente existem três turbinas a vapor na usina, sendo duas de contrapressão e uma de condensação. Destas turbinas, duas são de 25MW e uma de 40MW, e todas possuem 12 estágios. Desse modo, vale ressaltar que, o vapor gerado passa pelas turbinas de contrapressão, reduzindo a pressão de  $67 \text{ Kgf/cm}^2$  para  $21 \text{ Kgf/cm}^2$  e é utilizado na moenda. Por outro lado, o vapor gerado que passa pela turbina de condensação é reduzido de  $67 \text{ Kgf/cm}^2$  para  $1,5 \text{ Kgf/cm}^2$  e é utilizado na fabricação de açúcar.

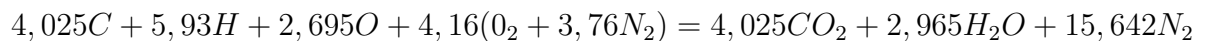
Finalmente, vale salientar que para gerar 1MW de energia é necessário 5,68 ton. de vapor, ou seja, se a geração total de vapor na usina é de 450 ton/h, são gerados então aproximadamente 79,2MW de energia a cada hora.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

- **Estequiometria da combustão:**

Nos cálculos estequiométricos para determinação da necessidade de ar de combustão considera-se que a água presente como umidade não participa das reações. A água (umidade) pode ser incluída na composição inicial do combustível e também considerada como produto da combustão, ou pode ser excluída da composição inicial e adicionada posteriormente para o cálculo da relação ar/combustível (A/C) na base úmida. No entanto, não se exclui a água formada devido à combustão do hidrogênio (H) presente no combustível. Qualquer uma destas situações descritas é útil, contanto que seja corretamente aplicada (BIZZO, 2003).

Para tanto, considerou-se a composição elementar, em base mássica do bagaço seco (Apêndice A). Assim, o balanço estequiométrico da combustão do bagaço de cana com a quantidade de ar teórico (sem considerar o excesso de ar) obtido foi:

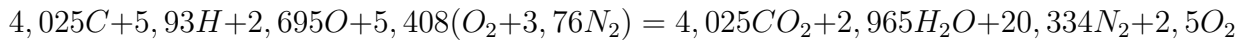


- **Excesso de ar:**

O excesso de ar também é um outro ponto que cabe discussão visto que se trata de um fator determinante na eficiência da combustão, assegurando a combustão completa do combustível através do controle do volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Desse modo, verifica-se que o excesso de ar é necessário para a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama. Portanto, um grande excesso de ar é indesejável, pois diminui a temperatura e o comprimento da chama e assim, aumenta as perdas de calor. Por outro lado, um baixo excesso de ar pode ocasionar uma combustão incompleta e na formação de CO, formar fuligem e fumaça, além de propiciar a acumulação de combustível não queimado, acarretando risco até de explosão.

Ademais, vale salientar que a umidade do bagaço de cana afeta diretamente a quantidade do excesso de ar que entra na caldeira visto que, quanto maior for a umidade do bagaço, maior será a quantidade de ar em excesso.

Por fim, considerando o excesso de ar na combustão do bagaço da usina, que é de 30% (Apêndice A), obteve-se a seguinte equação da combustão:



- **Razão Ar/Combustível:**

O resultado encontrado da razão Ar/Combustível na base seca,  $3,719 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb}$ , significa que são necessários 3,719 kg de ar para queimar cada 1 kg de bagaço de cana. Este valor é elevado devido a umidade presente no bagaço, que segundo Centrais Elétricas Brasileiras (2005), deveria ser em torno de  $2,95 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb}$  para bagaço com umidade típica de 50%.

Ademais, de acordo com Centrais Elétricas Brasileiras (2005), é interessante ressaltar que a umidade e o teor de cinzas afetam diretamente a relação ar/combustível estequiométrica, visto que a parcela do combustível que efetivamente reage é menor quando uma parte de seu peso corresponde à água ou a outros materiais que não vão reagir com o oxigênio. Como um exemplo, um kg de bagaço de cana com 50% de umidade consome apenas a metade do ar requerido pela mesma massa de bagaço seco, que corresponde a  $1,82 \text{ Kg}_{ar}/\text{Kg}_{comb}$ , na base úmida (Apêndice A).

- **Balanco de massa e energia na caldeira**

Os resultados obtidos do balanço de energia térmica na caldeira, de acordo com a Figura 8, foram dispostos na Tabela 6 (Apêndice B).

Tabela 6: Balanço de energia térmica na caldeira

Componentes	Energia (kW)
Pré-aquecimento ( $\dot{Q}_{pr}$ )	20,772
Ebulição ( $\dot{Q}_{eb}$ )	96,507
Superaquecimento ( $\dot{Q}_{su}$ )	17,792

Fonte: RAÍZEN

Analisando os resultados, verificou-se que a maior quantidade de energia térmica introduzida foi justamente no processo de Ebulição, e o valor total de energia térmica do ciclo é de  $\dot{Q}_{Tot} = 135,251 \text{ kW}$  (Apêndice B).

Ademais, vale ressaltar que estes resultados obtidos foram baseados no fluxo de vapor gerado pela caldeira em estudo, que foi de  $47,22 \text{ kg/s}$ . Entretanto, é importante salientar que em caldeiras de alta pressão pode existir pequenas perdas de massa, onde o fluxo de vapor gerado seja menor que o fluxo de água de alimentação.

No caso desta caldeira em estudo, esta perda está em uma faixa de 3 a 5%, ou seja, se o dado coletado do fluxo de vapor gerado foi de 47,22 kg/s, portanto o fluxo de água de alimentação teria um valor aproximado de 49,15 kg/s.

- **Eficiência térmica através dos métodos Direto e Indireto**

Os rendimentos térmicos obtidos através do equacionamento do método direto considerando o PCI e o PCS do bagaço de cana foram, respectivamente, 86% e 68,2%. Entretanto, vale ressaltar que é considerado o valor alcançado através do PCS, pois neste estão inseridas as perdas de calor na caldeira, 68,2%. Ademais, vale ressaltar que o cálculo de eficiência energética através deste método levou em consideração a quantidade de energia fornecida ao sistema através da alimentação do gerador de vapor por bagaço de cana, e que todos os dados foram obtidos de relatórios da usina Raízen (Apêndice C).

Por outro lado, o cálculo de eficiência energética através o método indireto levou em consideração respectivas perdas de calor calculadas anteriormente. Assim sendo, o valor do rendimento térmico obtido através do método indireto foi e 68,32%. Vale ressaltar que todos estes resultados foram baseados nos dados obtidos pela usina Raízen (Apêndice D).

Desse modo, a proximidade dos resultados finais obtidos por ambos os métodos evidencia que, guardadas as proporções, e mesmo com as vantagens e desvantagens de um para com o outro, é possível basear-se em ambos para conseguir o rendimento térmico de uma caldeira.

Finalmente, os valores de eficiência obtidos através dos cálculos foram comparados com os valores de eficiência da Usina. Assim verificou-se uma semelhança entre ambos visto que, os últimos dois valores de eficiência apresentados em relatórios da Usina foram 64,2% e 68,3%. Desse modo foi realizada a validação dos resultados obtidos com os dados fornecidos pela Usina em estudo. Vale ressaltar que estes valores variam devido a vários fatores, principalmente pelo fato de que a composição química e a umidade do bagaço não são constantes e também oscilam.

- **Perdas:**

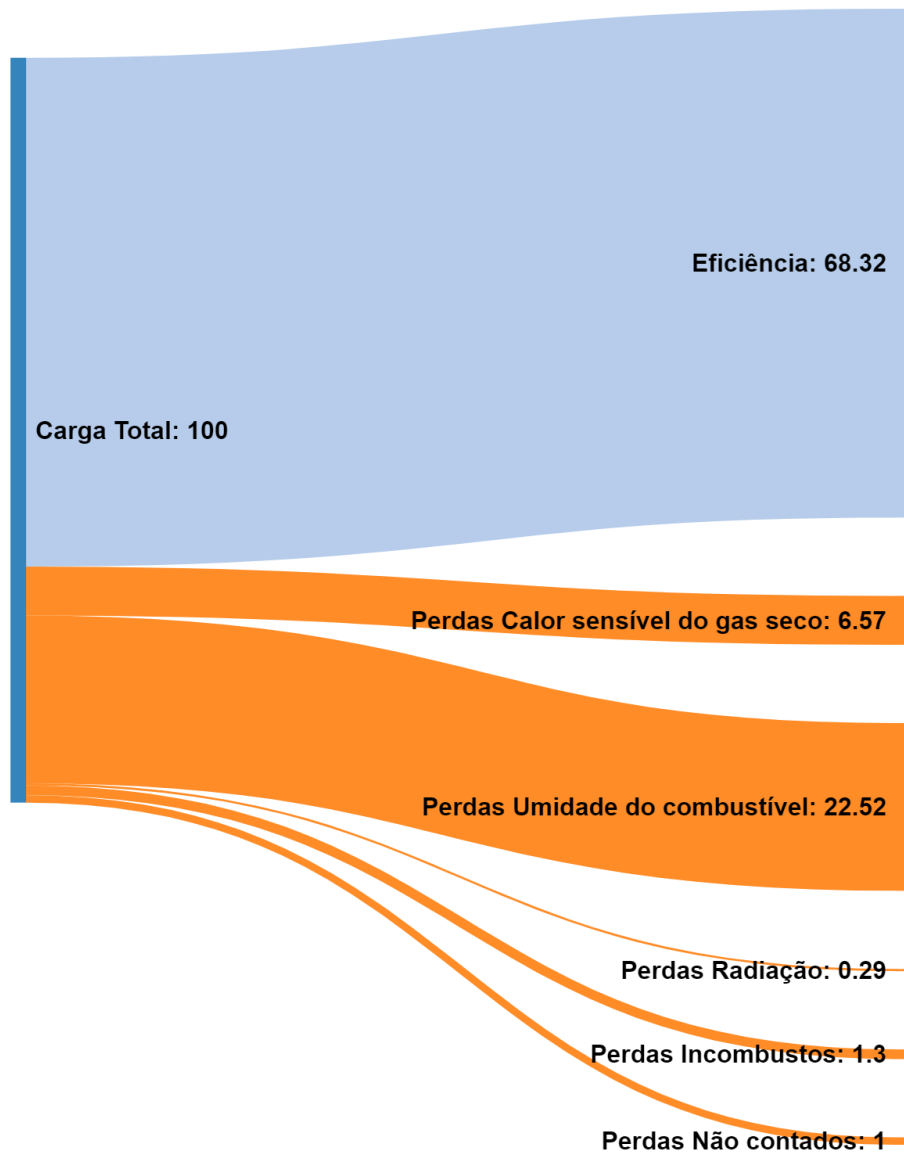
A Tabela 7 representa o resultado da porcentagem de cada perda de calor do processo e seus respectivos valores.

Ademais, é representada a contribuição de cada tipo de perda com relação às perdas totais do sistema de geração de vapor através do Diagrama de *Sankey* e do gráfico de pizza nas Figuras 14 e 15, respectivamente.

Tabela 7: Percentagem das perdas e calor associado.

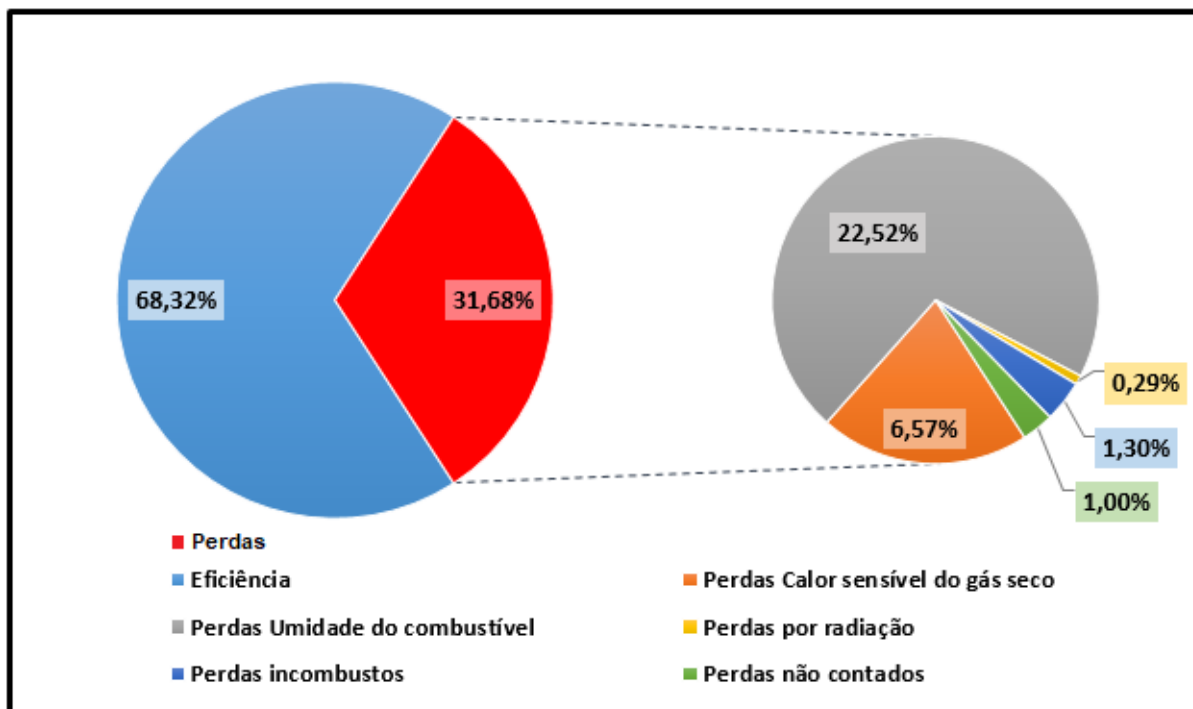
Tipos de perdas	Perdas %	Calor perdido (kJ/kg)
Gases secos ( $q_2$ )	6,57	$47,557.10^6$
Umidade do comb. ( $q_3$ )	22,52	$163,013.10^6$
Radiação ( $q_4$ )	0,29	$2,099.10^6$
Incombustos ( $q_5$ )	1,30	$10,857.10^6$
Não contados ( $q_6$ )	1,00	$7,238.10^6$

Fonte: RAÍZEN

Figura 14: Diagrama de *Sankey* das perdas de calor

Fonte: Próprio autor

Figura 15: Gráfico - Eficiência x Perdas de calor



Fonte: Próprio autor

Os resultados apresentam uma considerável variação, de modo que as maiores perdas ocorrem devido a umidade do bagaço, valor este bastante elevado com relação às outras perdas.

A representação gráfica demonstra que as perdas pelos gases secos são responsáveis por 6,57% das perdas totais, as perdas devido a umidade do combustível por 22,52%, as perdas por radiação por 0,29%, as perdas por incombustos por 1,30% e as perdas associadas aos não contados por 1,00%.

#### • Racionalização das perdas:

De acordo com os resultados das perdas, verificou-se que a perda de calor mais significativa e que mais impactou no processo foi devido a umidade do bagaço. Sendo assim, buscou-se possíveis sugestões para tentar amenizar e racionalizar esta perda.

Primeiramente, a realização de um bom estudo e planejamento visando obter um plantio e colheita mais adequados da cana pode ser válido visto que, geralmente, alguns fatores influenciam na umidade, tais como a frequência de chuvas na região, qualidade do solo e as impurezas e pedaços de terra que são arrastados juntamente com a cana.



Por outro lado, vale ressaltar que a adição de mais um terno na moenda pode ajudar a diminuir a umidade do bagaço, uma vez que, quanto mais caldo extraído da cana, consequentemente menos úmido será o bagaço. Esta ideia pode contribuir para aumentar a eficiência da caldeira, entretanto, é necessário realizar o cálculo de viabilidade técnica econômica deste projeto.

Por fim, vale salientar que a utilização de secadores pneumáticos para realizar a secagem do bagaço de cana, antes deste ser introduzido na caldeira, também poderia ajudar a aumentar a eficiência da caldeira além de reduzir a poluição do ar e a demanda do ar na fornalha. Entretanto, assim como a adição do terno na moenda, é necessário fazer uma análise de viabilidade técnica econômica para este projeto.

As propostas apresentadas são de suma importância visto que, o poder calorífico do bagaço torna-se maior à medida que o teor de umidade se reduz, especialmente em virtude de uma menor necessidade de calor para vaporizar a água. Desse modo, de acordo com pesquisas realizadas com profissionais do ramo, verificou-se que o meio mais eficiente de remover a água do bagaço, é mecanicamente através de uma prensa ou na moenda, com adição de mais um terno.

- **Manutenção em caldeiras:**

Por outro lado, vale destacar que muitas destas perdas térmicas existentes na caldeira estão associadas com a manutenção da mesma, e esta parte está relacionada diretamente com a Engenharia Mecânica visto que, é função do engenheiro mecânico criar e controlar um plano de manutenção para o equipamento em questão.

De acordo com informações da usina, durante a safra uma equipe específica realiza inspeções semanais e manutenções corretivas na caldeira visto que problemas e falhas de operação podem acontecer a todo momento, sendo necessário a reparação imediata do mesmo. Além disso, a cada 1,5 mês (aproximadamente 45 dias) a caldeira é desativada para a realização da manutenção preventiva e dos apontamentos obtidos nas inspeções semanais que não foram possíveis ser realizados com a caldeira em operação.

Entretanto, vale salientar que esta parada da caldeira dura no máximo 24 horas, ou seja, todos os reparos necessários devem ser realizados durante este prazo de tempo, pois em seguida a caldeira voltará a operar. Atualmente, existem 2 equipes totalizando 30 operadores para efetuar estas manutenções, porém em casos críticos e/ou específicos que o serviço a ser realizado demanda mais mão-de-obra, a usina contrata uma equipe terceirizada.

Assim, em todo o período entre safras, são realizadas inspeções preditivas onde são feitas medidas de espessura de chapas, análises do desgaste por tempo e vida útil dos componentes da caldeira. Desse modo, tudo que for apontado e necessário realizar reparo ou troca, nestas inspeções, é feito no mesmo instante. Geralmente, os componentes que precisam de manutenção são os dutos e o lavador de gases. Assim sendo, cabe levantar a seguinte questão: porque realizar a manutenção de caldeiras?

Evitar paradas não programadas pode ser o ponto inicial para esta resposta visto que, é importante levar em consideração que uma parada não planejada devido a presença de algum tipo de problema em uma caldeira, irá ocasionar um prejuízo enorme, ao passo que na manutenção programada é possível elaborar um planejamento para que a paralização não impacte a produção da empresa, reduzindo os custos de manutenção.

Outro ponto que deve ser ressaltado é o alto custo do equipamento, pois os investimentos disponibilizados para a aquisição de bons equipamentos de caldeiraria, geralmente são altos, e dessa forma a manutenção adequada das caldeiras garante uma longa vida útil ao equipamento, evitando assim, prejuízos e a necessidade de investir em um novo equipamento que precisou ser substituído antes do previsto devido a falta de manutenção.

Ademais, o aspecto de segurança também é muito importante para a realização da manutenção de caldeiras visto que, como as caldeiras são equipamentos que operam em altas temperaturas e pressão, logo, acidentes que envolvam este equipamento podem ocasionar muitos danos e até vítimas fatais. Desse modo, com o intuito de evitar acidentes, vale salientar que as caldeiras são projetadas com diversos dispositivos de segurança, entretanto é importante que eles estejam revisados, operantes e com a manutenção em dia.

Arelado a isso, existe o prejuízo material, que está relacionado com a falta ou manutenção ineficiente das caldeiras. Isto pode proporcionar enormes prejuízos a empresa, tais como a obrigatoriedade de arcar com todos os custos médicos, indenizações de vítimas de acidentes envolvendo estes equipamentos, e a empresa ainda pode receber sanções do Ministério do Trabalho e da Justiça do Trabalho.

Desse modo, para evitar problemas é imprescindível que se faça uma eficiente manutenção de caldeiras baseada na NR-13 (Norma Regulamentadora para Caldeiras e Vasos de Pressão), que logo no seu início estabelece:

“Estabelece requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de caldeiras a vapor, vasos de pressão e suas tubulações de interligação nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores.”

A partir disso, é função dos engenheiros da usina, elaborar um plano de manutenção de caldeiras, no qual devem ser descritos a periodicidade de manutenções, definição de instrumentos e sistemas de controle, além da atribuição de profissionais com competência legal para executar este tipo de atividade. Ademais, vale ressaltar que é necessário aplicar um treinamento específico sobre a aplicação da NR-13 para estes profissionais, bem como realizar cursos de reciclagem periodicamente.

Sendo assim, vale ressaltar que a realização de inspeções e manutenções em caldeiras necessitam de alguns procedimentos importantes, principalmente em alguns pontos críticos do processo, tais como: seguir todas as recomendações da NR 13; realizar inspeções dos cruzamentos de solda da fornalha; realizar a inspeção de toda a fiação elétrica e fazer a manutenção do quadro elétrico; verificar o sistema de alimentação de água; inspecionar a saída de vapor; inspecionar e calibrar todos os dispositivos de segurança (válvula de segurança, manômetros, pressostatos, controladores de nível, indicadores de temperatura de gases da chaminé); analisar o estado de conservação da tubulação de água da caldeira; e efetuar testes nos sistemas de emergência. Por fim, vale destacar que essas atividades citadas são essenciais e devem ser realizadas de acordo com o plano de manutenção de caldeiras, de modo a garantir a integridade do equipamento e dos operadores.

## 4.1 **Melhorias para o aumento do rendimento térmico e da capacidade de geração de vapor**

Tomando base no que foi estudado e apresentado neste trabalho, foi possível verificar e apontar algumas melhorias para aumentar a produção de vapor e a eficiência de uma caldeira. Dentre as melhorias, destaca-se o hidrojateamento externo e interno nos tubos de vapor, que pode ajudar bastante na parte de troca térmica por condução, reduzindo as incrustações, pois a limpeza de caldeiras é uma ação importante para qualquer empresa que trabalhe com vapor. Assim, o hidrojateamento se apresenta como uma possível solução, pois quando as obstruções são eliminadas, a caldeira fica livre para exercer suas funções de forma eficiente, além de evitar problemas que afetam sua vida útil.

Outro fator importante e que reduz a quantidade de problemas de uma caldeira trata-se do nível de automação da mesma, que quanto mais elevado for, menor é o risco de ocorrência de falhas e problemas, visto que com a presença da automação no controle, a segurança e a emissões de dados dos processos se tornam bem mais confiáveis, e a geração de vapor mais eficiente.

## 5 CONCLUSÃO

Diante da conjuntura retratada no presente trabalho, verifica-se que todos os objetivos foram cumpridos. A proposta foi analisar o rendimento térmico de uma caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar, através de um estudo de caso feito em uma usina sucroalcooleira.

A princípio, foi realizado um levantamento bibliográfico a cerca dos processos de geração de vapor e energia a partir do uso do bagaço de cana, destacando o ciclo de *Rankine*, os tipos de turbinas (contrapressão e condensação), os tipos de caldeiras (flamotubulares e aquatubulares) e seus principais componentes, além dos combustíveis utilizados.

Em seguida, demonstrou-se a estequiometria da combustão do bagaço com o ar teórico e posteriormente também com o excesso de ar. Atrélado a isso, obteve-se a relação Ar/Combustível para o bagaço na base seca ( $3,719 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb}$ ) e na base úmida ( $1,82 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{comb}$ ).

Por conseguinte, apresentou-se o estudo de caso realizado em uma caldeira da usina, visando avaliar o seu rendimento térmico. Para tanto, demonstrou-se o equacionamento para a obtenção deste rendimento térmico através dos métodos direto e indireto, cujos resultados alcançados evidenciaram a proximidade dos valores, sendo 68,2% e 62,32% respectivamente. Dessa forma, observa-se que guardadas as proporções e, consideradas as vantagens e desvantagens entre os dois métodos, é possível basear-se em ambos para obter o rendimento térmico satisfatório de uma caldeira.

Assim sendo, constatou-se que o rendimento térmico de um gerador de vapor envolve diversos fatores que devem ser avaliados detalhadamente, sendo que os parâmetros que causam maiores desperdícios devem ter maior atenção. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que as perdas devido à umidade do bagaço atingiram os maiores valores de desperdícios de energia térmica, fator esse suficiente para que ações de melhorias possam ser tomadas. Desse modo, apresentou-se algumas propostas para amenizar tal situação, tais como: realizar estudo e planejamento para obter um plantio e colheita mais eficientes; adição de um terno na moenda e secagem do bagaço através de secadores.

Entretanto, para realizar tais investimentos é necessário fazer uma análise da viabilidade técnica econômica destes projetos e, de acordo com pesquisas realizadas com profissionais do ramo, verificou-se que o meio mais eficiente de remover a água do bagaço é mecanicamente, através da adição de uma prensa ou mais um terno na moenda.

Por fim, como muitas das perdas térmicas existentes na caldeira estão associadas à manutenção da mesma, e esta parte está relacionada diretamente à Engenharia Mecânica, pelo fato de ser função do engenheiro mecânico planejar e controlar o plano de manutenção para o equipamento em questão, foi relatado como é a execução das manutenções das caldeiras da usina em estudo, e também apresentado uma discussão a respeito do assunto. Assim, baseado na norma NR-13, demonstrou-se os procedimentos e os motivos mais importantes para realizar-se manutenção em caldeiras.

## 5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

A título de motivação e estímulo aos alunos de Engenharia Mecânica, foram descritas três sugestões para trabalhos futuros, relacionados ao tema proposto no presente trabalho:

- Realizar uma análise mais aprofundada do impacto dos combustíveis utilizados em caldeiras de alta pressão (sólidos, líquidos e gasosos) no rendimento térmico;
- Abordar os aspectos e principais pontos do sistema de cogeração de energia em usinas sucroalcooleiras;
- Desenvolver estudos de casos com mais usinas sucroalcooleiras, no mínimo três, com o intuito de comparar as igualdades e diferenças entre os processos de geração de vapor de cada;
- Fazer um levantamento da viabilidade de implementações de mecanismos que proporcionem um bagaço de cana menos úmido, e conseqüentemente o impacto que este faria na eficiência da caldeira.
- Efetuar a análise exergoeconômica da caldeira.

## Referências

- ALTAFINI, Carlos R. Curso de engenharia mecânica – disciplina de máquinas térmicas – apostila sobre caldeiras – Universidade de Caxias do Sul, 2002. Disponível em <<http://www.segurancaetrabalho.com.br/download/caldeirasapostila.pdf>>. Acesso em 10/8/2013.
- ANDRADE, L.P. **Petroquímica**. Ed. 359, 2014.
- ANNARATONE, D. **Steam Generators: Description and Design**. Ed: Springer. 2008.
- ASME PTC 4 Fired Steam Generators, The American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York NY 10016-5990, 1998.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor** / Edson Bazzo. 2 ed. – Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 216 p.
- BEGA, E.A., Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras. Rio de Janeiro, RJ, 2003. 179 p
- BIANCO, V.; DE ROSA, M; SCARPA, F; TAGLIAFICO, L. A. Implementation of a cogeneration plant for a food processing facility. A case study. **Applied Thermal Engineering**.p. 500-512. abr. 2016.
- BIZZO, W.A. **Apostila Geração, Distribuição e Utilização de vapor**. Unicamp, 2003.
- ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4ª edição. Porto Alegre, AMGH, 2012
- ÇENGEL, Y.; CIMBALA, J. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**. 3ª edição. Porto Alegre, AMGH, 2015
- CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005
- CERQUEIRA, D. A.; FILHO, G. R.; CARVALHO, R. A.; VALENTE, A. J. M.; **Caracterização de acetato de celulose obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar por 1H-RMN**. Polímeros, vol. 20, n. 2, p. 85-91, 2010.

- CORDEIRO, G. C. **Pozzolanic Activity and Filler Effect of Sugar Cane Bagasse Ash in Portland Cement and Lime Mortars**. *Cement and Concrete Composites*, v. 30, n. 5, p. 410-418, 2008.
- CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro**. Setap. Brasília, 2002.
- DINÇER, İbrahim; ZAMFIRESCU, Calin. **Advanced power generation systems**. Academic Press, 2014.
- FERREIRA, F. M. et al. 2010. **Cogeração no setor sucroalcooleiro em Goiás. Dissertação Monografia (MBA em Gestão Sucroalcooleira)** – Centro Universitário de Lins – Unilins. Lins, SP.
- GASPAR, C. **Eficiência Energética na Indústria**. Cursos de Utilização Racional de Energia, Agencia para a Energia – ADENE. Gaia, 2004.
- LEME, R.M. 2005. **Estimativa de emissão de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa de cana de açúcar**. Dissertação (mestrado). Departamento de energia- Faculdade de Engenharia Mecânica Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MARTINS, D.F.F. **Otimização do Funcionamento de Caldeiras Aquatubulares em Indústria de Processo Químico**. ISEP, 2015.
- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. *Produção*. v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.
- PERA, H., **Geradores de vapor**, Ed. FAMA, São Paulo, 1990.
- SANCHES, C.S. 2003. **Mecanismo de desenvolvimento limpo do protocolo de Kyoto: há perspectivas para o setor sucroalcooleiro paulista?** 300f. Tese doutorado. Escola de administração e Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo.
- SOSA A; JUAN H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço – estudo do sistema de recuperação e energia** / Juan Harold Sosa Arnao.–Campinas, SP: [s.n.], 2007.

SOUZA, Z.J. 2003. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação.** 278f. Tese doutorado. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos.

SOUZA, G. N.; Formagini, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de argamassas com substituição parcial do cimento Portland por cinzas residuais do bagaço de cana-de-açúcar.** Anais do 49º Congresso Brasileiro do Concreto. IBRACON, 11 p, São Paulo, 2007.

SOUZA, R. R. **Panorama, oportunidades e desafios para o Mercado Mundial de Álcool Automotivo.** 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

STUCHI, Gabriel A. D; TACONELLI, Maurício; LANGHI, Vitor A. B. **Geração Termelétrica: principais componentes e tipos centrais termelétricas.** São Carlos: USP Escola de Engenharia de São Carlos, 2015.

THAMIL. Caldeiras Aquatubulares. 2014. Disponível em: <<http://www.thamil.com.br/caldeiras-aquatubulares.html>>. Acesso em: 15 ago 2019.

TURNES, S. R. **An introduction to combustion: concepts and applications /** Stephen R.Turnes.—3rd ed. p. cm. 2011.



## Apêndice A - Estequiometria da combustão do bagaço

- Estequiometria da combustão do bagaço:

Para demonstrar a estequiometria da combustão, utilizou-se a composição elementar em base mássica, do bagaço seco (tabela 3).

Tabela 3: Composição química do bagaço

Elemento	% Úmido	% Seco
C	23,91	48,30
H	2,94	5,93
O	21,34	43,12
Cinzas	0,1	2,65

Fonte: RAÍZEN

Tabela 4: Parâmetros do bagaço

Parâmetro	UN
Umidade	50,5%
Excesso de ar	30%
PCS	9322 kJ/kg
PCI	7403 kJ/kg
Ar total de combustão	3,719 $kg_{Ar}/kg_{Comb}$

Fonte: RAÍZEN

Em seguida, foram calculados os valores do número de mols para cada elemento químico de acordo com a equação a seguir:

$$n = \frac{\% m}{MM}$$

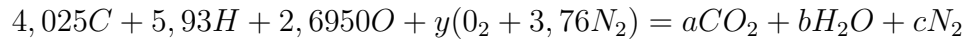
Onde:

- n= número de mols;
- %m= porcentagem em base mássica;
- MM= massa molar do elemento.

De acordo com a composição química do bagaço, disposta na Tabela 3, os resultados obtidos foram:

- Carbono (MM=12): n=4,05;
- Hidrogênio (MM=1): n=5,93;
- Oxigênio (MM=16): n=8,695.

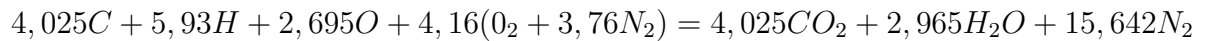
Desse modo, para a combustão completa do bagaço de cana com a quantidade de ar teórico (sem considerar o excesso de ar), a equação química desse processo de combustão pode ser escrita como:



Aplicando o balanço de massa a cada um dos elementos, obtém-se:

$$\rightarrow a = 4,025; b = 2,965; c = 15,642; y = 4,16.$$

Assim, o resultado da equação estequiométrica balanceada da combustão foi:



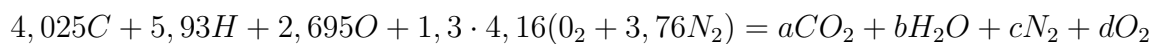
- **Excesso de ar:**

O excesso de ar pode ser obtido através da relação  $Ar_{real}/Ar_{teorico}$ . Segundo dados da Usina Raízen, o resultado encontrado foi:

$$\% \text{ excesso de ar} = \frac{Ar_{real}}{Ar_{teorico}} = 1,3$$

Isso é equivalente a 30% de excesso de ar.

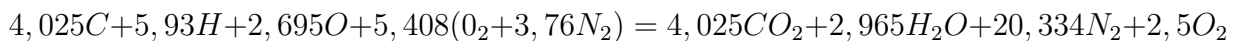
Desse modo, a equação balanceada considerando o excesso de ar é dada por:



Aplicando o balanço de massa a cada um dos elementos, obtém-se:

$$\rightarrow a = 4,025; b = 2,965; c = 20,334; y = 2,5.$$

Portanto, a equação balanceada é dada por:



- **Razão Ar/Combustível:**

Segundo BIZZO (2003), O teor de umidade de biomassa e combustíveis sólidos em geral é um parâmetro que apresenta maior variabilidade que a composição elementar. Assim é interessante calcular a relação A/C estequiométrica na base seca e corrigi-la conforme a umidade presente para se obtê-la na base úmida.

Assim sendo, vale ressaltar que a razão ar/combustível (A/C) expressa em base mássica com a quantidade teórica de ar é determinada tomando a razão entre a massa do ar e a massa do combustível. Segundo os dados da Usina Raízan, o resultado obtido foi:

$$AC = \frac{m_{ar}}{m_{combustvel}} = 3,719 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{combustvel} \quad (1)$$

Por outro lado, na relação A/C na base úmida têm-se:

1 kg de bagaço úmido 50% (b.u.) = 0,5 kg de bagaço seco e 0,5 kg de água.

Portanto:

$$A/C_{(b.u)} = 0,5 \cdot 3,719 \approx 1,86 \text{ kg}_{ar}/\text{kg}_{combustvel}$$

## Apêndice B - Balanço de massa e energia na caldeira

O fluxo de massa do fluido de trabalho coletado de relatórios da usina Raízen foi:

$$\dot{m} = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{3a} = \dot{m}_{3b} = 47,22 \text{ kg/s.}$$

No entanto, para obter o balanço de energia térmica na caldeira, utilizou-se os dados dispostos na tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros para o balanço de energia na caldeira

Parâmetro	Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Entalpia (kJ/kg)
$h_2$	120,0	67,0	503,71
$h_{3a}$	220,0	74,0	943,62
$h_{3b}$	343,0	74,0	2987,4
$h_3$	480,0	67,0	3368,0

Fonte: RAÍZEN

Assim, de acordo com o ciclo e as equações dispostas na Figura 7 e na Tabela 5, obteve-se:

**Pré-aquecimento:**  $\dot{Q}_{ph} = \dot{m}_{3a} \cdot (h_{3a} - h_2) = 47,22 \cdot (943,62 - 503,71) = 20,772 \text{ kW}$

**Ebulição:**  $\dot{Q}_b = \dot{m} \cdot (h_{3b} - h_{3a}) = 47,22 \cdot (2987,4 - 943,62) = 96,507 \text{ kW}$

**Superaquecimento:**  $\dot{Q}_{sh} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_{3b}) = 47,22 \cdot (3368,0 - 2987,4) = 17,972 \text{ kW}$

Portanto, a energia térmica total no ciclo foi:

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{ph} + \dot{Q}_b + \dot{Q}_{sh} = 135,251 \text{ kW}$$

## Apêndice C - Método do Balanço Direto

A eficiência através deste método, pode ser avaliada na base PCI e PCS; por meio das equações:

$$\eta = 100 \cdot \frac{\dot{q}_u}{\dot{q}_d} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCI} \quad \text{ou} \quad \eta = 100 \cdot \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCS}$$

- $\dot{q}_u$  = Energia útil (kW);
- $\dot{q}_d$  = Energia disponível (kW);
- $\dot{m}_v$  = Fluxo de vapor (kg/s);
- $\dot{m}_{cb}$  = Vazão mássica de combustível (kg/s);
- $h_v$  = Entalpia do vapor (kJ/kg);
- $h_a$  = Entalpia da água de alimentação (kJ/kg);
- $PCI$  = Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg cb);
- $PCS$  = Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg cb).

Os dados para obter o rendimento térmico foram obtidos através de relatórios da Usina em estudo (Tabela 9).

Tabela 9: Parâmetros para cálculo do rendimento térmico

Parâmetro	UN
$\dot{m}_v$	47,22 kg/s
$\dot{m}_{cb}$	21,57 kg/s
$h_v$	3375,15 kJ/kg
$h_a$	466,0976 kJ/kg
$PCI$	7403 kJ/kg
$PCS$	9332 kJ/Kg

Fonte: RAÍZEN

Portanto, de acordo com os dados dispostos na tabela, tem-se que:

$$\eta = 100 \cdot \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCI} = \frac{47,22 \cdot (3375,12 - 466,0976)}{21,57 \cdot 7403} = 0,8602 \rightarrow 86\%$$

$$\eta = 100 \cdot \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_{cb} \cdot PCS} = \frac{47,22 \cdot (3375,12 - 466,0976)}{21,57 \cdot 9332} = 0,682 \rightarrow 68,2\%$$

## Apêndice D - Método de Balanço Indireto

### Taxa de Evaporação e Rendimento Térmico

A taxa de evaporação representa a quantidade de vapor gerado por unidade de massa de combustível queimado, e é dada pela equação (BAZZO, 1995):

$$m_v = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{cb}}$$

- $m_v$  = Taxa de evaporação(kg/kg cb);
- $\dot{m}_v$  = Fluxo de vapor (kg/s);
- $\dot{m}_{cb}$  = Consumo de combustível (kg/s);

$$m_v = \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}_{cb}} \approx 2,11 \text{ kg}_{vapor}/\text{kg}_{comb}$$

Para calcular o rendimento térmico ( $\eta$ ), calcula-se primeiro a perda total ( $q_{Tot}$ ):

$$q_{tot} = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 6,57 + 22,52 + 0,29 + 1,3 + 1 = 31,68\%$$

Onde cada termo indica as seguintes perdas de calor:

- $q_2$  = Perdas devido ao calor sensível dos gases secos;
- $q_3$  = Perdas devido a umidade do combustível;
- $q_4$  = Perdas por radiação e convecção;
- $q_5$  = Perdas associadas aos incombustos;
- $q_6$  = Perdas associadas aos não contados;

Portanto, o rendimento térmico pelo método indireto é obtido através da seguinte relação:

$$\eta = 100 - q_{tot} = 68,32\%$$