

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

LAURA BUENO FERREIRA

Análise de Sistema de Geração de Vapor:
Estudo da viabilidade para uso de mistura de cavaco de eucalipto e bagaço de cana em
caldeiras

Uberlândia

2024

LAURA BUENO FERREIRA

Análise de Sistema de Geração de Vapor:
Estudo da viabilidade para uso de mistura de cavaco de eucalipto e bagaço de cana em
caldeiras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecatrônica, da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de
Carvalho

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F383 2024	<p>Ferreira, Laura Bueno, 2001- Análise de Sistema de Geração de Vapor [recurso eletrônico] : Estudo da viabilidade para uso de mistura de cavaco de eucalipto e bagaço de cana em caldeiras / Laura Bueno Ferreira. - 2024.</p> <p>Orientador: Solidônio Rodrigues de Carvalho. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Mecatrônica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Mecatrônica. I. Carvalho, Solidônio Rodrigues de, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Mecatrônica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.03</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

LAURA BUENO FERREIRA

Análise de Sistema de Geração de Vapor:
Estudo da viabilidade para uso de mistura de cavaco de eucalipto e bagaço de cana em
caldeiras

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Engenharia Mecatrônica, da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Uberlândia, 13 de novembro de 2024

Banca Examinadora:

Solidônio Rodrigues de Carvalho – Doutor (UFU)

Valério Luiz Borges – Doutor (UFU)

Euclides Antônio Pereira de Lima – Doutor (UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Senhor da minha vida e que até aqui guiou e guardou todos os meus dias.

Aos meus pais por sempre me apoiarem e sonharem todos os sonhos comigo, sem medir esforços para me ver feliz e realizada. Aos meus irmãos, minha cunhada e meu sobrinho por torcerem por mim em todas as fases da vida. Aos meus avós por deixarem um legado eterno em minha vida.

Aos meus amigos e meu namorado, que estiveram comigo durante todo esse árduo processo da graduação, tornando cada momento mais leve.

A todos os profissionais com os quais tive o prazer de conviver e aprender durante todo o meu período de estágio, os quais se tornaram grandes amigos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho e aos meus professores por contribuírem com o meu desenvolvimento profissional com muita dedicação.

À Universidade Federal de Uberlândia, à Faculdade de Engenharia Mecânica e ao curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica.

(Análise de Sistema de Geração de Vapor, FERREIRA, L. B., 2024)

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo fazer um levantamento sobre a viabilidade do uso de mistura de biomassas como combustível em uma caldeira para geração de vapor, o qual será utilizado nos processos de produção de óleo de soja em uma planta de processamento de soja em Uberlândia, Minas Gerais. O uso do vapor como fonte de energia e calor para a preparação da soja, extração do óleo e refino do mesmo é de extrema importância e representa um dos custos associados ao esmagamento do grão e à produção do óleo. Além disso, a busca por sustentabilidade tem impulsionado o uso de biomassas como combustíveis no Brasil, uma vez que são abundantes e possuem o ciclo do carbono completo, mitigando a emissão de gases causadores do efeito estufa. Diante disso, o presente trabalho visa analisar os impactos operacionais e econômicos do uso de uma mistura de cavaco de eucalipto e bagaço de cana-de-açúcar na caldeira da unidade de processamento de soja. Tudo isso, considerando o mercado de ambas as biomassas no cenário brasileiro e, principalmente, a grande produção de bagaço de cana associado ao fato do país ser o maior produtor de cana do mundo. Para isso, levantou-se questões operacionais, investimentos necessários, atendimento das normas de segurança e ambientais e os impactos financeiros gerados para a empresa com o uso da mistura. Foi realizado um período de teste de quatro dias com o aumento gradual da porcentagem de bagaço de cana na caldeira, que anteriormente usava apenas cavaco de eucalipto, e ao final determinado uma quantidade ideal, bem como os investimentos primordiais para a continuação do projeto e os retornos financeiros agregados à empresa.

Palavras-chave: bagaço de cana, cavaco de eucalipto, caldeira, biomassa, GEE.

(Analysis of a Steam Generation System, FERREIRA, L. B., 2024)

ABSTRACT

This work aims to survey the feasibility of using a mixture of biomass as fuel in a boiler for steam generation, which will be used in the process of production of soybean oil in a soybean processing plant in Uberlândia, Minas Gerais. The use of steam as a source of energy and heat for soybean preparation, oil extraction and refining are extremely important and represents one of the costs associated with crushing the grain and producing the oil. In addition, the search for sustainability has boosted the use of biomass as fuels in Brazil, since they are abundant and have the complete carbon cycle, mitigating the emission of greenhouse gases. Therefore, the present work aims to analyze the operational and economic impacts of the use of a mixture of eucalyptus chips and sugarcane bagasse in the boiler of the soybean processing unit. All this, considering the market of both biomasses in the Brazilian scenario and, especially, the large production of sugarcane bagasse associated with the fact that the country is the largest producer of sugarcane in the world. For this, there were operational issues, necessary investments, compliance with safety and environmental standards and the financial impacts generated for the company with the use of the mixture. A four-day test period was carried out in the boiler, which previously used only eucalyptus chips, with the gradual increase of the percentage of sugarcane bagasse and at the end determined an ideal amount, as well as the key investments for the continuation of the project and the financial returns added to the company.

Keywords: sugarcane bagasse, eucalyptus chips, boiler, biomass, GHG.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ciclo de Potência de Carnot e diagrama $P \times v$	16
Figura 2: Ciclo Rankine Ideal e diagrama $T \times s$	18
Figura 3: Diagrama $T \times s$ para o Ciclo Rankine Real.....	20
Figura 4: Diagrama $T \times s$ comparativo entre Ciclo Rankine Real e Ideal.....	21
Figura 5: Esquema de caldeira fogotubular.....	22
Figura 6: Esquema de caldeira aquatubular.....	23
Figura 7: Recirculação da água em caldeira aquatubular.....	24
Figura 8: Esquema de caldeira mista.....	25
Figura 9: Esquema de ciclo da biomassa.....	33
Figura 10: Oferta Interna de Energia por fonte.....	34
Figura 11: Cadeia produtiva do eucalipto.....	35
Figura 12: Processo de cavaqueamento do eucalipto.....	36
Figura 13: Produção de bagaço com base na produção de cana-de-açúcar.....	37
Figura 14: Foto da caldeira em que foi realizada o teste.....	42
Figura 15: Fluxograma de funcionamento da caldeira.....	43
Figura 16: Fluxograma da caldeira.....	46
Figura 17: Ajuste manual header.....	48
Figura 18: Instalação dos sensores de movimento das bicas de alimentação.....	48
Figura 19: Material particulado e filtro para a proporção de 25% de bagaço de cana.....	49
Figura 20: Material particulado e filtro para a proporção de 50% de bagaço de cana.....	50
Figura 21: Medição do nível da fumaça com Anel de Ringelmann para a proporção de 75% de bagaço de cana.....	51
Figura 22: CIPA utilizado para medição das emissões de gases.....	53
Figura 23: Gráfico comparativo da concentração de material particulado.....	54
Figura 24: Gráfico comparativo da concentração de CO.....	54
Figura 25: Gráfico comparativo da concentração de NOx.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características operacionais da caldeira usada para teste.....	39
Tabela 2: Comparativo de biomassas para o material seco	41
Tabela 3: Comparativo de biomassas para o material como recebido	41
Tabela 4: Propriedades Termodinâmicas em cada ponto	47
Tabela 5: Valores de referência conforme DN- Copam nº 187	52
Tabela 6: Investimentos necessários para o cenário 1	56
Tabela 7: Investimentos necessários para o cenário 2.....	57
Tabela 8: Propriedades consideradas para o cálculo de consumo de combustível.....	57
Tabela 9: Valor por m ³ de biomassa.....	59
Tabela 10: Custo com combustível para o Caso 1	59
Tabela 11: Custo com combustível para o Caso 2	60
Tabela 12: Custo com combustível para o Caso 3	60
Tabela 13: Economia com o uso do bagaço de cana.	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ΔE	Varição da quantidade de energia
Q	Energia líquida que entra/sai do sistema por transferência de calor
W	Energia líquida que entra/sai do sistema por trabalho
ΔE	Varição da energia interna
T_A	Temperatura do reservatório de alta temperatura para o Ciclo de Carnot
T_B	Temperatura do reservatório de baixa temperatura para o Ciclo de Carnot
Q_A	Calor transferido do reservatório de alta temperatura para o Ciclo de Carnot
Q_B	Calor transferido para o reservatório de baixa temperatura no Ciclo de Carnot
W_T	Trabalho realizado pela turbina
W_B	Trabalho requerido pela bomba
P	Pressão
T	Temperatura
v	Volume específico do fluido termodinâmico
s	Entropia específica do fluido termodinâmico
h	Entalpia específica do fluido termodinâmico
η_{carnot}	Eficiência do Ciclo de Carnot
$\eta_{rankine}$	Eficiência do Ciclo Rankine
η_{bomba}	Eficiência isentrópica da bomba
$\eta_{turbina}$	Eficiência isentrópica da turbina
q_e	Quantidade de calor específico que entra nas fronteiras do sistema
q_s	Quantidade de calor específico que sai das fronteiras do sistema
w_e	Trabalho específico que entra nas fronteiras do sistema
w_s	Trabalho específico que sai das fronteiras do sistema
w_{liq}	Trabalho líquido específico no sistema
$w_{T,s}$	Trabalho específico realizado pela turbina e que sai das fronteiras do sistema
$w_{B,e}$	Trabalho específico requerido pela bomba e que entra nas fronteiras do sistema
h_e	Entalpia específica dos fluidos que entram nas fronteiras do sistema
h_s	Entalpia específica dos fluidos que saem das fronteiras do sistema
H/C	Razão hidrogênio e oxigênio na composição química dos combustíveis
H+	Íons de Hidrogênio

OH-	Hidroxila
NaOH	Hidróxido de Sódio
HCl	Ácido Clorídrico
CO ₂	Gás Carbônico
O ₂	Gás Oxigênio
pH	Potencial Hidrogeniônico
NR-13	Norma Regulamentadora 13
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
Copam	Conselho Estadual de Política Ambiental
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
CIPA	Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA	13
2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA	15
2.2.1. Enunciado de Clausius da Segunda Lei da Termodinâmica.....	15
2.2.2 Enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da Termodinâmica	15
2.2.3. Enunciado da Entropia da Segunda Lei da Termodinâmica.....	15
2.3 CICLO DE POTÊNCIA DE CARNOT	16
2.4 CICLO RANKINE IDEAL	17
2.4.1. Análise da Energia em um Ciclo Rankine Ideal.....	19
2.5 CICLO RANKINE REAL	20
3 GERADORES DE VAPOR.....	21
3.1 TIPOS DE GERADORES DE VAPOR	22
3.2 TIPOS DE COMBUSTÍVEIS	25
3.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL.....	26
3.3.1. Sistema de Alimentação por Grelha	27
3.3.2. Sistema de Alimentação de Combustível Pulverizado	27
3.3.3. Sistema de Alimentação por Queima em Leito Fluidizado.....	27
3.3.4. Sistema de Alimentação de Óleo Combustível e Gás Natural	28
3.3.5. Sistema de Alimentação de Biomassa	28
3.3.6. Sistema de Alimentação de Resíduos Industriais e Sólidos Urbanos.....	28
3.4 TRATAMENTO DE ÁGUA EM CALDEIRAS.....	28
3.5 OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E NORMAS	30
4 FONTES DE ENERGIA E ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	31
5 BIOMASSA.....	33
5.1 O CAVACO DE EUCALIPTO COMO BIOMASSA	35
5.2 O BAGAÇO DE CANA COMO BIOMASSA	36
6 ANÁLISE PARA TROCA DE COMBUSTÍVEL	38
6.1 PREPARAÇÃO PARA O INÍCIO DO TESTE.....	39
6.2 CAVACO DE EUCALIPTO x BAGAÇO DE CANA.....	40
6.3 CALDEIRA UTILIZADA PARA TESTE	42
6.3.1. Ar Atmosférico	43

6.3.2. Água e Condensado de Retorno	44
6.3.3. Combustível.....	44
6.3.4. Vapor	45
6.3.5. Gases de Combustão.....	45
6.4 BALANÇO ENERGÉTICO PARA A CALDEIRA.....	46
6.5 RESULTADOS	47
6.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA	55
6.6.1. Investimentos Necessários.....	56
6.6.2. Consumo de Combustível.....	57
6.6.3. Cálculo da economia com combustível	59
7 CONCLUSÃO.....	61
8 REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO PARA CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO DA CALDEIRA	64

1 INTRODUÇÃO

O vapor teve um papel importante no desenvolvimento humano, com destaque para a Revolução Industrial no século XVIII, com o surgimento do motor a vapor, o qual permitiu um novo momento focado na produção em massa e na substituição do trabalho, antes manual, por máquinas mais produtivas. Nesse sentido, o desenvolvimento econômico foi extremamente transformado, não apenas nas indústrias, mas também nos transportes com a invenção das locomotivas e navios a vapor, que colaboraram significativamente para o encurtamento das distâncias e a integração entre economias de diversas regiões.

Com tudo isso, a urbanização, o desenvolvimento econômico e social e o crescimento de grandes centros urbanos foram impulsionados pelo uso do vapor. Após o advento da eletricidade e dos motores a combustão no século XX, o vapor deixou de ocupar esse papel tão primordial, contudo, é notório que foi determinante na criação das bases econômicas e sociais que constituem a sociedade moderna.

Mesmo que o vapor tenha tido a sua utilidade inicial substituída por outras soluções, segue sendo uma das utilidades mais importantes na indústria contemporânea, sendo uma fonte de energia e de transferência de calor essencial. O vapor é amplamente utilizado na geração de energia em usinas termelétricas, sucroalcooleiras e nucleares, é usado para a aquecimento de processos industriais em diversos tipos de indústrias, como a petroquímica, alimentícia e farmacêutica, tendo papel crucial no controle e segurança dos processos, além disso, pode ser usado em processos de esterilização, bem como para a movimentação mecânica de equipamentos como bombas e turbinas.

Toda essa importância do vapor se deve à sua capacidade de transferir uma grande quantidade de energia e calor de maneira eficiente, uma vez que possui um alto calor latente, isso é, armazena uma grande quantidade de energia para sua vaporização, energia essa que será transferida durante a utilização do vapor e consequente condensação. Sendo assim, se configura como meio eficiente e seguro para a transferência de calor em processos industriais e, além disso, é facilmente controlável, permitindo o controle da temperatura conforme necessidade.

Diante desse contexto, o vapor acaba por ser uma das fontes de custo e investimentos das empresas, de maneira que seu valor impacta diretamente na cadeia produtiva e no preço do produto final. Por isso, estudos que busquem maneiras mais sustentáveis, eficientes e mais baratas na geração e distribuição do vapor são muito desenvolvidos com o intuito de gerar vantagens competitivas no mercado, bem como reutilizar subprodutos de outras cadeias produtivas como o bagaço de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A Primeira Lei da Termodinâmica é o princípio da conservação de energia aplicada para sistemas termodinâmicos, desse modo, a energia total em um sistema isolado é constante, ou seja, a energia não pode ser destruída ou criada durante um processo, apenas mudar sua forma. Nesse sentido, toda forma de energia deve ser considerada durante um processo. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

Em suma, a Primeira Lei da Termodinâmica, enuncia que a energia total de um sistema fechado durante um processo adiabático deve ser igual ao trabalho líquido realizado, considerando um ponto de referência no qual qualquer valor arbitrário conveniente pode ser atribuído à energia total em um estado especificado.

Dentro dos pontos apresentados acima, é possível enunciar o princípio de conservação da energia por meio do que é chamado de balanço de energia: “A variação líquida (aumento ou diminuição) na energia total de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia total entrando e a energia total saindo do sistema durante esse processo”. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

$$\begin{aligned} & (\text{Energia total que entra no sistema}) - (\text{Energia total que sai do sistema}) \\ & = (\text{Variação na energia total do sistema}) \end{aligned}$$

Essa relação pode ser útil para resolver problemas de engenharia das mais diversas áreas, é aplicável a qualquer tipo de sistema passando por qualquer processo, contudo, é importante

entender os diferentes tipos de energia, bem como as diversas formas com as quais a energia é transferida.

Considerando sistemas termodinâmicos, os quais serão tratados neste trabalho, como sistemas estacionários, podemos considerar que a variação de energia cinética e potencial será nula, de maneira que a forma de energia que será considerada será a energia interna, associada às propriedades termodinâmicas do sistema em um determinado estado.

Além disso, consideramos as formas de transferência de energia por calor e por trabalho, em que o calor é considerado como quantidade de energia fornecida ao sistema e o trabalho como a forma de energia que deixa o sistema. Dessa maneira, a Primeira Lei da Termodinâmica pode ser enunciada como: “A variação da quantidade de energia contida no sistema durante um intervalo de tempo é igual à quantidade líquida de energia transferida para o sistema por transferência de calor durante o intervalo de tempo menos a quantidade líquida de energia transferida para fora da fronteira do sistema por trabalho durante o intervalo de tempo”. (MORAN e SHAPIRO,2014).

$$\begin{aligned} &(\text{Variação da quantidade de energia contida no sistema em um intervalo de tempo}) = \\ &(\text{Energia líquida que entra nas fronteiras do sistema por transferência de calor no} \\ &\quad \text{intervalo de tempo}) - \\ &(\text{Energia líquida que sai das fronteiras do sistema por trabalho no intervalo de tempo}) \end{aligned}$$

Esse mesmo enunciado pode ser representado por meio da seguinte equação:

$$\Delta E = Q - W \quad (\text{Eq.1})$$

Em que a variação de energia pode ser considerada, nesse caso, de sistemas estacionários como a variação apenas da energia interna do sistema. Desse modo, o equacionamento adotado neste trabalho será o seguinte:

$$\Delta U = Q - W \quad (\text{Eq.2})$$

2.2 SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Como apresentado anteriormente, a Primeira Lei da Termodinâmica estabelece a conservação de energia para sistemas termodinâmicos e a estabelece como uma propriedade termodinâmica, contudo, isso não é suficiente para determinar se um processo pode ocorrer ou não em um sistema. Por exemplo, é sabido que uma xícara de café quente deixada em uma sala irá esfriar até atingir uma temperatura de equilíbrio, porém, a mesma xícara deixada com café frio não irá se aquecer espontaneamente, a não ser que uma certa quantidade de calor seja transferida para o sistema. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

Sendo assim, satisfazer a conservação de energia é imprescindível para a ocorrência de um processo em um sistema isolado, porém somente isso é insuficiente para determinar o estado de equilíbrio final. Para isso, é necessário considerar a Segunda Lei da Termodinâmica, a qual podemos resumir em três enunciados. (MORAN e SHAPIRO,2014).

2.2.1. Enunciado de Clausius da Segunda Lei da Termodinâmica

“É impossível para qualquer sistema operar em uma direção em que o único resultado seria a transferência de calor de uma fonte fria para uma fonte quente.” (MORAN e SHAPIRO,2014).

2.2.2 Enunciado de Kelvin-Planck da Segunda Lei da Termodinâmica

“É impossível para qualquer sistema operar em um ciclo termodinâmico e entregar uma quantidade líquida de energia por trabalho para suas fronteiras enquanto recebe energia por transferência de calor de um único reservatório térmico” (MORAN e SHAPIRO,2014).

Destaca-se a equivalência dos dois enunciados, na medida em que a violação de um enunciado implica diretamente na violação do outro.

2.2.3. Enunciado da Entropia da Segunda Lei da Termodinâmica

Assim como massa e energia podem ser consideradas por meio de balanços de energia ou massa, a entropia pode ser contabilizada por meio de um balanço de entropia, segundo a seguinte formulação matemática. (MORAN e SHAPIRO,2014).

$$\begin{aligned}
 & (\text{Variação na quantidade de entropia no sistema durante um intervalo de tempo}) = \\
 & (\text{Quantidade líquida de entropia transferida para as fronteiras do sistema durante o} \\
 & \quad \text{intervalo de tempo}) + \\
 & (\text{Quantidade de entropia produzida pelo sistema durante o intervalo de tempo})
 \end{aligned}$$

Além disso, o enunciado estabelece que: “É impossível para qualquer sistema operar em uma direção em que a entropia é destruída”. Sendo assim, o termo de entropia produzida pelo sistema pode ser positivo ou zero, mas nunca assume valor negativo.

Portanto, estabelece-se que para um processo ocorrer em um sistema ele deve obedecer tanto a Primeira Lei da Termodinâmica quanto a Segunda Lei da Termodinâmica.

2.3 CICLO DE POTÊNCIA DE CARNOT

O ciclo de Carnot consiste em um ciclo ideal e reversível que opera entre dois reservatórios térmicos, um quente e outro frio. O sistema executando o ciclo passa por quatro processos internos e reversíveis, sendo dois adiabáticos e dois isotérmicos.

A Figura 1 mostra o esquema e o diagrama P x v de um ciclo de Carnot da água circulando em um conjunto caldeira, turbina, condensador e bomba. O sistema representa uma planta de produção de vapor simplificada.

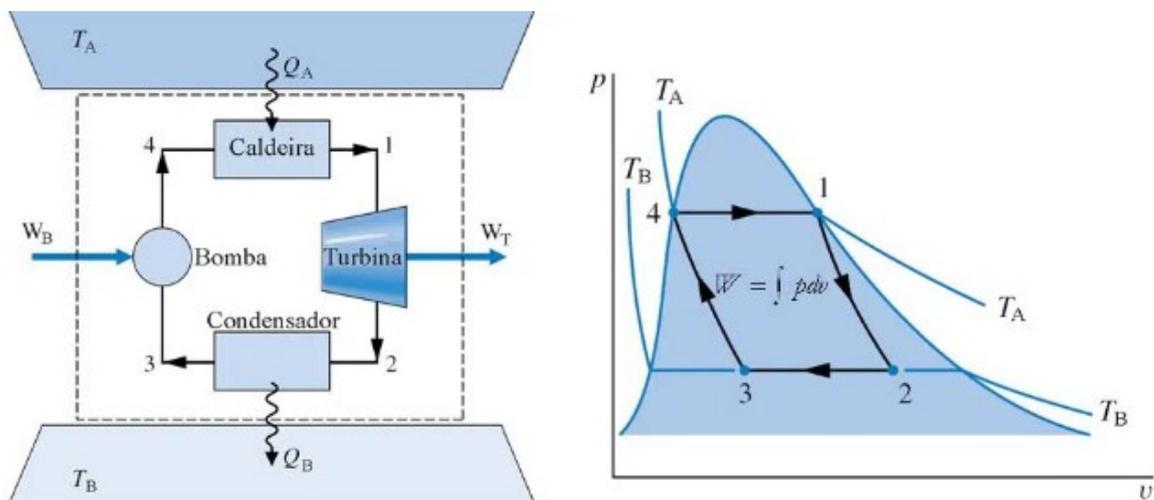


Figura 1: Ciclo de Potência de Carnot e diagrama P x v

Fonte: <https://conhecimentocientifico.r7.com/ciclo-de-carnot-maquina-de-carnot/>

Nesse ciclo os seguintes processos acontecem:

- 4 - 1 : Água passa do estado líquido para vapor em um processo isotérmico
- 1 - 2 : Expansão adiabática do vapor na turbina e geração de trabalho
- 2 - 3 : Vapor passa para o estado líquido em um processo isotérmico
- 3 - 4: Retorno para o estado de entrada na caldeira em um processo adiabático

É importante destacar que no processo de 1 - 2 a temperatura cai de T_A (temperatura do reservatório quente) para T_B (temperatura do reservatório frio) e no processo de 3 - 4 o contrário acontece, a temperatura passa de T_B para T_A , para isso é necessário o trabalho realizado pela bomba aumentando tanto a temperatura quanto a pressão. (MORAN e SHAPIRO, 2014).

Esse ciclo considera a melhor eficiência possível de um ciclo operando entre as temperaturas T_A e T_B (em Kelvin), a qual é dada por:

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_A}{T_B} \text{ (Eq.3)}$$

2.4 CICLO RANKINE IDEAL

Apesar do ciclo de Carnot ser ideal, ele não é o mais adequado para representar plantas de produção de vapor reais, uma vez que limita a temperatura máxima que pode ser usada no ciclo em 374°C (temperatura crítica para a água), limitando a eficiência térmica, isso porque o processo de vaporização na caldeira não poderia deixar de ser isotérmico, o que é muito difícil na hora de transferir calor para um fluido mantendo sua fase.

Além disso, o título do vapor no processo de expansão na turbina cai, o que acaba por gerar líquido, o que estragaria a turbina, sendo difícil manter a água como fluido nesse caso. Outro problema seria o processo de condensação no condensador, uma vez que é difícil controlar o processo de condensação e o condensador teria que lidar com uma mistura de líquido e vapor que sai da turbina. Diante de tudo isso, concluímos que o Ciclo de Carnot não pode ser aproximado em dispositivos reais e, portanto, não é realístico para representar plantas de geração de vapor. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

Para eliminar alguns dos problemas associados ao Ciclo de Carnot, uma solução é superaquecer o vapor na caldeira e condensar completamente a água no condensador. Isso resulta no Ciclo de Rankine Ideal, o qual é o ciclo ideal para plantas de geração de vapor, não envolve nenhuma irreversibilidade interna e consiste em quatro processos:

- 1 - 2 : Compressão isentrópica em um bomba
- 2 - 3 : Adição de calor a uma pressão constante na caldeira
- 3 - 4 : Expansão isentrópica em uma turbina
- 4 - 1 : Rejeição de calor a uma pressão constante em um condensador

A Figura 2 mostra o esquema e o diagrama Txs de um Ciclo Rankine Ideal da água circulando em um conjunto caldeira, turbina, condensador e bomba

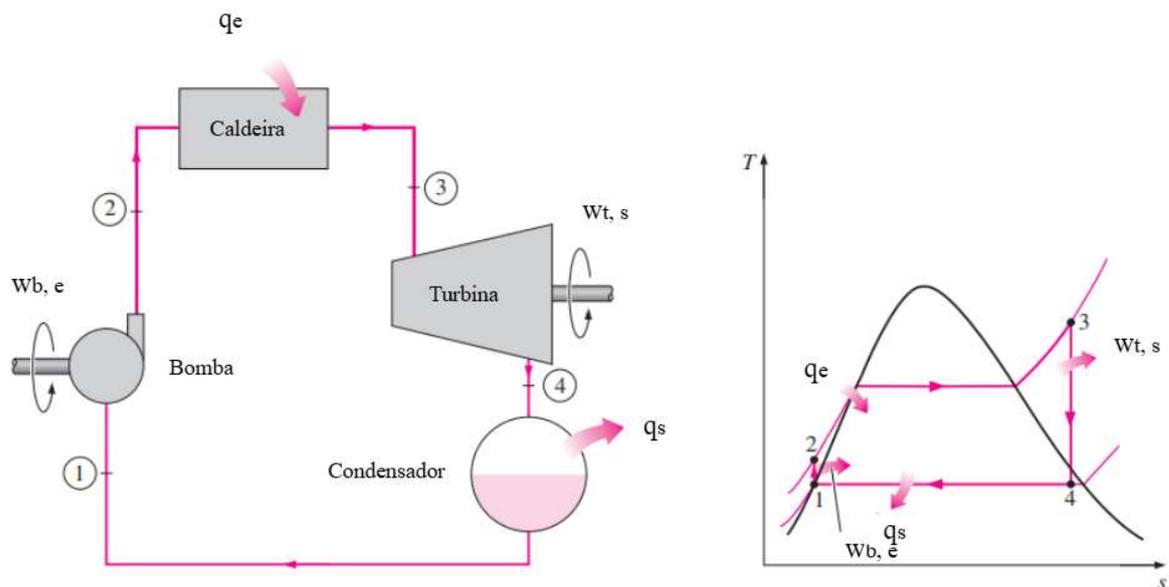


Figura 2: Ciclo Rankine Ideal e diagrama T x s

Fonte: ÇENGEL e BOLES,2015

A água entra na bomba como líquido saturado e é comprimida isentropicamente para a pressão de operação da caldeira. A água entra na caldeira como líquido comprimido no ponto 2 e sai como vapor superaquecido em 3. Após esse processo, o vapor superaquecido entra na turbina, onde se expande isentropicamente e produz trabalho ao girar o eixo conectado a um gerador elétrico. A pressão e a temperatura do vapor caem durante esse processo e o vapor entra no condensador no estado do ponto 4. Nesse estado, o vapor geralmente é uma mistura de líquido-vapor saturado com alta qualidade. O vapor é condensado a pressão constante no condensador, que é basicamente um grande trocador de calor, rejeitando calor para um meio de

resfriamento, como um lago, rio ou atmosfera. O vapor sai do condensador como líquido saturado em 1 e entra na bomba, completando o ciclo. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

2.4.1. Análise da Energia em um Ciclo Rankine Ideal

Considerando que os equipamentos possuem escoamento em regime permanente, bem como que as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis (sistema estacionário), obtemos o seguinte equacionamento para a Primeira Lei da Termodinâmica por unidade de massa de vapor:

$$(q_e - q_s) + (w_e - w_s) = h_s - h_e \text{ (Eq.4)}$$

É importante considerar também que na caldeira e no condensador não há trabalho e que a turbina e o condensador são isentrópicos, logo não haverá transferência de calor. Assim, é possível aplicar a Eq.4 para cada dispositivo.

- Bomba - $(q_e - q_s) = 0$ e $w_s = 0$

$$w_{e,bomba} = h_2 - h_1 \text{ (Eq.5)}$$

- Caldeira - $q_s = 0$ e $(w_e - w_s) = 0$

$$q_e = h_3 - h_2 \text{ (Eq.6)}$$

- Turbina - $(q_e - q_s) = 0$ e $w_e = 0$

$$w_{s,turbina} = h_3 - h_4 \text{ (Eq.7)}$$

- Condensador - $q_e = 0$ e $(w_e - w_s) = 0$

$$q_s = h_4 - h_1 \text{ (Eq.8)}$$

Além disso, a eficiência térmica do Ciclo de Rankine Ideal pode ser dada por:

$$\eta_{rankine} = \frac{w_{liq}}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e} \text{ (Eq.9)}$$

Onde

$$w_{liq} = q_e - q_s = w_{s,turbina} - w_{e,bomba} \text{ (Eq.10)}$$

Apesar do Ciclo Rankine Ideal considerar de forma mais aproximada o funcionamento real dos equipamentos, algumas irreversibilidades ainda são desconsideradas.

2.5 CICLO RANKINE REAL

Como citado anteriormente, mesmo o Ciclo Rankine Ideal ainda difere de um ciclo de vapor real devido à desconsideração de alguns fatores como o atrito do fluido e as perdas de calor para a vizinhança nos equipamentos, o primeiro faz com que haja uma queda de pressão na caldeira e no condensador, enquanto as perdas de calor fazem com que a irreversibilidade na turbina e na bomba seja afetada. Tudo isso faz com que a eficiência do ciclo diminua, a imagem 3 visa mostrar a diferença entre a curva do Ciclo Rankine Ideal e o Ciclo Rankine Real.

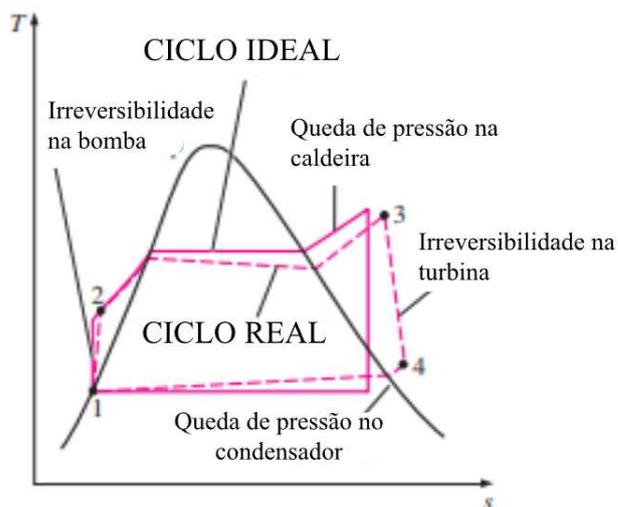


Figura 3: Diagrama T x s para o Ciclo Rankine Real

Fonte: ÇENGEL e BOLES,2015

As irreversibilidades ocorrendo na bomba e na turbina possuem importância particular, uma vez que, no ciclo real, a bomba requer uma entrada de trabalho maior e a turbina produz um trabalho menor. Isso ocorre porque em condições ideais, o fluxo nesses equipamentos é isentrópico, porém, o desvio das bombas e turbinas reais das isentrópicas pode ser considerado por meio da eficiência isentrópica, definida a seguir. (ÇENGEL e BOLES, 2015).

- Bomba

$$\eta_{bomba} = \frac{w_s}{w_a} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2a} - h_1} \text{ (Eq.11)}$$

- Turbina

$$\eta_{turbina} = \frac{w_a}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4a}}{h_3 - h_{4s}} \text{ (Eq.12)}$$

Em que os estados 2a e 4a são os estados reais na saída da bomba e da turbina e os estados 2s e 4s, respectivamente, correspondem aos estados para o caso isentrópico. A diferença entre os dois casos no diagrama Txs pode ser vista na Figura 4.

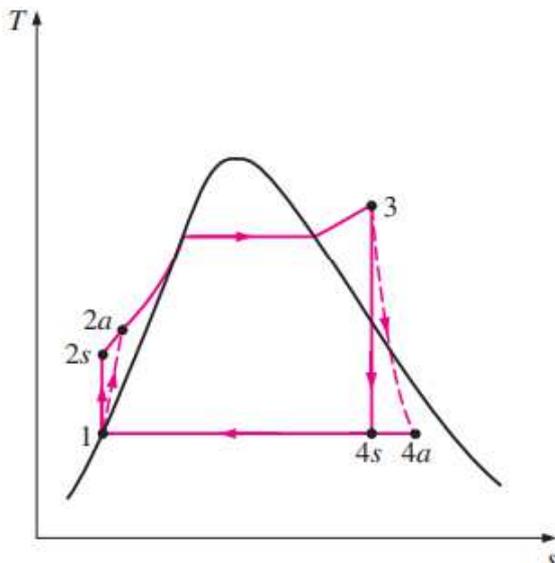


Figura 4: Diagrama T x s comparativo entre Ciclo Rankine Real e Ideal

Fonte: ÇENGEL e BOLES, 2015

3 GERADORES DE VAPOR

De acordo com BASU, P., & KEFA, C. (2013), geradores de vapor ou caldeiras são dispositivos que convertem água em vapor, seja por meio de energia gerada através de combustíveis fósseis ou por fontes de energia nuclear, por exemplo. O princípio de funcionamento básico consiste na queima do combustível na fornalha, gerando calor, que será absorvido pela água, por meio de trocas térmicas, até que passe do estado líquido para o estado de vapor.

Para isso, basicamente são necessários dois sistemas: sistema vapor-água (lado de água) e o sistema combustível-ar-gás da combustão (lado de fogo). O primeiro tem em sua entrada a água de alimentação e na saída o vapor gerado pela caldeira. Já, no segundo, tem-se na entrada o combustível e o ar necessários para a combustão, a qual irá gerar na saída os gases de combustão, mas, principalmente, converte a energia química em energia térmica que será transferida para a água no processo de vaporização. (BEGA,2003)

3.1 TIPOS DE GERADORES DE VAPOR

Em resumo os geradores de vapor podem se dividir em dois tipos:

- **Fogotubular:** em que os gases quentes da combustão passam por dentro e a água da caldeira passa por fora do tubos, ou seja, o lado de fogo fica por dentro dos tubos e o lado de água por fora.

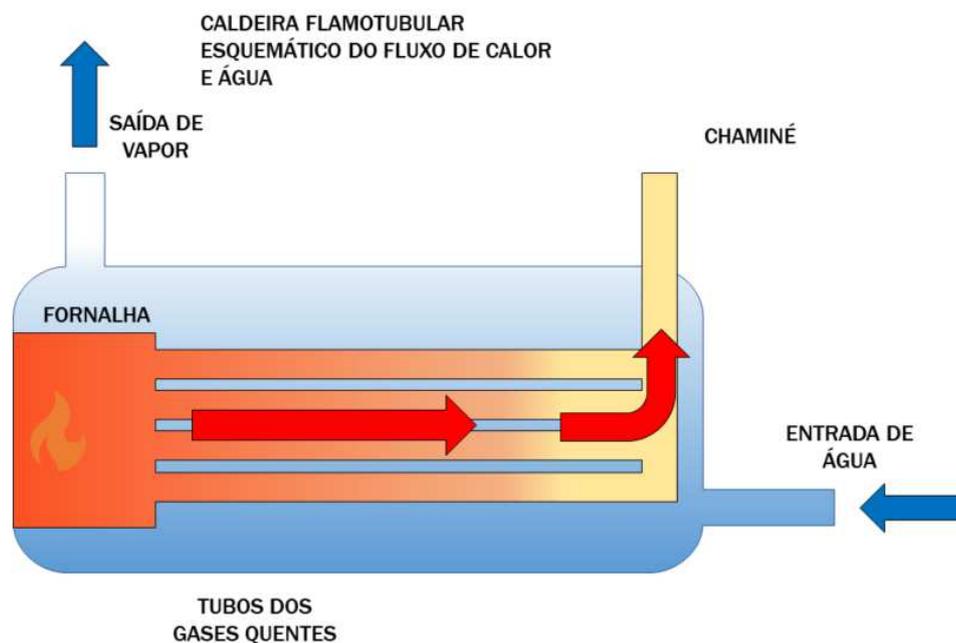


Figura 5: Esquema de caldeira fogotubular

Fonte: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>

O vapor é gerado pelo calor transferido dos gases quentes da combustão, através das paredes metálicas dos tubos, para a água que fica circundando estes tubos. O resfriamento dos gases e

aquecimento da água depende de alguns fatores, como a condutividade dos tubos, a diferença de temperatura entre os gases e a água, a área de transferência de calor e o tempo de contato entre a parte interna e externa dos tubos. (BEGA,2003).

As caldeiras fogotubulares são bastante utilizadas por serem simples, porém apresentam limitações, sendo aplicadas para pequenas e médias vazões de vapor, além de se adequarem apenas para pressões de trabalho menores.

- **Aquatubular:** a água passa por dentro e os gases quentes da combustão passam por fora dos tubos, ou seja, o lado de água fica por dentro e o lado de fogo fica por fora dos tubos. Esses tubos formam o feixe tubular e são conectados entre dois ou mais tubulões cilíndricos.

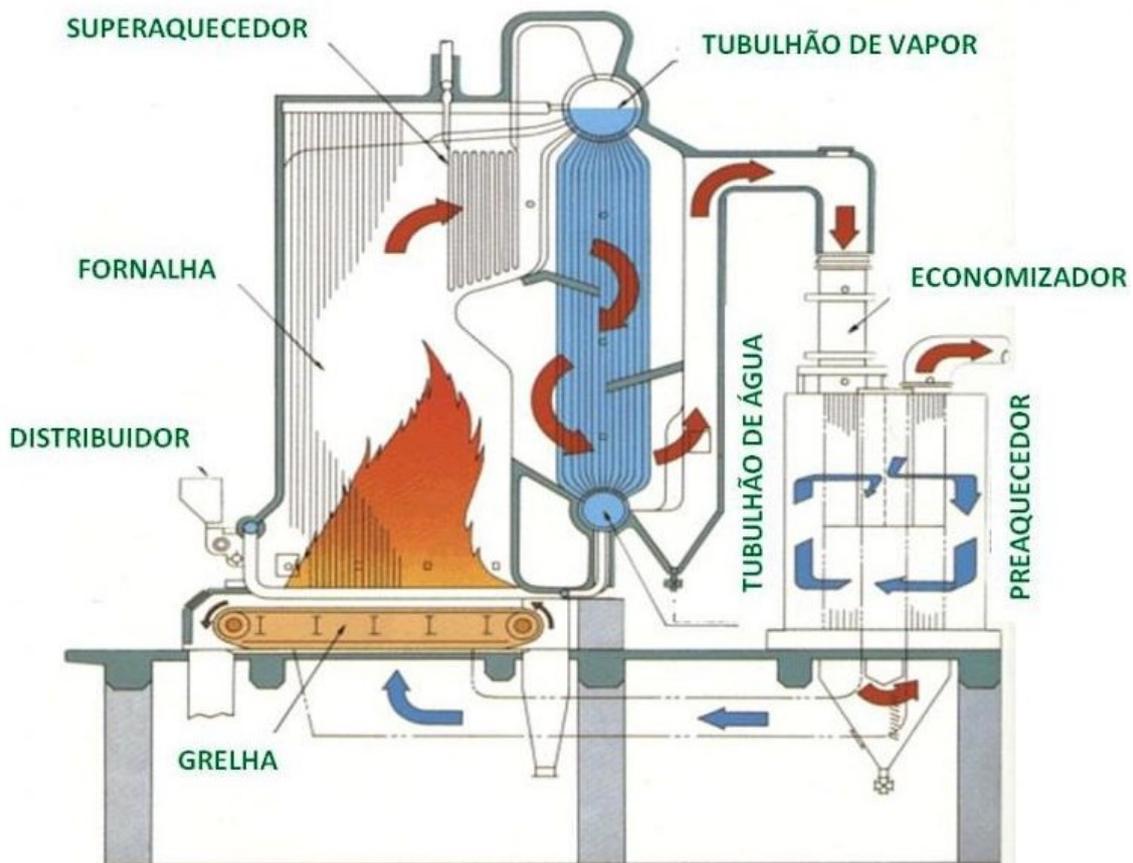


Figura 6: Esquema de caldeira aquatubular

Fonte: <https://www.gbtecnica.com.br/index.php/novidades/caldeiras/>

O tubulão superior ou tubulão de vapor, é composto por água e vapor saturado, enquanto o tubulão inferior trabalha totalmente cheio de água. Além disso, todo o conjunto é isolado pela fornalha, composta de uma parede refratária, a fim de evitar perdas de calor para o ambiente.

Como pode ser visto na figura, o aquecimento da água dentro dos tubos é feito pelos gases provenientes da combustão do ar com o combustível nos queimadores dentro da fornalha.

Para o funcionamento adequado de uma caldeira aquatubular é imprescindível que ocorra a recirculação da água entre o tubulão superior e inferior. Isso ocorre porque a água fria é alimentada no tubulão superior e, devido à densidade maior, desce pelos tubos descendentes nesse processo e ao chegar no tubulão inferior ganha calor por trocas com os gases de combustão, vaporizando. O vapor, por ser menos denso, sobe pelos tubos ascendentes retornando ao tubulão superior, de onde é distribuído para a utilização necessária.

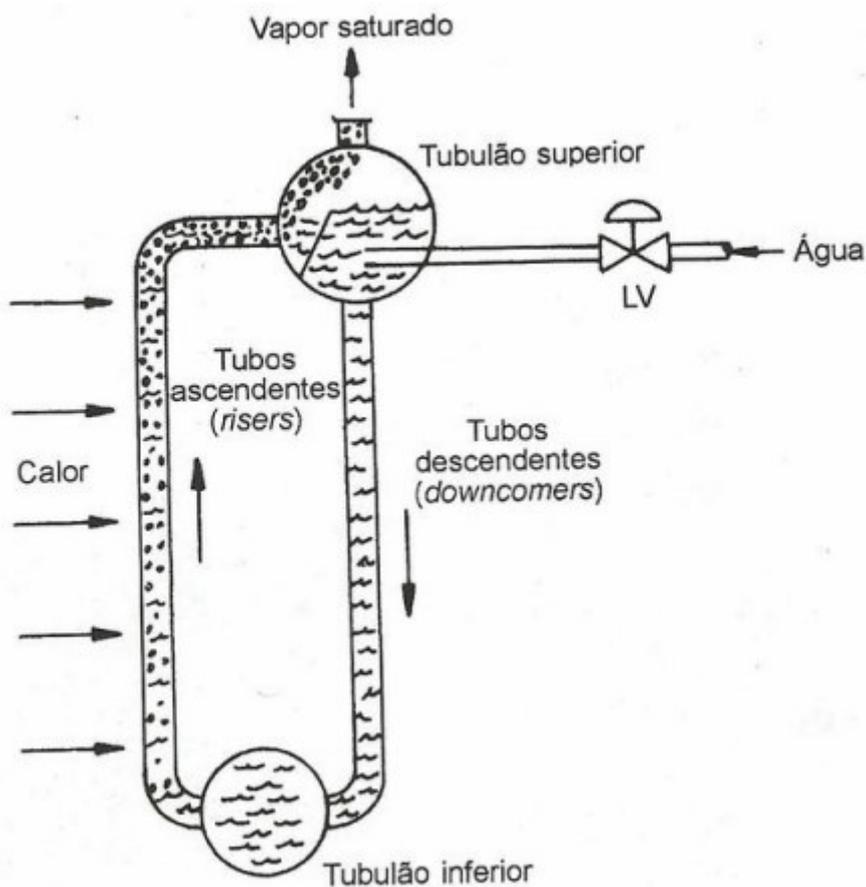


Figura 7: Recirculação da água em caldeira aquatubular

Fonte: BEGA, 2003

O vapor gerado no tubulão superior é saturado, sendo assim, caso queira se utilizar vapor superaquecido é necessário a utilização de superaquecedores, constituídos por feixes de tubos em forma de serpentina. O vapor superaquecido pode ser mais adequado em casos de maior

necessidade de disponibilidade de energia e para aumento do rendimento de turbinas, pois permite um maior salto entálpico.

Um ponto importante a ser destacado é que a geração de vapor nas caldeiras depende da troca térmica entre os gases da combustão e a água, sendo assim, há um limite para o quanto a água pode ser aquecida. Algumas maneiras de melhorar o ganho de temperatura da água é fazer com que a água de alimentação e o ar da combustão já entrem com uma certa temperatura mais elevada, para isso pode-se utilizar equipamentos como o economizador e o pré-aquecedor de ar. Nesses equipamentos, utiliza-se dos gases de combustão, que saíam ainda com uma certa temperatura na chaminé para trocar calor com a água de alimentação no economizador e com o ar de combustão no pré-aquecedor.

Apesar das caldeiras fogotubulares e aquatubulares serem as mais comuns, é importante destacar também a existência de caldeiras mistas. Nessa configuração, tem-se a parte fogotubular nos tubulões de água e a parte aquatubular na fornalha.

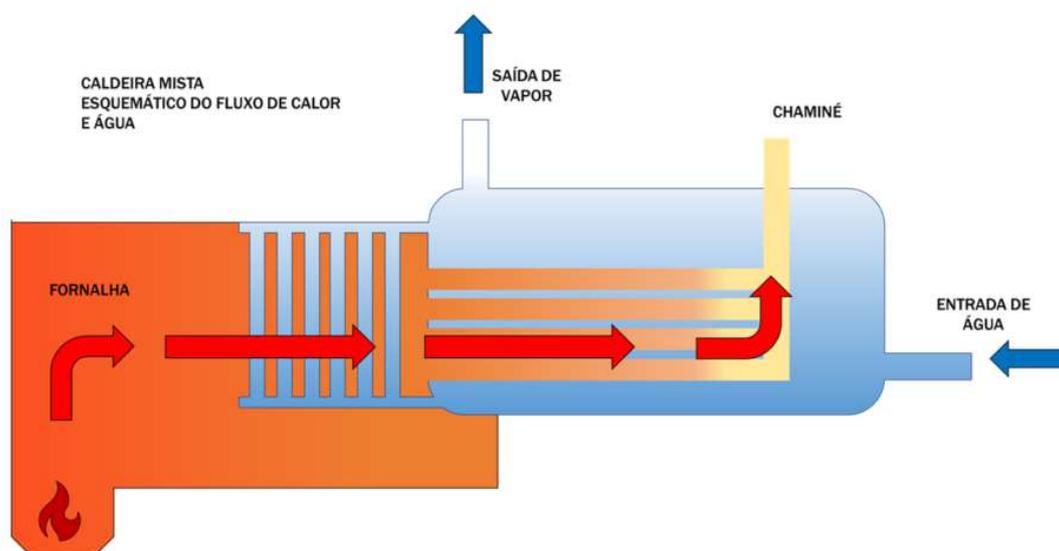


Figura 8: Esquema de caldeira mista

Fonte: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>

3.2 TIPOS DE COMBUSTÍVEIS

De acordo com BEGA (2003), em geral os combustíveis podem ser classificados como gasosos, líquidos ou sólidos. Essa definição se dá por meio da razão de hidrogênio e carbono na composição química do combustível, o gás natural, por exemplo tem a razão H/C maior que

0,3, o óleo combustível tem razão H/C maior que 0,1 e, por fim, o carvão tem razão H/C menor que 0,07. Como o carbono é mais pesado que o hidrogênio, uma diminuição na razão H/C representa um aumento na densidade do combustível. É importante destacar que o tipo de combustível influencia diretamente na forma em que o mesmo será manuseado e preparado para a combustão.

No caso dos combustíveis gasosos, podem ser facilmente dispersos no ar, não havendo a necessidade da preparação desse combustível para a combustão, faz-se necessário apenas a adequação da pressão do gás à pressão admitida pelo queimador da caldeira. Além disso, o combustível gasoso pode ser misturado com o ar no próprio bocal do queimador ou pode haver uma mistura prévia com o ar de combustão.

Diferentemente dos combustíveis gasosos, os combustíveis líquidos necessitam ser vaporizados ou atomizados a fim de aumentar a área de contato com o ar da combustão e facilitar a vaporização com o calor da chama. No caso da vaporização utiliza-se o próprio calor da fornalha para converter o combustível de líquido para vapor, já no caso da atomização, a alimentação do combustível na caldeira ocorre sob pressão e/ou com ar e vapor juntamente com o líquido. Essa última maneira é a mais utilizada.

No caso de um combustível sólido, pode ser queimado num leito de combustível em suspensão ou em um leito fluidizado, dependendo da situação. No primeiro não precisa de preparação adicional, sendo alimentado diretamente por gravidade ou por meio de carregadores mecânicos. Já, no segundo modo, tem-se um alimentador ajustável para admitir o combustível para o leito fluidizado, de maneira que ele opere com temperaturas mais baixas, o que permite maior transferência de calor na geração do vapor.

3.3 SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL

Para que a combustão seja eficiente e, conseqüentemente, haja uma produção contínua de vapor, é muito importante que o sistema de alimentação de combustível seja adequado, conforme o combustível utilizado e a necessidade de operação da caldeira. Assim, podemos encontrar diferentes tipos de sistemas de alimentação de combustíveis, os quais serão apresentados nessa seção.

3.3.1. Sistema de Alimentação por Grelha

Nesse sistema o combustível é alimentado de modo a cair sob uma grelha, onde a combustão ocorre, normalmente são utilizados em caldeiras que queimam combustíveis sólidos, como carvão e biomassa. Destaca-se que a grelha pode ser de dois tipos: grelha fixa ou grelha móvel.

No caso da grelha fixa, o combustível é alimentado manualmente ou por alimentadores automáticos enquanto a grelha permanece estacionária, isso pode gerar um desperdício maior de combustível que não irá queimar e requer a constante limpeza da grelha para que não haja o acúmulo excessivo de cinzas, o que pode prejudicar o equipamento.

Já no tipo de grelha móvel, a mesma empurra o combustível através da fornalha, o que facilita uma queima contínua, mais uniforme e com menos desperdícios. Além disso, a própria rotação da grelha já permite também a coleta das cinzas, facilitando a limpeza.

3.3.2. Sistema de Alimentação de Combustível Pulverizado

A pulverização do combustível consiste basicamente na preparação do combustível sólido, como o carvão por exemplo, nesse processo, o combustível é moído em partículas finas que serão alimentadas por meio da corrente de ar. Essas partículas serão queimadas ainda em suspensão e terão uma área de contato maior com o ar, o que possibilita uma queima mais rápida e completa, o que gera maior eficiência térmica na caldeira. Em contrapartida, é necessário um grande controle da quantidade de ar e combustível na combustão e o sistema de moagem apresenta grande complexidade.

3.3.3. Sistema de Alimentação por Queima em Leito Fluidizado

No sistema de leito fluidizado, um leito de material inerte, como areia por exemplo, é mantido em suspensão por uma corrente de ar, onde haverá a mistura do ar e combustível para a combustão. Nesse tipo de sistema, diferentes tipos de combustíveis sólidos podem ser utilizados, como carvão, biomassa e resíduos sólidos, contudo, o controle da caldeira é complexo e a implantação desse sistema requer investimento inicial alto.

3.3.4. Sistema de Alimentação de Óleo Combustível e Gás Natural

Como visto anteriormente, no caso de combustíveis gasosos, não é necessária uma preparação prévia para a combustão, sendo assim, o combustível é introduzido diretamente no queimador da caldeira e disperso no ar, sendo necessário apenas um ajuste de pressão. Já para combustíveis como o óleo combustível, é necessário que haja a vaporização ou atomização, para que partículas menores sejam admitidas na câmara de combustão, permitindo uma maior área de contato com o ar e uma combustão mais completa e eficiente.

3.3.5. Sistema de Alimentação de Biomassa

Em caldeiras projetadas para a queima de biomassa, como o cavaco de eucalipto, bagaço de cana e a casca de arroz, o combustível é alimentado por meio de transportadores automáticos, como esteiras, ou alimentadores mecânicos. Nesse tipo de caldeira tem-se o uso de fontes renováveis de combustível, sendo menos poluentes. Contudo, é necessário o controle do armazenamento e manejo correto do combustível, garantindo condições adequadas de granulometria e umidade para o equipamento e para as necessidades de operação.

3.3.6. Sistema de Alimentação de Resíduos Industriais e Sólidos Urbanos

Nesse tipo de equipamento tem-se o uso do lixo para a geração de energia e vaporização da água. Como os resíduos são irregulares e variados, é necessário que o sistema de alimentação conte com trituradores e sistema de transporte que permita a manipulação dos resíduos a fim de garantir a alimentação contínua e controlada. Apesar de ser uma fonte de energia renovável e que reduz a quantidade de resíduos descartados, exige um controle rigoroso das emissões de gases e poluentes e manutenção adequada para o equipamento.

3.4 TRATAMENTO DE ÁGUA EM CALDEIRAS

Um dos pontos críticos para garantir a operação segura e a vida útil de uma caldeira está associado à qualidade da água utilizada. Assim, é necessário realizar alguns procedimentos a fim de obter uma água livre da presença de oxigênio, sem sais, materiais orgânicos, materiais suspensos e com um pH e temperatura adequados para o equipamento. Isso é necessário devido ao grande potencial de dissolução da água, a qual dissolve hidróxidos, óxidos e gases.

O tratamento de água tem como um de seus objetivos evitar o processo de incrustação, o qual consiste na precipitação de sais que antes estavam dissolvidos na água, como carbonatos e silicatos, isso se torna um problema porque forma-se uma camada de sais nas paredes dos tubos, tubulões e equipamentos diminuindo a área de contato para trocas térmicas. Essa situação acaba por acarretar um maior consumo de combustível e um superaquecimento das partes gerando fissuras e rupturas, o que prejudica a continuidade da operação. Além disso, o tratamento de água previne processos corrosivos advindos de gases dissolvidos na água, o que compromete a integridade estrutural do equipamento. Por fim, o tratamento de água também serve para a retirada de materiais suspensos e qualquer impureza que represente uma limitação para as condições ideais de operação. Alguns processos empregados no tratamento de água são:

- **Desmineralização:** processo que visa a remoção de sais de cálcio, magnésio, sódio, cloretos e sulfatos por meio de resinas de troca iônica que substituem os íons dissolvidos por íons de hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-). Após um certo período essas resinas perdem sua capacidade de troca iônica, sendo necessário a realização de regeneração com hidróxido de sódio (NaOH) ou ácido clorídrico (HCl).
- **Desaeração:** realiza a remoção de gases como oxigênio e dióxido de carbono dissolvidos na água, os quais têm grande potencial corrosivo. Esse procedimento é feito no desaerador térmico, o qual aquece a água até que esses gases ganhem energia o suficiente para serem separados da água.
- **Controle do pH:** consiste na adição de produtos químicos que ajudarão a manter a faixa ideal de pH para a operação, alguns aditivos são: fosfatos, hidróxidos e aminas.
- **Abrandamento:** processo que remove íons de cálcio e magnésio responsáveis pela dureza da água e que geram muita incrustação. Esse processo também é realizado por troca iônica, substituindo esses íons por íons de sódio, os quais não geram inscrução.
- **Purga da caldeira:** um procedimento importante para a qualidade da água que consiste no descarte periódico de parte da água presente no interior do equipamento com o intuito de remover sólidos e impurezas que foram concentrados na água devido à evaporação. Isso pode ser feito no dispositivo de descarga contínua da caldeira em um intervalo pré estabelecido pela análise do ciclo de concentração.

3.5 OPERAÇÃO, MANUTENÇÃO E NORMAS

No Brasil, tem-se a Norma Regulamentadora 13 (NR-13), de 8 de junho de 1978 e que teve sua última atualização em 20 de dezembro de 2022, para caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento, a qual tem como objetivo “estabelecer requisitos mínimos para a gestão da integridade estrutural de caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento nos aspectos relacionados à instalação, inspeção, operação e manutenção, visando a segurança e saúde dos trabalhadores.”

Essa norma define caldeiras como “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares”. Além disso, as caldeiras são divididas em duas categorias, a A, que abrange aquelas que a pressão de operação é igual ou superior a 1.960 kPa e a categoria B, em que a pressão de operação é superior a 60 kPa e inferior a 1.960 kPa. Os requisitos de operação, inspeção e manutenção variam de acordo com a categorização.

Um dos requisitos de segurança em caldeiras diz respeito à instalação do equipamento, o qual deve ser instalado em casas de caldeiras ou áreas de caldeiras, locais adequados em relação à ventilação, iluminação e acesso seguro. Além disso, deve haver espaço suficiente para a realização das manutenções e inspeções, além dos documentos adequados como placa de sinalização com todos os dados importantes sobre a caldeira.

Em relação à operação, a norma estabelece que deve ser realizada por operadores devidamente capacitados, com cursos específicos, certificados e renovados periodicamente para a operação do equipamento especificado. Além disso, a caldeira deve possuir Manual de Operação com os procedimentos de emergência, partidas, paradas, procedimentos de rotina e procedimentos gerais de saúde, o qual deve estar sempre disponível no local. Por fim, tem-se também o uso de dispositivos de controle, como válvulas de segurança, manômetros, indicadores de nível, sensores de temperatura e sensores de vazão que monitorem constantemente a operação alertando para eventuais falhas e intercorrências.

No que diz respeito a inspeções, a NR estabelece dois tipos: inspeção inicial, a qual deve ser feita em caldeiras novas antes da entrada em funcionamento e já no local definitivo de

instalação e a inspeção periódica, que deve ser feita por meio de exames externos e internos em um período máximo de 12 meses para caldeiras de categoria A e B. Além disso, ao completar 25 anos de uso as caldeiras devem ser submetidas a uma avaliação de integridade geral a fim de determinar a vida remanescente e prazos máximos para as próximas inspeções. No caso de ocorrência de dano, alteração, reparo, reativação após seis meses parada ou mudança de local de instalação, deve ser feita uma inspeção de segurança extraordinária. É importante destacar que todas as inspeções devem gerar um relatório de inspeção que documente as especificações da caldeira, os detalhes dos exames que foram realizados, os resultados obtidos e as providências necessárias.

A NR 13 também estabelece a existência de um plano de manutenção preventiva detalhado, incluindo especificações para inspeção visual, limpeza periódica e verificação de componentes críticos, como válvulas e sensores. Além disso, são necessários alguns documentos obrigatórios que devem ser mantidos atualizados, como o prontuário da caldeira, o registro de segurança e os certificados de treinamento.

É importante ressaltar que a NR 13, apesar de ser a única detalhada nessa seção, não é a única norma que pode ser aplicada para caldeiras, no Brasil tem-se também: ABNT NBR 12177 - Caldeiras - Inspeção de Fabricação de 1992 e ABNT NBR 13212 - Manutenção de Caldeiras a Vapor de 2008. Além das normas brasileiras, destaca-se a norma internacional que estabelece critérios de projeto, fabricação, inspeção, manutenção e testes em caldeiras, com ênfase em segurança e integridade, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, da *American Society Of Mechanical Engineers*.

4 FONTES DE ENERGIA E ENERGIAS RENOVÁVEIS

Observando a história do desenvolvimento humano e o panorama atual, é notório a importância das fontes de energia para o funcionamento da sociedade e para os avanços tecnológicos. Diante desse cenário, temos dois tipos de fontes de energia: as renováveis e as não-renováveis, classificadas conforme o tempo necessário para sua reposição.

As fontes de energia não-renováveis são aquelas que possuem um tempo de reposição natural muito elevado, o qual ultrapassa a escala de tempo humana, levando milhões de anos para a

reposição. Entre essas fontes destaca-se principalmente os combustíveis fósseis como petróleo, carvão mineral e gás natural, os quais apresentam grande capacidade energética, porém geram um grande impacto ambiental na medida em que emitem gases poluentes e colaboram com o efeito estufa e as consequentes mudanças climáticas.

Diante dessas problemáticas, as energias renováveis, as quais são aquelas que são reabastecidas naturalmente em uma escala de tempo humana e bem mais curta, têm sido cada vez mais valorizadas e são vistas como imprescindíveis para a transição energética do mundo de maneira mais sustentável, segura e com menos impactos de emissão de gases poluentes. As energias renováveis são vistas como inesgotáveis quando comparadas com os combustíveis fósseis, por exemplo, uma vez que são derivadas de processos naturais contínuos e constantes, como a luz solar, a decomposição da matéria orgânica, os ventos e o movimento das águas. Dentre as energias renováveis, destacam-se:

- **Energia Solar:** converte a energia proveniente da radiação solar em energia elétrica através de células fotovoltaicas, é uma fonte de energia renovável com baixíssima emissão de poluentes, contudo é limitada pela taxa de incidência solar, a qual depende do local e de condições climáticas.
- **Energia Eólica:** utiliza a energia cinética proveniente dos ventos em aerogeradores para geração de energia elétrica, apresenta baixo impacto ambiental, porém depende de condições favoráveis de relevo, gera um certo impacto visual na paisagem e é afetada pela variação dos ventos.
- **Energia Hidrelétrica:** gera energia elétrica a partir do movimento da água passando por turbinas, representa a principal fonte energética renovável do Brasil e permite a geração de grandes quantidades de energia de forma contínua e controlada. Apesar disso, gera um impacto ambiental considerável por conta da construção das usinas hidrelétricas, na medida em que tem-se o alagamento de uma grande área para a construção da barragem.
- **Biomassa:** a biomassa consiste em resíduos florestais, agrícolas ou urbanos, utiliza-se de sua matéria orgânica para a geração de energia térmica e/ou elétrica, bem como para a produção de biocombustíveis, como etanol e biodiesel. Podem ser usadas em caldeiras para geração de vapor, o qual pode ser usado em processos industriais ou em um ciclo de geração de energia elétrica, o que permite o aproveitamento de subprodutos que

seriam descartados e emitem pouco CO₂, contudo, dependem de grandes áreas de cultivo.

Além das energias renováveis listadas acima, existem outras opções como a energia geotérmica, que utiliza o calor proveniente das camadas mais internas da Terra e a energia maremotriz, proveniente do movimento das ondas e marés. Como visto anteriormente, as biomassas possuem aplicação significativa em caldeiras e, por isso, serão tratadas com mais detalhes no capítulo a seguir.

5 BIOMASSA

Biomassa é matéria orgânica, seja ela de origem animal ou vegetal, que pode ser usada como fonte de energia. É composta primordialmente por elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio, podendo ser usada em processos de combustão e fermentação, por exemplo, para a geração de energia. Como biomassa podemos citar diversos resíduos florestais, agrícolas e urbanos como: cavaco de eucalipto, bagaço de cana, casca de arroz, caroço de açaí e resíduos sólidos urbanos.

Como apresentado anteriormente, as biomassas são consideradas como uma fonte de energia renovável, ou seja, são repostas naturalmente por meio do processo natural de decomposição da matéria orgânica. É possível entender a renovação das biomassas por meio do ciclo do carbono, representado na Figura 9.

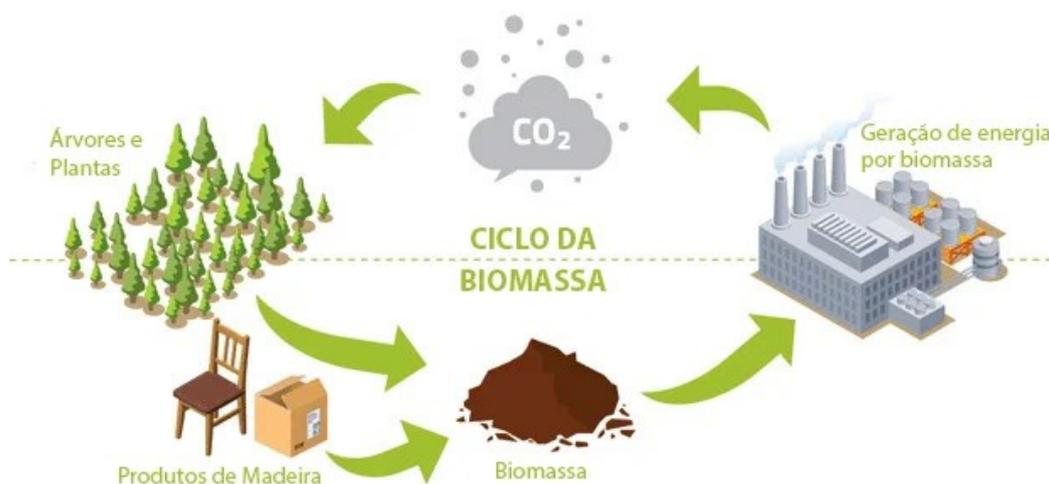


Figura 9: Esquema de ciclo da biomassa

Fonte: <https://www.isen.com.br/biomassa-e-geracao-de-energia/>

Basicamente, o ciclo do carbono é completo, a planta absorve o gás carbônico (CO₂) da atmosfera no processo de fotossíntese e libera gás oxigênio (O₂), a planta se desenvolve e o cavaco ou resíduos da madeira serão usados no processo de combustão na caldeira. Esse processo captura o oxigênio da atmosfera e libera gás carbônico, o qual será capturado pela planta e o gás oxigênio será repostado na atmosfera também pela planta, esse ciclo se repete de maneira contínua, mantendo a renovação da biomassa.

Como o ciclo apresentado acima é completo, as biomassas são muito importantes para a transição da matriz energética mundial e para o alcance de um desenvolvimento mais sustentável. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia, em 2023, 4,6% de toda a eletricidade consumida no Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil foi proveniente das biomassas, o país conta com 637 termelétricas que utilizam biomassa como fonte de energia e uma capacidade de 17.384 MW instalados, com o uso de 15 combustíveis diferentes, tendo como principal o bagaço de cana-de-açúcar. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 2023 é possível analisar a oferta interna de energia por fonte, apresentada na Figura 10:

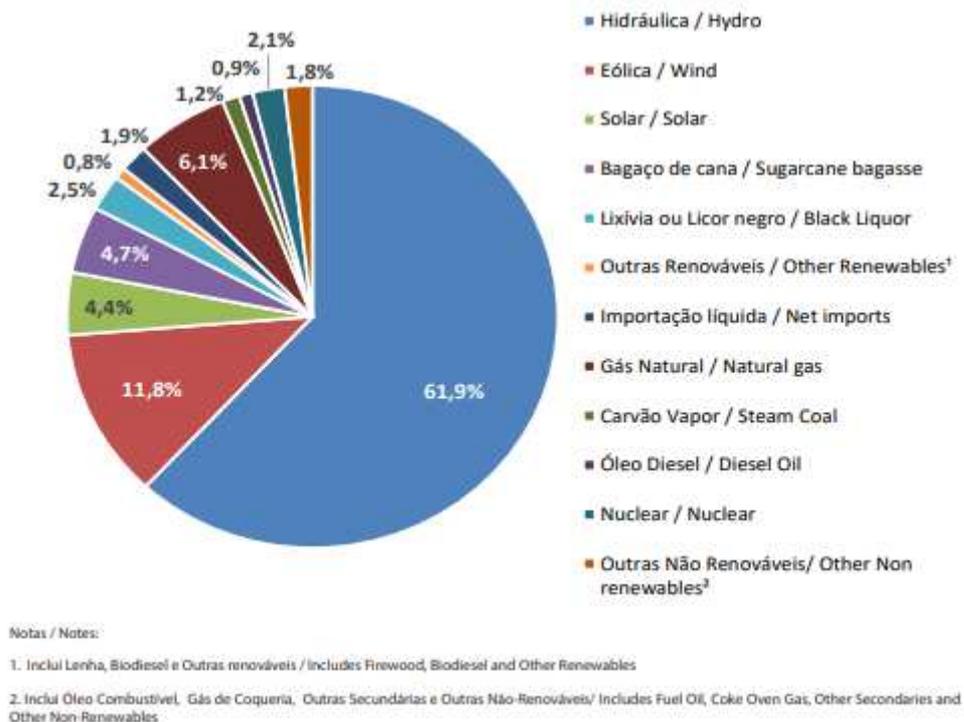


Figura 10: Oferta Interna de Energia por fonte

Fonte: Balanço Energético Nacional 2023 - Ministério de Minas e Energia

Além do uso de biomassas na geração de energia elétrica, elas têm sido muito usadas nas indústrias para a geração de vapor, muitas vezes os próprios resíduos da produção industrial podem ser usados na caldeira, apresentando vantagens ambientais e financeiras. Contudo, é importante analisar alguns fatores como o poder calorífico, as necessidades específicas de armazenamento e controlar as emissões de gases do processo de combustão.

5.1 O CAVACO DE EUCALIPTO COMO BIOMASSA

O eucalipto é uma espécie de origem da Austrália, na Tasmânia e foi trazida para o Brasil em meados dos anos de 1825 a 1868. De acordo com a Embrapa, o crescimento das áreas reflorestadas pela espécie no Brasil se deu a partir da Lei de Incentivos Fiscais ao Reflorestamento de 1966, sendo que a partir desse momento a eucaliptocultura passou a crescer motivada pelo potencial do uso da madeira para biomassa, principalmente lenha, para o uso como matéria-prima na fabricação de papel e celulose e também para a fabricação de produtos de madeira em geral. O rápido crescimento, grande capacidade de adaptação às diversas regiões, alta taxa de produtividade, baixo custo e alta taxa de retorno do investimento são fatores que favorecem ainda mais o crescimento do mercado. É possível acompanhar um fluxograma representativo da cadeia produtiva na Figura 11.

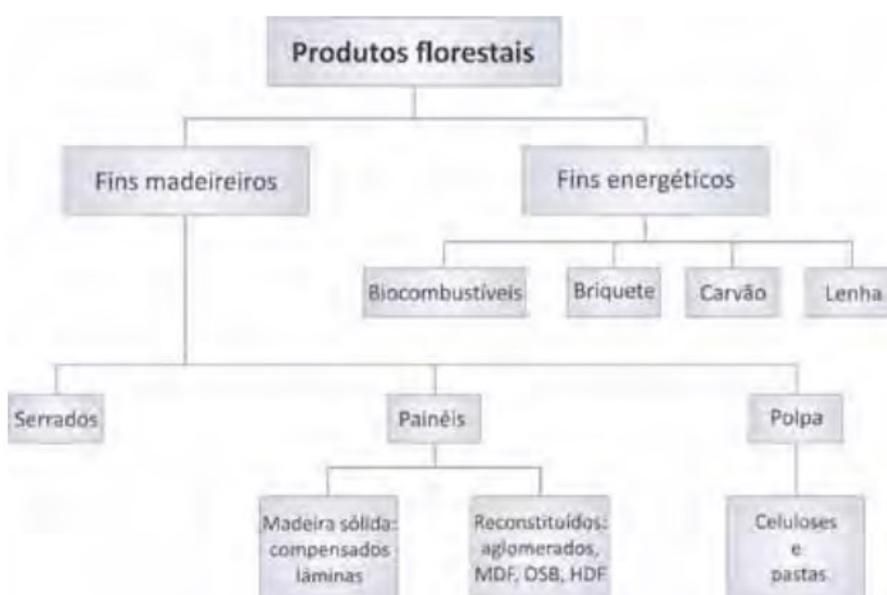


Figura 11: Cadeia produtiva do eucalipto

Fonte: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121607/1/Apostila-Serie-TT-Eucalipto.pdf>

Para o uso em caldeiras é muito comum a realização do processo de cavaqueamento do eucalipto, com o intuito de aumentar a superfície de contato do combustível com o ar, melhorando a combustão, facilitar o manuseio e transporte, favorecer o controle de umidade do combustível, garantir uma queima mais uniforme e com menos emissão de cinzas, além de proporcionar um melhor aproveitamento da madeira como um todo. Algumas etapas do processo de cavaqueamento são representadas na Figura 12.

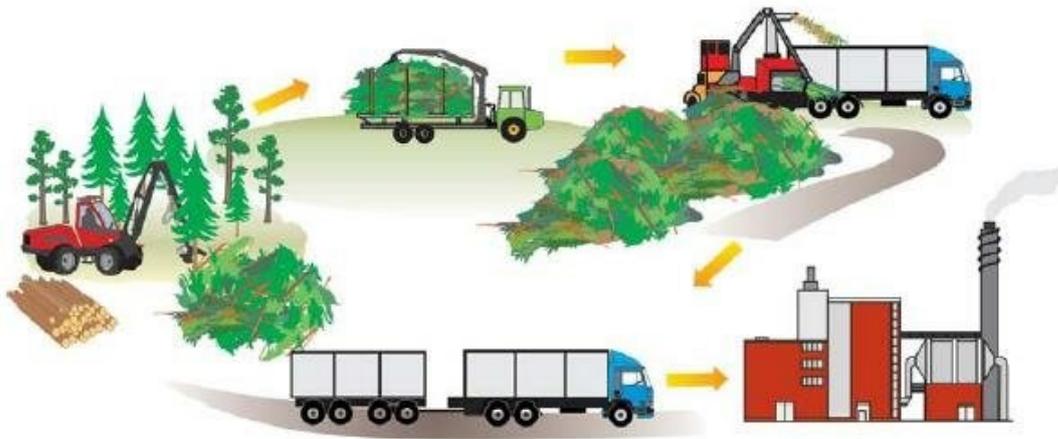


Figura 12: Processo de cavaqueamento do eucalipto

Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Sistema-com-cavaqueamento-nas-margens-de-estradas_fig2_313479127

Apesar da expansão no uso de fontes de energias renováveis na geração de vapor e do cavaco de eucalipto ser significativo como biomassa, as outras demandas de mercado apresentadas anteriormente e, principalmente, a crescente expansão do mercado de papel e celulose do Brasil diante do mundo tem impulsionado a busca por outras alternativas de biomassas, que sejam mais viáveis financeiramente e apresentam menor competitividade com outros mercados.

5.2 O BAGAÇO DE CANA COMO BIOMASSA

Diante da situação descrita anteriormente, uma biomassa que tem se expandido no Brasil é o bagaço proveniente da cana-de-açúcar. Atualmente, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, além do maior exportador de açúcar do mundo. A cana representa grande importância para a economia brasileira, uma vez que é a maior fonte de produção de açúcar, etanol e biomassa.

Através da análise da produção de cana-de-açúcar ao longo dos anos é possível estimar a quantidade de bagaço produzida, para isso, utiliza-se a produção por área colhida e o processamento de cana em cada safra. A partir dessas informações, calcula-se a produção de bagaço respectiva, considerada como 28% da produção de cana-de-açúcar, com 50% de umidade (HOFSETZ e SILVA,2012). Esses dados são apresentados na Imagem 13 a seguir.

Safra/ Brasil	Cana-de-açúcar			Bagaço	
	Produção por área colhida*	Processada (cana molda no setor sucroalcooleiro)*	Não processada no setor sucroalcooleiro	Produção (setor sucroalcooleiro) - 28%	Produção (Outros setores) - 28%
	(Million tons)	(Million tons)	(Million tons)	(Million tons)	(Million tons)
2000/2001	326,121	257,622	68,499	72,134	19,180
2001/2002	344,293	293,051	51,242	82,054	14,348
2002/2003	364,389	320,650	43,739	89,782	12,247
2003/2004	396,012	359,316	36,697	100,608	10,275
2004/2005	415,206	386,090	29,116	108,105	8,152
2005/2006	422,957	387,442	35,515	108,484	9,944
2006/2007	457,246	425,536	31,710	119,150	8,879
2007/2008	549,707	495,795	53,913	138,822	15,096
2008/2009	648,974	571,371	77,603	159,984	21,729
2009/2010	687,077	612,211	74,866	171,419	20,962
2010/2011	719,157	623,905	95,252	174,693	26,670
2011/2012	715,144	560,955	154,189	157,067	43,173
2012/2013	670,758	588,916	81,842	164,896	22,916
2013/2014	739,267	658,822	80,445	184,470	22,525
2014/2015	737,151	634,767	102,384	177,735	28,668
2015/2016	748,636	665,586	83,050	186,364	23,254
2016/2017	768,678	657,184	111,494	184,012	31,218
2017/2018	687,810	633,262	54,548	177,313	15,273
2018/2019	674,179	620,435	53,743	173,722	15,048
2019/2020	667,532	642,718	24,815	179,961	6,948
2020/2021	677,916	654,528	23,389	183,268	6,549
2021/2022	609,282	585,179	24,102	163,850	6,749
2022/2023***	726,130	596,066	130,064	166,899	36,418

Fonte: Elaborada pelos autores, com base em dados do *IBGE (2022), **CONAB (2022) e do Relatório de Pesquisa de Pegoraro (2020).

Notas: ***safra 2022/2023 em andamento; *Perdas* correspondem à cana-de-açúcar calculada como a diferença entre a cana produzida e a cana processada no setor sucroalcooleiro, na safra indicada.

Figura 13: Produção de bagaço com base na produção de cana-de-açúcar

(Fonte: <https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2022P19695A37014O2884.pdf>)

A espécie, que tem origem na Nova Guiné, foi trazida para o Brasil pelos portugueses, que já tinham familiaridade com o cultivo, e se instalou principalmente na região litorânea do território ainda no século XVI. Desde essa época o açúcar, que era muito valorizado no mercado internacional mundial, passou a ser uma das atividades econômicas mais importantes para o então governo português no Brasil. O cultivo da cana seguiu sendo muito importante para o país nos anos seguintes e permaneceu mais forte na região nordeste.

No século XX, com a Segunda Guerra Mundial, houve a expansão da produção para a região Sudeste, motivada pela presença de submarinos alemães que poderiam atrapalhar o escoamento da produção pela região nordeste do país. Outro marco significativo para a expansão da produção da cana-de-açúcar foi a crise do petróleo na década de 1970, o que impulsionou a produção de outros combustíveis. Nesse mesmo contexto, em 1975 teve-se a criação do PROÁLCOOL, um programa do governo brasileiro que incentivava a produção do etanol como uma alternativa aos combustíveis fósseis, o que alavancou ainda mais a produção em todo o resto do território.

Atualmente, com os avanços tecnológicos na área da agricultura com a utilização de drones, equipamentos automatizados, sistemas de irrigação inteligente e o uso de técnicas de melhoramento genético, o cultivo e produção da cana-de-açúcar segue aumentando no Brasil. Além da demanda mundial pela cana e açúcar brasileiros, a busca por alternativas mais sustentáveis e fontes de energias renováveis fortalecem o cultivo e a expansão, que encontra clima e solo favoráveis. Diante disso, tem-se também uma grande produção de bagaço de cana, o qual, como resíduo pode ser reaproveitado, diminuindo os descartes, bem como proporcionando um aproveitamento financeiro maior da produção na medida em que se torna um subproduto comercializável.

Sendo assim e considerando todos os conceitos teóricos apresentados, serão realizados os estudos econômicos e operacionais para a análise da viabilidade da substituição do cavaco de eucalipto por bagaço de cana-de-açúcar como combustível em uma caldeira de uma planta de processamento de soja.

6 ANÁLISE PARA TROCA DE COMBUSTÍVEL

Diante dos fatores apresentados acima, bem como com a incessante busca por sustentabilidade, foi proposto a realização de um teste que visa analisar a viabilidade para a troca do combustível em uma caldeira alimentada com biomassa. O teste foi realizado em uma planta de processamento de soja na cidade de Uberlândia e teve a duração de 4 dias, período em que ocorreu a substituição gradual do cavaco de eucalipto pelo bagaço de cana, ocorrendo testes com misturas de diferentes porcentagens das biomassas.

A planta contempla todo o processamento do grão para a produção de óleo de soja tendo seis principais processos, os quais são: recebimento dos grãos; armazenamento e secagem; preparação da soja; extração do óleo; refino do óleo e envase do produto. Para a realização de todos esses processos estima-se um consumo de vapor de 25 a 30 toneladas por hora, sendo imprescindível que a caldeira consiga suprir essa necessidade, uma vez que qualquer parada da planta representa prejuízo.

As características operacionais da caldeira são apresentadas na Tabela 1 e foram levantadas por meio do monitoramento do equipamento, bem como das informações do fabricante.

Tabela 1: Características operacionais da caldeira usada para teste

Capacidade Máxima	40 ton/h
Pressão média do vapor	13 kgf/cm ²
Temperatura média do vapor	194 °C
Média usual de operação	25 – 30 ton/h

6.1 PREPARAÇÃO PARA O INÍCIO DO TESTE

Todas as alterações e adaptações necessárias foram realizadas de forma a garantir a segurança, o bom funcionamento do equipamento e a conformidade com as normas da empresa, bem como com as leis aplicáveis.

Para isso foram realizadas algumas atividades, como:

- Limpeza e checagem geral do equipamento;
- Contratação de uma empresa para monitoramento e medição da emissão de gases e particulados;
- Contratação de uma empresa para ajuste fino na caldeira, principalmente para a regulagem da entrada de ar necessária para a nova reação de combustão;
- Instalação de sensores de movimento e temperatura nas bicas de alimentação com o intuito de monitorar caso o combustível ficasse travado ou pegasse fogo antes de entrar na fornalha;

- Ajuste do bocal de alimentação com o intuito de facilitar a passagem do novo combustível;
- Treinamento dos operadores diante das mudanças advindas da nova biomassa, como a necessidade de uma limpeza mais frequente na grelha e a sopragem da área da caldeira com ar comprimido;
- Alteração no layout de armazenamento de biomassa com o intuito de cumprir as determinações da equipe ambiental e de segurança, as quais determinaram o armazenamento do bagaço em uma área coberta e em montes que não ultrapassassem a altura de 3m;
- Programação de uma média de consumo do bagaço para a organização das entregas com o fornecedor;
- Disponibilização de uma equipe da área térmica e uma da área ambiental para acompanhamento do teste todos os dias.

6.2 CAVACO DE EUCALIPTO x BAGAÇO DE CANA

Anteriormente, foram expostas algumas características de mercado e o contexto dessas biomassas no Brasil, fatores que foram essenciais para a decisão de realizar o teste para a troca. Contudo, um fator importante é a análise das propriedades físico-químicas de cada combustível, fatores que influenciam diretamente na eficiência da caldeira, no retorno financeiro, no tratamento de água, na rotina operacional e nas medidas de segurança das pessoas, equipamentos e meio ambiente. Para isso, foram enviadas amostras das duas biomassas para um laboratório, o qual realizou avaliação de porcentagem de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, enxofre, cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, bem como a determinação do poder calorífico superior e inferior (PCS e PCI, respectivamente). Esse último foi feito tanto para o material seco, ou seja, para as amostras após o processo de retirada da umidade quanto para as amostras como foram enviadas, considerando a umidade.

O laboratório responsável pelas análises apresentou os laudos de calibração dos equipamentos utilizados e as normas utilizadas para cada determinação. Para o carbono, hidrogênio e nitrogênio foi usada a ASTM D5373-16, método A, teor de cinza pela ASTM D1102-84; o carbono fixo pela ASTM D3172-13, os materiais voláteis pela ASTM D1762-84 (13) e os poderes caloríficos por meio da norma ASTM D5865/D5865M-19.

Os dados comparativos são apresentados nas Tabelas 2 e 3 a seguir:

Tabela 2: Comparativo de biomassas para o material seco

Material Seco	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana	Δ
Carbono (% em massa)	49,57	48,2	-1,37
Hidrogênio (% em massa)	6,16	6,30	+0,14
Nitrogênio	0,20	0,40	+0,20
Oxigênio	43,97	42,90	-1,07
Enxofre	<0,1	<0,1	0,0
Cinzas (% em massa)	0,1	2,2	+2,1
Materiais Voláteis (% em massa)	82,30	81,7	-0,6
Carbono fixo (% em massa)	17,60	16,1	-1,5
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	19,63	19,10	-0,53
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	18,31	17,74	-0,54

Tabela 3: Comparativo de biomassas para o material como recebido

Material como recebido	Cavaco de eucalipto (Umidade média de 33%)	Bagaço de cana (Umidade média de 52%)
Poder Calorífico Superior MJ/kg	13,16	10,31
Poder Calorífico Inferior MJ/kg	11,48	8,47

A partir da análise da composição química, é possível notar que as variações são relativamente sutis, o que permitiu a realização do teste. É notável que a maior variação diz respeito ao teor de cinzas, contudo, apesar dessa diferença, as medições da emissão de gases e particulado serão capazes de mostrar se a quantidade de cinzas gerada pela combustão do bagaço de cana ultrapassa a Deliberação Normativa Copam nº 187 de 19 de setembro de 2013, do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais.

Além disso, é importante destacar que o poder calorífico do bagaço de cana é menor que o do cavaco de eucalipto, o que resulta em um consumo maior de bagaço para a produção da mesma quantidade de energia, contudo, é necessário levar em consideração também questões

como o valor da tonelada, o frete e custos operacionais para a determinação da viabilidade de cada combustível. Uma análise mais aprofundada será feita ao final deste capítulo.

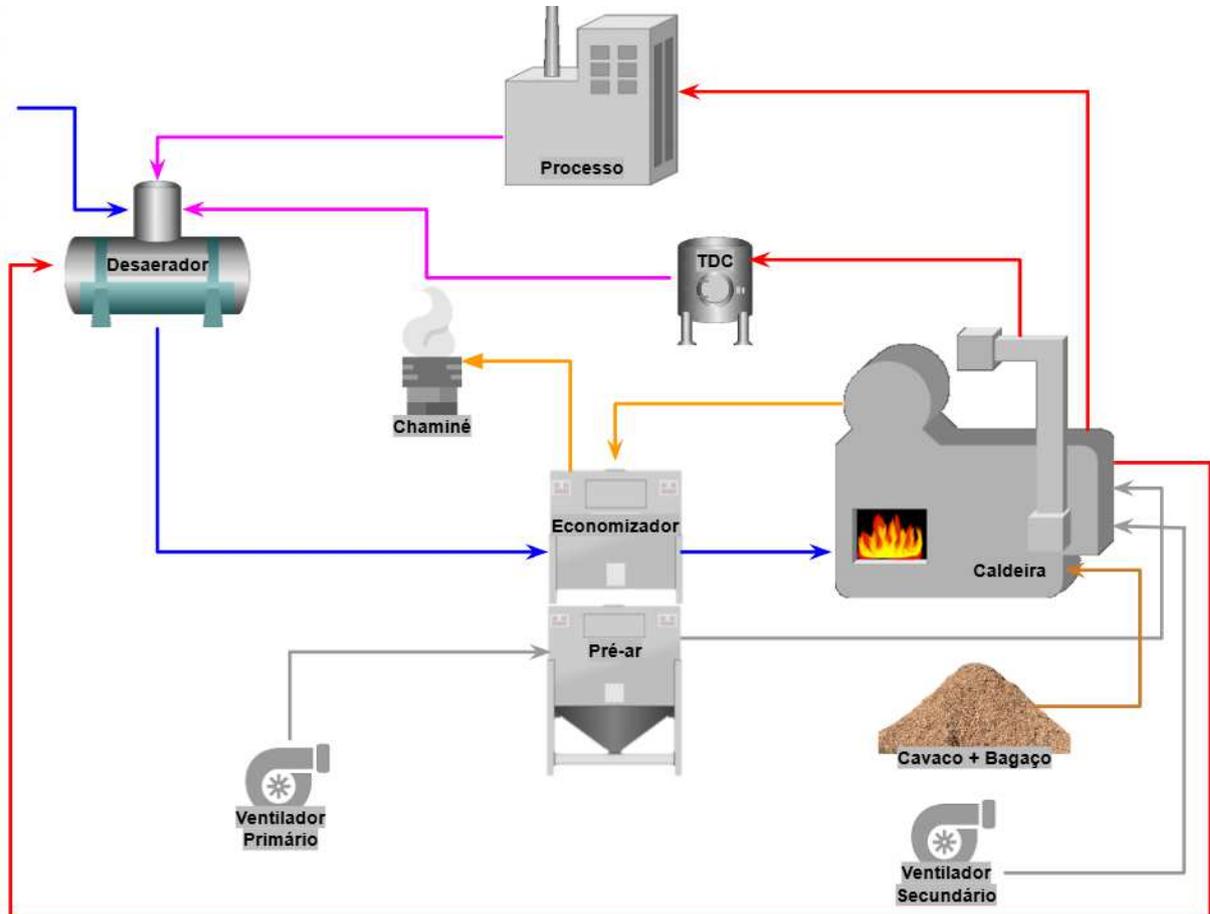
6.3 CALDEIRA UTILIZADA PARA TESTE

A caldeira utilizada para teste é do modelo BMP-40-A, do tipo aquatubular, e foi fabricada pela empresa M. DEDINI S/A em 1982, tem produção de vapor original de 40 ton/h e de trabalho de 30 ton/h, além disso, a pressão de operação original é de 21,0 kgf/cm² e de trabalho é 13,0 kgf/cm². O equipamento tem PMTA (pressão máxima de trabalho admissível) de 36,0 kgf/cm² e pressão do teste hidrostático igual à 39,0 kgf/cm², em relação à temperatura do vapor, a original é de 214°C e a de trabalho é um pouco inferior e igual a 195°C, com potência nominal de 20,6 MW. Por fim, o volume da câmara de combustão é de 175 m³, a superfície de aquecimento corresponde a 1165 m² e o volume de água é de 38,02 m³. Na Figura 14 é possível ver uma imagem da caldeira descrita.



Figura 14: Foto da caldeira em que foi realizada o teste

A partir dos equipamentos e sistema da caldeira, foi feito um fluxograma representativo apresentado na Figura 15.



LEGENDA

- Vapor
- Gases da Combustão
- Água
- Ar
- Combustível
- Condensado de Retorno

Figura 15: Fluxograma de funcionamento da caldeira

6.3.1. Ar Atmosférico

O ar atmosférico é captado pelo ventilador primário e vai para o pré-ar, equipamento em que ocorre a troca de calor entre o ar e os gases provenientes da combustão na fornalha, dessa

maneira, o ar já entra na câmara de combustão com uma certa temperatura e ganho energético para a reação de combustão. Além disso, no ventilador secundário tem-se a captação do ar que será usado nos bicos espargidores, os quais têm como função de fazer o espalhamento adequado e uniforme do combustível na fornalha, o ar também será utilizado nos bicos sopradores que fazem a limpeza da grelha.

6.3.2. Água e Condensado de Retorno

A água que será utilizada para a geração do vapor é, antes de tudo tratada, conforme descrito anteriormente na seção específica sobre tratamento de água, a fim de garantir o bom funcionamento dos equipamentos. Após esse processo, é bombeada para o desaerador, onde tem-se também o condensado de retorno do processo e do tanque de descarga contínua da caldeira, esse condensado é proveniente da condensação do vapor após a perda de energia no processo e na descarga.

No desaerador, utiliza-se do próprio vapor produzido pela caldeira para pré - aquecer a água a fim de reduzir a solubilidade dos gases dissolvidos, principalmente do oxigênio. Após esse processo, a água vai para o economizador, que, como descrito anteriormente, aumenta ainda mais a temperatura da água por meio da troca de calor com os gases de combustão. Por fim, a água é bombeada para o tubulão superior, onde será conduzida ao conjunto de feixes tubular que passa dentro da fornalha, essa água faz o movimento de descida e subida nos feixes recebendo calor da reação de combustão e retorna ao tubulão superior já na forma de vapor.

6.3.3. Combustível

Como já pontuado, o combustível utilizado na realização desse teste foi uma mistura do cavaco de eucalipto com o bagaço de cana, com o intuito de acompanhar as alterações do equipamento com o uso de outra biomassa de maneira progressiva.

O cavaco de eucalipto seguiu sendo armazenado da mesma maneira de antes, em um pátio aberto e em pilhas de aproximadamente 30 toneladas espaçadas entre si. O bagaço de cana, por ser uma biomassa que passa pelo processo de fermentação natural, potencializando a combustão espontânea além da produção de um chorume que contamina o solo, precisou ser armazenado

em uma área coberta e menor, com calçada e em menor quantidade, tendo sua temperatura monitorada a cada hora.

Para o teste, foram feitas pilhas de mistura das biomassas, as quais eram feitas sob demanda de alimentação da caldeira e armazenadas ao lado do armazém de bagaço. As proporções eram determinadas pela pá carregadeira, pois foi uma maneira mais simples e aproximada adotada para o experimento. Desse modo, o operador juntava 6 pás de cavaco e 2 pás de bagaço, realizava a mistura da pilha e assim tinha-se a mistura a ser testada, nesse exemplo, um mix 25% bagaço de cana e 75% cavaco de eucalipto. Esse mix era alimentado diretamente na rosca de alimentação e subia pelas esteiras até as bicas de alimentação da caldeira onde caíam na fornalha para a combustão.

6.3.4. Vapor

O vapor é produzido através da vaporização da água, processo descrito anteriormente e armazenado no tubulão de vapor, depois é conduzido para a fábrica e utilizado em diversos processos, grande parte desse vapor perde energia e condensa, retornando ao desaerador como condensado e utilizado novamente no ciclo de produção de vapor. Além disso, o vapor produzido também é usado para aquecimento no desaerador e no tanque de descarga contínua da caldeira.

6.3.5. Gases de Combustão

Os gases de combustão são usados para a troca de calor com o ar no pré - aquecedor de ar, como descrito anteriormente, mas também para troca de calor com a água no economizador. Assim, a água já adentra a fornalha com um certo ganho de temperatura, o que diminui a quantidade de energia necessária na vaporização e, conseqüentemente, a quantidade de combustível consumida. Dessa maneira, como os gases saem quentes da fornalha e esse calor seria desperdiçado e jogado para fora, utiliza-se a troca de calor com o intuito de melhorar a condição dos elementos da reação de combustão, reaproveitando a energia e gerando economias.

É importante destacar, que após todo o processo descrito acima, os gases são lançados na atmosfera através da chaminé, contudo, por questões ambientais os gases não podem ser

jogados diretamente na atmosfera. Sendo assim, essa caldeira utilizada conta com um sistema de multiciclones, onde os gases são submetidos à uma movimentação centrífuga, separando o material particulado maior e mais pesado dos gases, o material particulado é descartado juntamente com as cinzas e os gases liberados para a atmosfera.

6.4 BALANÇO ENERGÉTICO PARA A CALDEIRA

A partir do fluxograma acima, foram coletadas as propriedades termodinâmicas em cada ponto e organizado um fluxograma mais simplificado dos equipamentos, o qual é apresentado na Figura 16 e foi utilizado para o cálculo do balanço energético de cada ponto, feito no software EES.

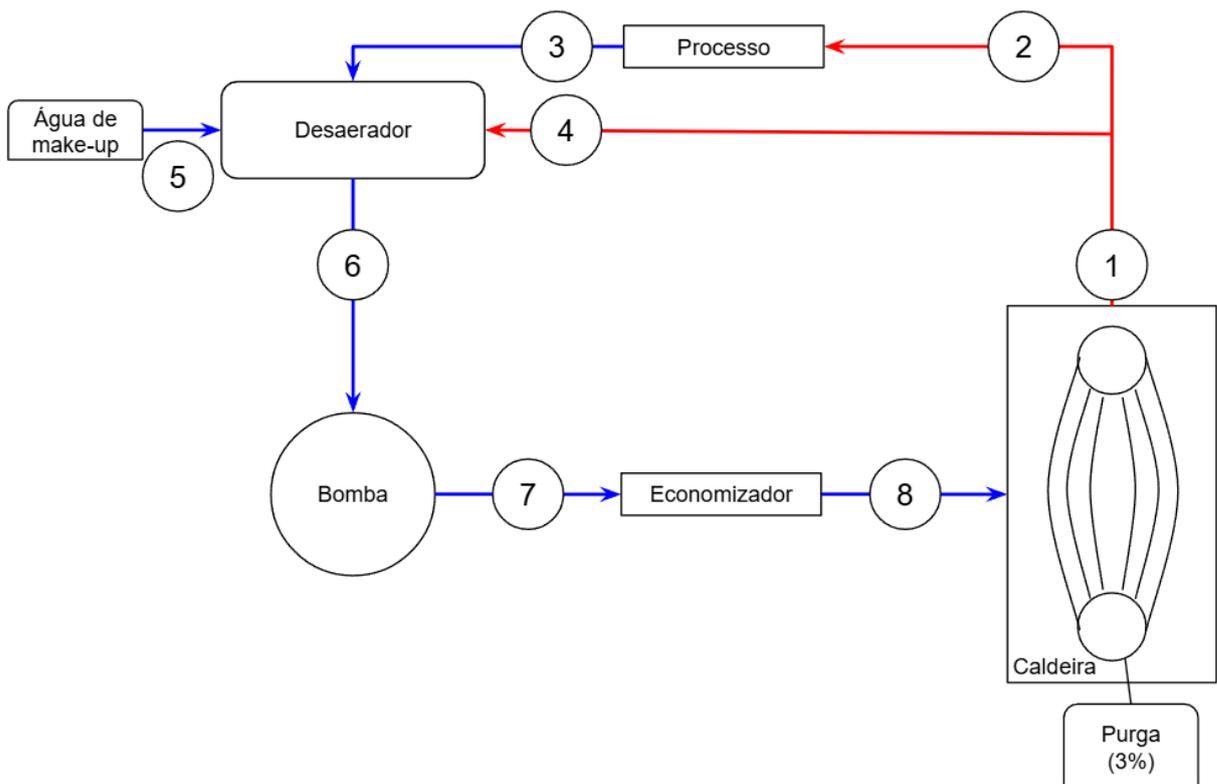


Figura 16: Fluxograma da caldeira

As propriedades termodinâmicas em cada ponto foram calculadas no software EES usando como fluido termodinâmico a água (Steam_IAPWS) e organizadas na Tabela 4. O código utilizado para cálculo se encontra no Apêndice A.

Tabela 4: Propriedades Termodinâmicas em cada ponto

Sort	1 h_i [kJ/kg]	2 P_i [bar]	3 Pk_i [kgf/cm ²]	4 s_i [kJ/kg-°C]	5 T_i [°C]	6 x_i	7 \dot{m}_i
[1]	2773	9,002	8,21	6,621	175,4	100	28000
[2]	2774	8,512	7,71	6,648	174,4	100	25200
[3]	293,4	4,874	4	0,9549	70	-100	10080
[4]	2774	8,512	7,71	6,648	174,4	100	2800
[5]	63,45	4,874	4	0,2244	15	-100	15986
[6]	441	10,76	10	1,363	105	-100	28866
[7]	441,1	11,74	11	1,362	105	-100	28866
[8]	566,6	11,74	11	1,682	134,6	-100	28866

6.5 RESULTADOS

No primeiro dia de teste, foram testadas três misturas de biomassa, nas proporções de 7%, 12,5% e 25% de bagaço de cana. Os mixes iniciais não demonstraram nenhuma mudança significativa no funcionamento da caldeira, e performaram por cerca de 5h sem nenhuma alteração da vazão de vapor e nenhuma queda de pressão. Com o sucesso das primeiras misturas, optou-se por aumentar a quantidade de bagaço de cana para 25%.

Essa nova condição não gerou nenhuma dificuldade nos primeiros 30 minutos, contudo, o aumento na proporção de bagaço de cana acabou por esbarrar em uma limitação operacional. O ajuste do *header* das bicas de alimentação, bem como o comprimento, largura e inclinação das mesmas, passaram a ser um empecilho para a entrada do novo combustível na caldeira, o qual acabava por ficar preso, situação que era acompanhada pelos sensores de movimento que foram instalados para a realização da testagem. Diante dessa situação, houve a falta de combustível na fornalha, o que ocasionou uma queda na pressão da caldeira, afetando diretamente a planta de processamento de soja. Essa situação foi contornada por meio de um ajuste na abertura do *header* das bicas de alimentação e o monitoramento constante para o desentupimento caso necessário. Na Figura 17 é possível visualizar o ajuste do *header* e na Figura 18 visualizar os sensores de movimento utilizados para o monitoramento.



Figura 17: Ajuste manual *header*



Figura 18: Instalação dos sensores de movimento das bicas de alimentação

Outro parâmetro determinante para a homologação do teor de bagaço de cana que poderia ser utilizado foi a questão ambiental, visto que é de suma importância atender às leis ambientais de emissão de gases e particulados. O material particulado coletado e o filtro para o teor de 25% podem ser vistos a seguir na Figura 19.



Figura 19: Material particulado e filtro para a proporção de 25% de bagaço de cana

No segundo dia de teste, inicialmente, a caldeira seguiu com o mesmo mix de 25% do dia anterior, com a situação das bicas de alimentação praticamente controladas e com o ajuste do *header*. Diante disso, houve um aumento da quantidade de bagaço de cana para 30% e depois de 1h sem demais problemas, a mistura aumentou para 42%, sem grandes diferenças e dificuldades, o que encorajou a passagem para o uso de uma mistura de 50% bagaço de cana e 50% cavaco de eucalipto.

Nesse novo cenário, foi possível manter a caldeira em funcionamento, contudo, era muito demandada a presença de um operador desentupindo as bicas constantemente sempre que era detectado a parada da movimentação pelos sensores. Diante dessa dificuldade, foi necessário realizar uma pequena manutenção nas bicas com o intuito de facilitar a movimentação do bagaço, que é um combustível mais úmido e que se junta mais que o cavaco. Foi feito o lixamento da parte interna das bicas com o intuito de diminuir qualquer quina ou deformidade por conta de chapas de reforço que haviam sido colocadas anteriormente, para que o interior da bica ficasse mais uniforme.

Sendo assim, mesmo com as dificuldades foi possível manter a caldeira em funcionamento com a mistura de 50% de combustível, tempo suficiente para a coleta do material particulado e valores de emissão de gases. Na figura 20 é possível notar o grande aumento da quantidade de material particulado coletado, bem como a mudança na condição do filtro quando comparado com o teor de 25% de bagaço de cana.



Figura 20: Material particulado e filtro para a proporção de 50% de bagaço de cana

Outro desafio que passou a ser mais evidente com o aumento da quantidade de bagaço como combustível foi o aumento da sujeira na área externa próxima a caldeira. Como o bagaço é bem mais fino e leve que o cavaco de eucalipto, gera muito material em suspensão, o qual passou a se depositar no chão, nos equipamentos e nas esteiras de alimentação. Nesse sentido, passou a ser essencial a presença de um operador dedicado à manutenção da limpeza da área.

Já no terceiro dia de teste, a mistura inicial utilizada foi a de 50% com a intenção de aumentar ainda mais a quantidade de bagaço de cana de maneira gradual. Mesmo com as dificuldades, partiu-se para o uso de um mix de 75% bagaço de cana e 25% cavaco de eucalipto, o que foi extremamente desafiador desde o início, contudo, optou-se por manter um operador 100% do tempo próximo às bicas de alimentação para realizar o desentupimento quando necessário. Esse processo ocorreu para que fosse possível realizar as medições de material particulado e emissão de gases para verificar se após a realização de melhorias operacionais ainda seria autorizado o uso dessa mistura.

No geral, a caldeira apresentou grandes instabilidades, queda da pressão e vazão de vapor com essa quantidade de bagaço de cana, devido à falta de combustível na fornalha pelo problema com as bicas. Além disso, mesmo sem os resultados de material particulado e emissão de gases, era visível a alteração na coloração da fumaça que saía da chaminé, foi feito o teste do Anel de *Ringelmann* como na Figura 21 e efetivamente comprovada uma coloração acima do nível 2 que é a máxima autorizada.



Figura 21: Medição do nível da fumaça com Anel de Ringelmann para a proporção de 75% de bagaço de cana

Diante dos desafios e da fumaça fora dos parâmetros com o mix de 75%, no quarto dia o foco do teste foi utilizar um bagaço de qualidade inferior para ver se haveria algum desdobramento negativo, assim, foi utilizado um bagaço mais velho, mais fermentado e mais úmido na proporção de 50% de bagaço e 50% cavaco de eucalipto. No geral, o comportamento da caldeira não apresentou diferenças significativas independente da qualidade da biomassa, tendo o mesmo comportamento do que com o bagaço utilizado no dia 2.

Nesse mesmo dia, por ser o último dia do teste foi notado mais uma vez o grande acúmulo de bagaço na área da caldeira, com atenção para regiões muito próximas à fornalha, em que uma faísca advinda de uma pequena fresta na parede da caldeira poderia provocar um incêndio localizado. Para isso, foi feita uma limpeza maior e o levantamento do problema para uma futura melhoria.

Diante de tudo isso, foi possível perceber a limitação operacional do equipamento quanto ao uso de uma mistura das duas biomassas, sendo a máxima proporção de 25% de bagaço de cana e 75% de cavaco de eucalipto, já com algumas necessidades de melhoria. Além disso, foi feita

uma comparação da concentração de material particulado e dos níveis de emissão de gases (óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono) para cada uma das misturas.

Para o cálculo dos valores de referência foi utilizada a Deliberação Normativa Copam nº 187 de 19 de setembro de 2013, do Conselho Estadual de Política Ambiental de Minas Gerais considerando que o bagaço de cana se enquadra na categoria de biomassa de cana-de-açúcar e o cavaco de eucalipto em derivados de madeira. Conforme a potência nominal de 20,6 MW, considerando que o equipamento se enquadra como gerador de calor existente e com o uso das tabelas I-C e I-D da norma para o bagaço e cavaco, respectivamente, foram obtidos os limites apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de referência conforme DN- Copam nº 187

Biomassa	Material Particulado (mg/Nm³)	CO (mg/Nm³)	NOx (mg/Nm³)
Biomassa de cana-de-açúcar	520	1300	350
Derivados de madeira	200	3250	650

Para a biomassa de cana-de-açúcar foi utilizado o valor de concentração de CO da potência nominal imediatamente anterior à faixa analisada e a concentração de NOx foi correspondente a da faixa imediatamente posterior, uma vez que para o *range* de 10 MW a 50 MW não há valor de referência para a emissão de gases. Já para derivados de madeira, foi utilizada apenas a concentração de CO de referência da faixa imediatamente anterior.

Com esses valores foi feita uma média ponderada, conforme descrito na DN nº 187, para a obtenção de um valor máximo de referência autorizado para cada mix. A fórmula utilizada é apresentada abaixo e os valores de referência foram colocados nos gráficos juntamente com os resultados obtidos.

$$LEt = \frac{\sum_1^n (LE * C * PCI)}{\sum_1^n (C * PCI)}$$

Em que:

LEt = limite de emissão para a instalação mista;

LE = limite de emissão cada combustível utilizado;

C = consumo de cada combustível utilizado;

PCI = poder calorífico inferior de cada combustível utilizado
n = número de combustíveis utilizados na instalação

Para a medição da emissão de gases foi utilizado o CIPA (Coletor Isocinético de Poluentes Atmosféricos), o qual se configura como um conjunto de equipamentos utilizados para a coleta de poluentes em dutos e chaminés de fontes de emissão atmosférica. O equipamento possui esse nome porque retira a amostra do interior da fonte na mesma velocidade em que os gases passam na seção de amostragem de interesse. Na figura 22 é possível visualizar o equipamento utilizado durante o teste. Além disso, é importante destacar que a calibração do equipamento e os ensaios realizados para a obtenção dos resultados seguem a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 - Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração de 2017.



Figura 22: CIPA utilizado para medição das emissões de gases

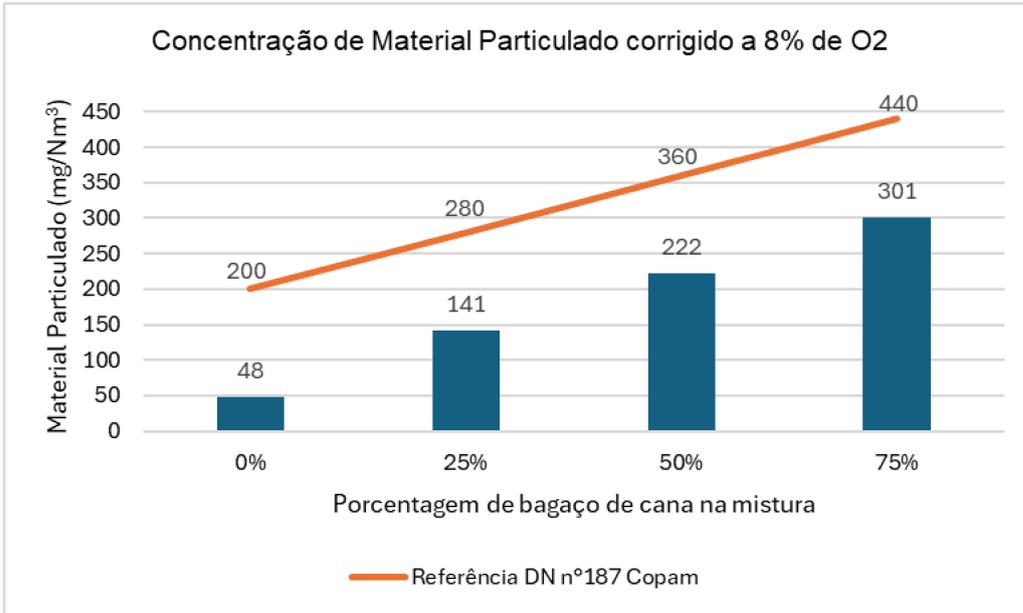


Figura 23: Gráfico comparativo da concentração de material particulado

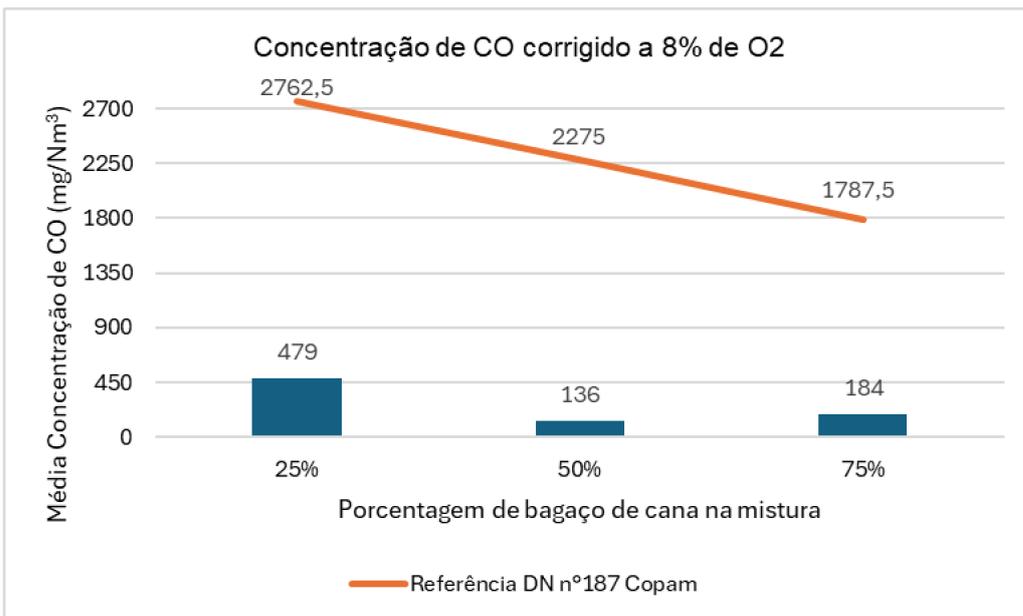


Figura 24: Gráfico comparativo da concentração de CO

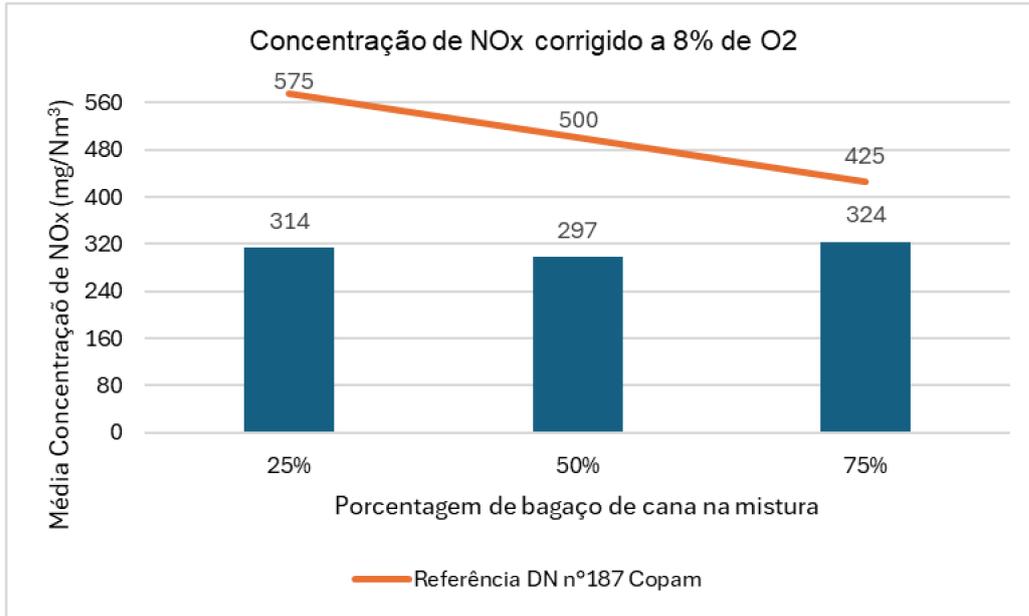


Figura 25: Gráfico comparativo da concentração de NOx

Por meio dos gráficos, é notável que o nível de emissão de gases e de material particulado se encontram dentro do autorizado pela legislação para todas as proporções de mistura das biomassas de eucalipto e bagaço. Contudo, é importante também levar em consideração as limitações operacionais do equipamento percebidas ao longo do teste para a análise da viabilidade da troca do combustível.

Após a finalização dos quatro dias de teste, iniciou-se a etapa de análise dos dados e informações coletadas, a elaboração de relatórios para as áreas da empresa, o levantamento das melhorias e investimentos necessários e o cálculo da viabilidade financeira para o uso de uma mistura de biomassa de bagaço de cana e cavaco de eucalipto como combustível.

6.6 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Como discutido acima, todas as misturas atenderam aos valores máximos estabelecidos pela legislação ambiental. Contudo, como mencionado anteriormente, alguns desafios operacionais foram enfrentados, dificultando a adoção de um mix superior às proporções de 25% bagaço de cana e 75% de cavaco de eucalipto. Além disso, é necessário que o bagaço de cana seja armazenado de maneira adequada, em área coberta, principalmente em período chuvoso, em montes menores e bem espaçados, em área monitorada por conta de incêndios espontâneos e com solo adequado para evitar contaminação. Considerando esses fatores, foi feito o estudo de

dois cenários, o primeiro considerando o uso do equipamento nas condições do teste e adotando o mix com 25% de bagaço de cana, com investimentos pontuais de melhoria do equipamento. No segundo cenário foi adotada a melhor opção, sendo 75% de bagaço de cana, para isso são necessários investimentos mais significativos que adequem melhor o equipamento para o novo combustível.

6.6.1. Investimentos Necessários

Para cada um dos cenários foram levantados os investimentos necessários a fim de melhorar a performance da caldeira, facilitar a operação, garantir medidas de segurança e atender às normativas ambientais. Os investimentos necessários para o cenário 1 podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6: Investimentos necessários para o cenário 1

Item	Valor
Desagregadores para rosca de alimentação	R\$ 25.000,00
Troca do visor da fornalha	R\$ 120.000,00
Cobertura do sistema de esteiras de alimentação	R\$ 300.000,00
Transmissor de pressão dos bicos de sopragem da grelha	R\$ 50.000,00
Assistente de limpeza temporário	R\$ 10.000,00
Operador de caldeira	R\$ 37.000,00
TOTAL	R\$ 542.000,00

É possível ver que os itens levantados no cenário 1 buscam melhorar a operação no geral, com mais pessoas, melhorar o monitoramento das condições do equipamento com novo sensor e visor e mitigar o problema da sujeira e bagaço de cana em suspensão por meio de um funcionário temporário até que a cobertura das esteiras de alimentação seja concluída. Já para o cenário 2, como pode ser visto na Tabela 7, levantou-se os gastos para preparo do solo e construção de um barracão para armazenamento de bagaço de cana, uma vez que será necessário um volume bem maior da biomassa com o uso da proporção de 75%, além de medidas para melhorar os problemas enfrentados com a alimentação do novo combustível na fornalha.

Tabela 7: Investimentos necessários para o cenário 2

Item	Valor
Vibradores pneumáticos para as bicas	R\$ 110.000,00
Desagregadores para <i>header</i> de alimentação	R\$ 40.000,00
Compactação do solo	R\$ 2.950.000,00
Barracão para armazenamento de combustível	R\$ 2.500.000,00
TOTAL	R\$ 5.600.000,00

É importante destacar que o bagaço de cana é uma biomassa sazonal, sendo necessário a preparação para a compra de um certo estoque que cubra os períodos do ano em que o bagaço não é produzido, sendo assim, o barracão para armazenamento acaba sendo um investimento necessário para que haja uso do bagaço durante todos os meses do ano.

6.6.2. Consumo de Combustível

Para cálculo da viabilidade financeira é imprescindível calcular o consumo total de combustível para o cenário anterior, caldeira operando apenas com cavaco de eucalipto, para o cenário 1 (25% de bagaço) e para o cenário 2 (75% de bagaço). Para isso, foi feito o balanço de energia para caldeira conforme dados de entalpia calculados anteriormente e considerando uma produção de 28000 kg/h de vapor.

$$Q_H = m_1 * h_1 + m_{purga} * h_1 - m_8 * h_8$$

$$Q_H = 28000 * 2773 + 866 * 2773 - 28866 * 566,6$$

$$Q_H = 6369 * 10^4 \text{ kJ/h (Eq.13)}$$

Assim, é possível calcular a vazão necessária de combustível por hora para cada um dos cenários, foi considerada uma eficiência ao PCI do combustível de 86%, conforme manual do fabricante. Além disso, os dados considerados para os cálculos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Propriedades consideradas para o cálculo de consumo de combustível

Propriedade	Cavaco de Eucalipto	Bagaço de cana
Umidade média (%)	33	52
Densidade média (kg/m ³)	290	250

PCI (kJ/kg)	11480	8470
-------------	-------	------

- **CASO 1: 100% cavaco de eucalipto**

$$\eta = \frac{Q_H}{v_{cavaco} * \rho_{cavaco} * PCI_{cavaco}}$$

$$0,86 = \frac{6369 * 10^4}{v_{cavaco} * 290 * 11480}$$

$$v_{cavaco} = 22,25 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.14)}$$

- **CASO 2: Cenário 1 - 75% cavaco de eucalipto + 25% bagaço de cana**

$$\eta = \frac{Q_H}{(0,25 * v_{mix1} * \rho_{bagaço} * PCI_{bagaço}) + (0,75 * v_{mix1} * \rho_{cavaco} * PCI_{cavaco})}$$

$$0,86 = \frac{6369 * 10^4}{(0,25 * v_{mix1} * 250 * 8470) + (0,75 * v_{mix1} * 290 * 11480)}$$

$$v_{mix1} = 24,47 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.15)}$$

Sendo que:

$$v_{cavaco} = v_{mix1} * 0,75 = 18,35 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.16)}$$

$$v_{bagaço} = v_{mix1} * 0,25 = 6,12 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.17)}$$

Sendo assim, é possível notar que com o uso do mix do cenário 1, a vazão total de combustível por hora aumenta em 2,22 m³, ou seja, um aumento de 9,98%. Contudo, considerando apenas a vazão de cavaco por hora tem-se uma redução de 3,9 m³, o que corresponde a 17,53 %.

- **CASO 3: Cenário 2 - 25% cavaco de eucalipto + 75% bagaço de cana**

$$\eta = \frac{Q_H}{(0,75 * v_{mix2} * \rho_{bagaço} * PCI_{bagaço}) + (0,25 * v_{mix2} * \rho_{cavaco} * PCI_{cavaco})}$$

$$0,86 = \frac{6369 * 10^4}{(0,75 * v_{mix2} * 250 * 8470) + (0,25 * v_{mix2} * 290 * 11480)}$$

$$v_{mix2} = 30,60 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.18)}$$

Sendo que:

$$v_{cavaco} = v_{mix2} * 0,25 = 7,65 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.19)}$$

$$v_{bagaço} = v_{mix2} * 0,75 = 22,95 \text{ m}^3/h \text{ (Eq.20)}$$

Conforme as contas acima para o cenário 2, a vazão total de combustível por hora aumenta em $8,35 \text{ m}^3$, ou seja, um aumento de 37,53%. Contudo, considerando apenas a vazão de cavaco por hora tem-se uma redução de $14,6 \text{ m}^3$, o que corresponde a 65,62 %.

6.6.3. Cálculo da economia com combustível

Para calcular o valor economizado com o uso da mistura em substituição ao uso apenas do cavaco de eucalipto, foi considerado o consumo de cada combustível, calculado anteriormente, bem como o valor por m^3 apresentado na Tabela 9.

Tabela 9: Valor por m^3 de biomassa

Biomassa	Preço (R\$/$\text{m}^3$)
Cavaco de Eucalipto	181,17
Bagaço de cana	30,00

Além disso, foi considerado que a fábrica funciona 24h/dia e apenas 11 meses por ano, uma vez que um mês é utilizado para a parada de manutenção geral. O cálculo dos gastos com combustível para o Caso 1, operando apenas com o cavaco de eucalipto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Custo com combustível para o Caso 1

CASO 1 – 100% cavaco de eucalipto	
Biomassa	Cavaco de eucalipto
Porcentagem (%)	100
Consumo (m^3/h)	22,25
Valor por hora (R\$)	4.031,03
Valor por dia (R\$)	96.744,78
Valor por mês (R\$)	2.902.343,40
Valor por ano (R\$)	31.925.777,40

Já para o Caso 2, os dados foram organizados na Tabela 11.

Tabela 11: Custo com combustível para o Caso 2

CASO 2 – Cenário 1: 75% cavaco de eucalipto + 25% bagaço de cana			
Biomassa	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana	Mix total
Porcentagem (%)	75	25	-
Consumo (m³/h)	18,35	6,12	24,47
Valor por hora (R\$)	3.324,92	183,53	3.508,45
Valor por dia (R\$)	79.790,14	4.404,60	84.202,47
Valor por mês (R\$)	2.393.944,15	132.138,00	2.526.082,15
Valor por ano (R\$)	26.333.305,61	1.453.518,00	27.786.903,61

Na Tabela 12 são mostrados os dados para o Caso 3.

Tabela 12: Custo com combustível para o Caso 3

CASO 3 – Cenário 2: 25% cavaco de eucalipto + 75% bagaço de cana			
Biomassa	Cavaco de eucalipto	Bagaço de cana	Mix total
Porcentagem (%)	25	75	-
Consumo (m³/h)	7,65	22,95	30,60
Valor por hora (R\$)	1.385,95	688,50	2.074,45
Valor por dia (R\$)	33.262,81	16.524,00	49.786,81
Valor por mês (R\$)	997.884,36	495.720,00	1.493.604,36
Valor por ano (R\$)	10.976.727,96	5.452.920,00	16.429.647,96

Assim, é possível calcular a economia alcançada com a adoção do bagaço de cana de acordo com cada cenário, os valores são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Economia com o uso do bagaço de cana.

ECONOMIA		
Cenário	1	2
Porcentagem de bagaço (%)	25	75

Porcentagem de cavaco (%)	75	25
Economia por hora (R\$)	522,59	1.956,58
Economia por dia (R\$)	12.542,04	46.957,97
Economia por mês (R\$)	376.261,25	1.408.739,04
Economia por ano (R\$)	4.138.873,79	15.496.129,44

Desse modo, no cenário 1 (25% de bagaço) tem-se uma economia anual de R\$ 4.138.837,79 somente com o uso da mistura de bagaço de cana com cavaco de eucalipto, isso representa uma redução de 12,96% nos gastos com combustível. Para o cenário 2 (75% de bagaço) a economia anual é de R\$ 15.496.129,44, o equivalente a uma redução de 48,54% nas despesas com combustível. Sendo assim, ambos os casos reduzem o custo do vapor e, conseqüentemente, o custo de produção, impactando também os lucros com o produto final.

Contudo, mesmo que os cenários propostos sejam positivos, é importante considerar, como foi elencado anteriormente, os investimentos necessários. Nesse sentido, para o cenário 1 o retorno financeiro se daria em menos de 2 meses e para a cenário 2 esse tempo seria de aproximadamente 4 meses, considerando que o investimento é bem maior, mas a economia também é significativamente maior. Além disso, os investimentos do cenário 2 garantem o volume maior de bagaço de cana durante o ano todo, mesmo durante o período chuvoso.

7 CONCLUSÃO

Conforme os dados apresentados ao longo do trabalho, dos resultados obtidos e da viabilidade financeira, é possível concluir que o teste para uso da mistura de bagaço de cana e cavaco de eucalipto foi bem-sucedido para a planta de processamento de soja. Mesmo com uma pequena diferença de 3,01 kJ/kg entre o PCI das biomassas, foi possível obter a quantidade de energia necessária para a produção dos 28000 kg de vapor por hora de maneira mais econômica devido à grande diferença de preço. Além disso, a composição química dos combustíveis não é muito discrepante, a não ser pelo teor de cinzas, o qual demanda atenção para a medição de material particulado, mas não se configurou como um problema, visto que a emissão de material particulado e gases se manteve dentro dos limites estabelecidos pela Deliberação Normativa nº187 da Copam.

Além disso, as questões operacionais e de segurança não tiveram grandes alterações para o teor de 25% de bagaço de cana, contudo, é imprescindível a realização do cenário 1 dos investimentos necessários para que haja o pleno funcionamento do equipamento e para que um ambiente de trabalho seguro, limpo e mais funcional seja proporcionado. Ainda nesse ponto dos investimentos, é necessário considerar a sazonalidade do bagaço de cana, entendendo que as economias só serão obtidas durante todos os meses do ano caso haja a preparação do solo e construção do barracão para armazenamento de biomassa (cenário 2), garantindo também, juntamente com as alterações nas bicas, que o volume de bagaço possa ser aumentado para 75% na mistura de combustível.

Já na questão financeira, foi comprovada por meio dos cálculos, uma redução das despesas anuais com combustível de 12,96%, validando a viabilidade do uso da mistura de 75% cavaco de eucalipto e 25% bagaço de cana. Além disso, o uso da mistura de 75% bagaço de cana e 25% cavaco de eucalipto também foi validado e apresenta economia anual ainda maior nas despesas com combustível, reduzindo de 48,54%. Nesse cenário, quanto maior a proporção de bagaço, maiores serão as economias, devido ao preço bem mais baixo que o cavaco, assim, sugere-se a condução de estudos para a implantação de mais melhorias no sistema de alimentação, que permitam o aumento do teor de bagaço para 100%. Além disso, o Brasil apresenta hoje uma grande possibilidade de alternativas de biomassa, sendo possível também, realizar teste de variadas outras misturas seguindo a metodologia e os estudos feitos no presente trabalho.

8 REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Thermodynamics an Engineering Approach**. 8.ed. McGraw-Hill, Nova Iorque, 2015 .

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N.; BOETTNER, D.D.; BAILEY, M.B. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 8.ed. John Wiley & Sons, 2014 .

BASU, P.; KEFA, C.; JESTIN, L. **Boiler and Burners: Design and Theory**. 1.ed. Springer Science + Business Media, Nova Iorque, 2000 .

GANAPATHY, V. **Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications and Calculations** . 1.ed. Marcel Dekker, Inc, Nova Iorque, 2002 .

BEGA, E.A. **Instrumentação Aplicada ao Controle de Caldeiras**. 3.ed. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2003 .

SANTAROSA, E.; JUNIOR, J.F.P; GOULART, I.C.G.R. **Transferência de Tecnologia Florestal: Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda**. 1.ed. Embrapa, Brasília, 2014 .

ALMEIDA, L.C.; HOFSETZ, K. **Potencial do bagaço de cana na matriz energética brasileira nos últimos 20 anos e os impactos recentes do coronavírus**. XXX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP, 2022 .

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2023 .

PEREIRA, N.B.S. **Análise do cavaco de bambu como alternativa ao cavaco de eucalipto para utilização em caldeiras a vapor**. Dissertação Graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022 .

APÊNDICE A – CÓDIGO UTILIZADO PARA CÁLCULO DO BALANÇO ENERGÉTICO DA CALDEIRA

$P_{k_atm} = 0,97$ [kgf/cm²] "pressão atmosférica considerada"

$kfgtobar = 0,9806$ "para converter pressão de kgf/cm² para bar"

$P_atm = P_{k_atm} * kfgtobar$

"Para ponto 1 - Vapor produzido na caldeira/Purga"

$P_{k[1]} = 8,21$ [kgf/cm²]

$P[1] = P_{k[1]} * kfgtobar + P_atm$

$T[1] = 175,37$ [°C]

$h[1] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[1]; P=P[1])$

$s[1] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[1]; P=P[1])$

$x[1] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[1]; s=s[1])$

"Para ponto 2 - Linha de Vapor"

$P_{k[2]} = 7,71$ [kgf/cm²]

$P[2] = P_{k[2]} * kfgtobar + P_atm$

$T[2] = 174,37$ [°C]

$h[2] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[2]; P=P[2])$

$s[2] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[2]; P=P[2])$

$x[2] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[2]; s=s[2])$

"Para ponto 3 - Saída do Processo"

$P_{k[3]} = 4$ [kgf/cm²]

$P[3] = P_{k[3]} * kfgtobar + P_atm$

$T[3] = 70,0$ [°C]

$h[3] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[3]; P=P[3])$

$s[3] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[3]; P=P[3])$

$x[3] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[3]; s=s[3])$

"Para ponto 4 - Entrada do desaerador"

$$P_k[4] = P_k[2]$$

$$P[4] = P[2]$$

$$T[4] = T[2]$$

$$h[4] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[4]; P=P[4])$$

$$s[4] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[4]; P=P[4])$$

$$x[4] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[4]; s=s[4])$$

"Para ponto 5 - Água de make-up"

$$P_k[5] = 4 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$P[5] = P_k[5] * \text{kfgto} + P_{\text{atm}}$$

$$T[5] = 15,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h[5] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[5]; P=P[5])$$

$$s[5] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[5]; P=P[5])$$

$$x[5] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[5]; s=s[5])$$

"Para ponto 6 - Saída do desaerador"

$$P_k[6] = 10 \text{ [kgf/cm}^2\text{]}$$

$$P[6] = P_k[6] * \text{kfgto} + P_{\text{atm}}$$

$$T[6] = 105,0 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h[6] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[6]; P=P[6])$$

$$s[6] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[6]; P=P[6])$$

$$x[6] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[6]; s=s[6])$$

"Para ponto 7 - Saída da bomba"

$$P_k[7] = 11$$

$$P[7] = P_k[7] * \text{kfgto} + P_{\text{atm}}$$

$$T[7] = T[6]$$

$$h[7] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[7]; P=P[7])$$

$$s[7] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[7]; P=P[7])$$

$$x[7] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[7]; s=s[7])$$

"Para ponto 8 - Saída do economizador/Entrada da Caldeira"

$$P_k[8] = 11$$

$$P[8] = P_k[8] * \text{kfgto} + P_{\text{atm}}$$

$$T[8] = 134,60 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$h[8] = \text{Enthalpy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[8]; P=P[8])$$

$$s[8] = \text{Entropy}(\text{Steam_IAPWS}; T=T[8]; P=P[8])$$

$$x[8] = \text{Quality}(\text{Steam_IAPWS}; P=P[8]; s=s[8])$$

"Considerando uma produção média de 28000 kg/h de vapor"

$$m_dot[1] = 28000$$

$$m_dot[2] = 25200 \text{ "Vapor que vai para o processo"}$$

$$m_dot[4] = 2800 \text{ "Vapor que vai para o desaerador"}$$

$$m_dot[3] = 0,4 * m_dot[2] \text{ "Considerando 40% de retorno de condensado"}$$

$$m_dot[5] = m_dot[6] - m_dot[4] - m_dot[3]$$

$$m_dot[6] = m_dot[7]$$

$$m_dot[7] = m_dot[8]$$

$$m_dot[8] = m_dot[1] / (1 - \text{purga})$$

$$m_dot_purga = m_dot[8] - m_dot[1]$$

$$\text{purga} = 0,03 \text{ "Considerando purga de 3\%"}$$

"Balanço de energia para a caldeira"

$$Q_dot_H = m_dot[1] * h[1] + m_dot_purga * h[1] - m_dot[8] * h[8]$$

"Considerando a eficiência ao PCI de 86%"

$$n_cavaco = 0,86$$

$$n_mix = n_cavaco$$

$$p_cavaco = 290$$

$$p_bagaço = 250$$

$$PCI_cavaco = 11480,00 \text{ [kJ/kg]}$$

$$PCI_bagaço = 8470,00 \text{ [kJ/kg]}$$

$$p = 0,75 \text{ "Proporção de bagaço na mistura de combustível"}$$

$$n_cavaco = Q_dot_H / ((v_dot_cavaco) * PCI_cavaco * p_cavaco)$$

$$n_mix = \frac{Q_dot_H}{((v_dot_mix * p * PCI_bagaço * p_bagaço + ((1 - p) * v_dot_mix * p_cavaco * PCI_cavaco))} \quad ((1 -$$

$$v_dot_bagaço_mix = v_dot_mix * p$$

$$v_dot_cavaco_mix = v_dot_mix * (1 - p)$$

"Cálculo da Potência Nominal"

$$n_{\text{caldeira}}=0,86$$

$$Q_H=Q_{\text{dot}_H}/3600$$

$$n_{\text{caldeira}}=Q_H/Q_{\text{nominal}}$$