

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JOÃO GABRIEL POSSAMAI

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA TERMELÉTRICA OPERANDO
EM CICLO REGENERATIVO COM BIOMASSA DE CASCA DE ARROZ**

SANTA MARIA, RS

2023

JOÃO GABRIEL POSSAMAI

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA TERMELÉTRICA OPERANDO
EM CICLO REGENERATIVO COM BIOMASSA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Xavier Barreto

SANTA MARIA, RS

2023

JOÃO GABRIEL POSSAMAI

**ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA TERMELÉTRICA OPERANDO
EM CICLO REGENERATIVO COM BIOMASSA DE CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Mecânico**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Xavier Barreto

Aprovado em: 20/06/2023

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eduardo Xavier Barreto

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Prof. Dr. Leandro Costa de Oliveira

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Prof. Dr. Carlos Eduardo Guex Falcão

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

RESUMO

ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA DE UMA TERMELÉTRICA OPERANDO EM CICLO REGENERATIVO COM BIOMASSA DE CASCA DE ARROZ

AUTOR: João Gabriel Possamai

ORIENTADOR: Eduardo Xavier Barreto

Este estudo tem como objetivo analisar o desempenho energético e exergético de uma usina termelétrica que opera sob ciclo termodinâmico de regeneração aberta. A análise é baseada nos princípios dos balanços de energia de primeira e segunda lei aplicados a todos os componentes do ciclo, tomando como referência a usina termelétrica de São Sepé, que está em funcionamento. A usina em questão, é composta por um gerador de calor, turbina, condensador e bombas d'água. A biomassa de casca de arroz é o combustível que será analisado, e para verificar sua usabilidade serão feitas comparações com outras biomassas comumente empregadas em usinas termelétricas no Brasil, como a casca de coco e o bagaço da cana de açúcar. O estudo é realizado com auxílio do software EES (Engineering Equation Solver), que dispõe das ferramentas necessárias para a análise termodinâmica.

Palavras-Chave: Análise Exergética. Análise Energética. Eficiência. Biomasssa. Termelétrica

ABSTRACT**EXERGETIC ANALYSIS OF A THERMOELECTRIC POWERPLANT
OPERATING IN A REGENERATIVE CYCLE WITH RICE HUSK AS BIOMASS
FUEL****AUTHOR:** João Gabriel Possamai**ADVISOR:** Eduardo Xavier Barreto

This study aims to analyze the energy and exergy performance of a thermal power plant operating under an open regeneration thermodynamic cycle. The analysis is based on the principles of the first and second law of energy applied to all cycle components, with the reference being the São Sepé thermal power plant, which is currently in operation. The plant consists of a heat generator, turbine, condenser, and water pumps. Rice husk biomass is the fuel to be analyzed, and its usability will be compared with other commonly used biomasses in thermal power plants in Brazil, such as coconut husk and sugarcane bagasse. The study is conducted using the Engineering Equation Solver (EES) software, which provides the necessary tools for thermodynamic analysis.

Key Words: Exergy, Energy, Biomass Fuel, Efficiency, Thermoelectric

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Rankine com Regenerador aberto.....	18
Figura 2 - Eficiência Exergética da caldeira.....	26
Figura 3 - Exergia destruída na caldeira.....	27
Figura 4 - Exergia total destruída no ciclo.....	27
Figura 5 – Eficiência da caldeira.....	28
Figura 6 - Exergia destruída na caldeira.....	28
Figura 7 - Exergia destruída total.....	29
Figura 8 - Eficiência térmica do ciclo.....	29
Figura 9 - Rendimento exergético da caldeira.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química da Casca de Arroz.....	15
Tabela 2 - Especificações da Caldeira.....	25

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{comb}^{ch}	Exergia química do combustível kJ/kg
PCI	Poder Calorífico Inferior
\dot{Q}_{cald}	Calor gerado na caldeira, kJ
\dot{m}_x	Vazão mássica de vapor que passa por um ponto x do ciclo, kg/s
h	Entalpia, kJ/kg
\dot{Q}_{comb}	Calor gerado pelo combustível, kJ
\dot{m}_{comb}	Vazão mássica de combustível que entra na caldeira, kg/s
n_{cald}	Eficiência térmica da caldeira
E	Exergia, kW
s	Entropia, J/kg.K
T	Temperatura, K
E_{comb}	Exergia total do combustível, kW
nE	Eficiência exergética
E_d	Exergia Destruída, kW
\dot{W}	Trabalho, kW

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	10
1.1.1.	Objetivos específicos	10
2	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1.	BIOMASSA	14
3.2.	CASCA DE ARROZ.....	14
3.3.	BRIQUETAGEM	16
3.4.	EXERGIA QUÍMICA	16
3.5.	CICLO RANKINE COM REGENERADOR ABERTO	18
3.5.1.	Análise Energética e Exergética do Ciclo	18
3.5.2.	Caldeira.....	19
3.5.3.	Análise Termodinâmica da Turbina	20
3.5.4.	Condensador.....	22
3.5.5.	Regenerador aberto	23
3.5.6.	Bombas.....	23
3.5.7.	Análise termodinâmica do Ciclo.....	24
3.5.8.	Especificações	24
4	RESULTADOS.....	26
4.1.	ANÁLISE TERMODINÂMICA DO CICLO	26
5	CONCLUSÕES	31
6	REFERÊNCIAS	33
	ANEXO A	35

1 INTRODUÇÃO

O Rio Grande do Sul é o maior produtor de arroz do Brasil, tendo produzido 10,7 milhões de toneladas na safra 2021/22. Esse elevado volume de produção resulta em uma considerável quantidade de resíduos, especialmente a casca de arroz. Visando a necessidade global de reaproveitamento e reciclagem de materiais, assim como a procura por alternativas para a produção de energia, o reaproveitamento da casca de arroz como combustível para termelétricas se mostra como uma alternativa possível e a ser avaliada em estudos.

Dentre as principais biomassas utilizadas como fonte de combustível, a casca de arroz destaca-se como uma opção relevante, especialmente devido à sua abundante disponibilidade no estado do Rio Grande do Sul. Apesar de apresentar uma alta produção de cinzas, a casca de arroz possui um poder calorífico considerável, podendo ser considerada uma ótima candidata para estudos de reaproveitamento de matéria de descarte para fins energéticos.

O presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa energética e exérgica da utilização da casca de arroz como combustível de biomassa em um ciclo Rankine com regeneração aberta, considerando uma usina termelétrica hipotética. Essa investigação baseia-se na abundante quantidade de material de descarte gerado nas plantações de arroz do estado do Rio Grande do Sul.

1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo verificar as vantagens e/ou desvantagens da utilização da casca de arroz como combustível de biomassa em uma central termelétrica e fazer uma análise energética e exérgica do ciclo que se utiliza do alto volume de descarte de casca de arroz gerado pela agroindústria rio-grandense para a geração de energia elétrica utilizando-se da ferramenta computacional EES para a verificação matemática das mesmas.

1.1.1. Objetivos específicos

Com o intuito de se atingir o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Realização da pesquisa bibliográfica, identificando pesquisas anteriores sobre o tema e verificando a disponibilidade e viabilidade do assunto abordado;
- Definir os requisitos técnicos do ciclo de acordo com maquinário utilizado em termelétricas de combustível de biomassa (temperaturas, pressões e vazões mássicas utilizadas no ciclo de Rankine);
- Realizar a modelagem comparativa do sistema e as simulações para análise de primeira e segunda lei da termodinâmica através do software EES (Engineering Equation Solver);
- Comparar os resultados obtidos com a casca de arroz com combustíveis de biomassa comumente utilizados em outras regiões do Brasil.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Muitos trabalhos abordam de maneira semelhante as utilizações da casca de arroz como fonte energética e sua viabilidade econômica como combustível alternativo para centrais termelétricas verificando sua disponibilidade e rendimento energético de maneiras distintas.

Mayer (2009) faz uma análise energética e econômica de uma micro central termelétrica e suas viabilidades. Seus resultados mostram uma inviabilidade econômica para micro centrais dispersas, mas apresenta que em maior escala, ao se aproximar os produtores a uma central comum para abastecê-las o empreendimento torna-se viável.

Vieira (2014) fez experimentos em bancada com diferentes tipos de ligantes para a produção de briquetes de casca de arroz. Seus resultados encontrados foram semelhantes aos encontrados em diferentes biomassas já utilizadas no meio energético, desta maneira validando a utilização de briquetes de casca de arroz para a produção energética.

Os estudos de Paula *et al.* (2011) analisaram diferentes tipos de biomassa comparando os fatores de análise química, análise química imediata, poder calorífico e análise elementar. Seus resultados demonstraram que a casca de arroz apresentou o maior teor de lignina, característica importante para a geração de energia, porém seu alto teor de cinza acarretou uma redução de poder calorífico.

Por sua vez, Hoffmann (1999) avaliou a possibilidade de criação de micro termelétricas utilizando-se da casca de arroz como biomassa para geração de energia própria. Relatou em sua tese que apenas em grande escala, em uma das quatro empresas estudadas, é um empreendimento viável e lucrativo para as mesmas, onde o pequeno porte das outras três empresas gera mais custos de manutenção do que energia gerada e economizada a partir da queima da biomassa.

Ludwig, Araújo e Putti (2012) conduziram uma análise energética e de viabilidade econômica sobre a utilização da casca de arroz em uma usina termelétrica localizada em Don Pedrito. No estudo, empregou-se um ciclo Rankine simples, com eficiência de 30%, e calculou-se um período de retorno de investimento de 5 anos para o investimento inicial.

O estudo realizado por Silva *et al.* (2021) no Rio Grande do Sul identificou a capacidade de exploração energética da casca de arroz. Os pesquisadores calcularam a viabilidade econômica dessa exploração, destacando que seriam necessários os resíduos de plantações abrangendo uma área de pelo menos 26 mil hectares. Além disso, enfatizaram a relevância da criação de cooperativas para a concretização e viabilidade operacional das termelétricas. Esse

aspecto é de suma importância para garantir o aproveitamento eficiente e sustentável dessa fonte de energia renovável.

Esses estudos acima apresentados auxiliam a justificar a importância da realização deste trabalho.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo tem como objetivo fazer uma revisão bibliográfica dos conteúdos que serão utilizados como base de análise para o desenvolvimento do trabalho.

3.1. BIOMASSA

Biomassa é a matéria orgânica produzida direta ou indiretamente por organismos vivos. Advindo de plantas, é produzida pelo processo da fotossíntese em que o dióxido de carbono e a água do ambiente são convertidas - usando a energia do sol – em carboidratos (açúcares, celulose e lignina) que constituem a planta. Animais também são tipos de biomassa, assim como o material orgânico produzido pelos mesmos (NESS; MOGHATERI, 2016).

A energia do sol é então armazenada como energia química em diferentes formas de biomassa, podendo ser utilizada para a geração de calor e eletricidade. Os biocombustíveis podem ser sólidos, líquidos ou gasosos e estão em diferentes formas na natureza, como nos resíduos da produção agrícola (caso da casca de arroz), óleos vegetais, gorduras animais e matéria orgânica de descarte de indústria. (NESS; MOGHATERI, 2016)

Um sistema sustentável de biomassa forma um ciclo fechado de carbono; combustível de biomassa é então importante do ponto de vista ambiental. A utilização da biomassa como meio energético também é prática, visto que o material seria descartado caso não fosse utilizado.

3.2. CASCA DE ARROZ

O Brasil ocupa a nona posição entre os maiores produtores mundiais de arroz, tendo colhido 10,7 milhões de toneladas na safra 2021/2022. O estado do Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente 90% da produção total do país (CONAB, 2023). Essa produção em larga escala resulta na geração de diversos subprodutos e resíduos, como a casca de arroz, farelo e grãos. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como foco o estudo da casca de arroz como fonte de energia.

A utilização da casca de arroz para a produção energética é uma alternativa para agregar valor e diminuir impactos causados pelos resíduos advindos de vários segmentos industriais. Aponta também grandes vantagens, como incremento na matriz energética e redução na emissão de gases que provocam o efeito estufa devido à redução do uso de combustíveis fósseis

e à diminuição no volume de resíduos colocados em aterros sanitários ou a céu aberto (QUIRINO, 2003).

A casca do arroz é um resíduo agrícola lignocelulósico que corresponde à aproximadamente 22 por cento da massa total do grão. Com elevado conteúdo de sílica e lignina é resistente à degradação, podendo levar até cinco anos para decomposição total do resíduo (QUIRINO, 2003). As formas mais comuns de despache de resíduos como a casca de arroz são depósitos a céu aberto, depósito em aterro sanitário, usina de compostagem, usina de reciclagem e usina de incineração (SIRVINSKAS, 2002).

Levando-se em conta os dados acima citados, encontramos na casca de arroz um grande potencial para a utilização no mercado energético do Rio Grande do Sul, onde existe a produção em grande escala do grão e uma oportunidade para a geração de energia de maneira sustentável.

O aproveitamento efetivo da casca de arroz para fins energéticos o mesmo pode passar por diferentes processos que viabilizem a sua utilização, sendo os principais; os físicos; os termoquímicos e os biológicos (MAYER, 2009). O trabalho abordará a utilização do processo físico de briquetagem em seu estudo.

A tabela 1, elaborada pelo autor e com base em dados encontrados no artigo sobre combustão e gaseificação em câmaras de fluidos de Basu (2006), mostra a composição química geral da casca de arroz que possibilita o cálculo de sua exergia química.

Tabela 1 - Composição Química da Casca de Arroz

	Unidade	Casca de Arroz	Resíduos de Madeira	Serragem
PCS	MJ/kg	16,2	20,14	20
Mistura	Wt%	9,7	14,2	53,9
Voláteis	Wt%	66	79,1	19,19
C	Wt%	40,2	49	50,6
H	Wt%	5	5,9	6
O	Wt%	36,3	40,7	42,78
N	Wt%	0,3	2,5	0,2
S	Wt%	0,05	0,05	0,01
Cl	Wt%	0,1	0,03	0,01
Cinzas	Wt%	18,2	1,9	0,41

* Wt% - porcentagem mássica do componente

Fonte: Elaborado pelo autor com base em BASU (2006)

3.3. BRIQUETAGEM

Briquetes são produtos de alto poder calorífico, obtidos pela compactação de resíduos de biomassa, como a casca de arroz ou o pó de serragem (BIOMAX, [s.d.]).

Briquetagem, por sua vez, é o processo de compactação de resíduos em um produto de maior densidade que a matéria prima original oferecia. Suas capacidades de estoque – através da padronização do produto-, facilidade de transporte, higiene e temperatura de chama são as características mais afetadas com o processo (OLADEJI, 2015).

A briquetagem é normalmente feita de duas maneiras sendo uma delas a partir da prensa hidráulica – que geram briquetes completamente sólidos -, ou com uma prensa de parafuso, que também deixa o briquete homogêneo, porém com um furo no meio que aumenta sua área para recepção de calor aumentando sua taxa de combustão. É comum que a biomassa passe a ter a sua densidade aumentada de 200Kg/m³ para até 1200 Kg/m³ após ser sujeita ao processo (OLADEJI, 2015).

SILVEIRA (2008) cita que as maiores vantagens encontradas na utilização de briquetes no meio industrial quando comparados à lenha são:

- Menor produção de fumaça, cinza e fuligem;
- Maior temperatura de chama e queima regular;
- Não danifica a fornalha no manuseio de abastecimento;
- Menor custo;
- Produto reciclado e ecológico;
- Menor índice de poluição;
- Maior densidade e poder calorífico;
- Uma tonelada de briquetes substitui até 1,96 toneladas de briquete em estoque.

3.4. EXERGIA QUÍMICA

A exergia é, por definição, o trabalho máximo teórico que pode ser criado pelo sistema combinado. E a soma da exergia termomecânica e da exergia química é a exergia total associada a um sistema em um estado específico, relativo a uma exergia específica do ambiente como referência (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Exergia química pode representar o trabalho disponível de uma substância em um ambiente de referência. Desta maneira, para um processo que envolve uma reação química, o

trabalho disponível representa o trabalho máximo que pode ser extraído de uma substância ao reagir com o ambiente de referência, onde os produtos da reação retornam eventualmente ao seu estado morto em um processo reversível (LI, 1996 *apud* SILVA 2013). Nesse sentido, conclui-se que para se estimar a exergia química de um combustível são necessários três procedimentos: “1) preparar a equação química correspondente à combustão; 2) supor que tanto o combustível como o ar de combustão se encontram nas condições padrão e que os produtos estão em equilíbrio termoquímico com o ambiente; 3) calcular o trabalho disponível para os processos de combustão” (SILVA, 2013, p. 17).

Os procedimentos para os cálculos de exergia química de combustíveis de biomassa são bastante complexos, porém Li apresenta as equações 3.1 e 3.2 que representam o cálculo da exergia química para combustíveis sólidos (LI, 1996 *apud* SILVA, 2009):

$$\frac{e_{comb}^{ch}}{PCI} = 1,0438 + 0,0013 \times \frac{H}{C} + 0,1083 \times \frac{O}{C} + 0,0549 \times \frac{N}{C} \quad (3.1)$$

$$Se \frac{O}{C} \leq 0,666$$

$$\frac{e_{comb}^{ch}}{PCI} = \frac{1,0430 + 0,0013 \times \frac{H}{C} - 0,4453 \times \frac{O}{C} \times (1 + 0,0051 \times \frac{H}{C}) + 0,0521 \times \frac{N}{C}}{1 - 0,5385 \times \frac{O}{C}} \quad (3.2)$$

$$Se 2,67 > \frac{O}{C} > 0,666$$

Onde as seguintes variáveis são:

e_{comb}^{ch} : exergia química do combustível;

H: fração mássica de hidrogênio;

C: fração mássica de carbono;

O: fração mássica de oxigênio;

N: fração mássica de nitrogênio;

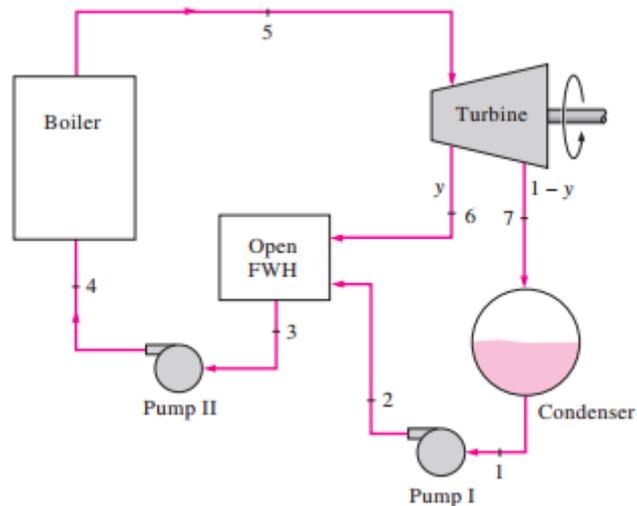
PCI: poder calorífico inferior

É importante salientar que os valores usuais de exergia química associada à biomassa podem variar entre 15 e 20MJ/kg, em base seca, dependendo do conteúdo de carbono e cinzas (SILVA, 2013).

3.5. CICLO RANKINE COM REGENERADOR ABERTO

Na avaliação energética e exergetica da termelétrica hipotética, baseada na nova usina termelétrica de São Sepé, utilizando a casca de arroz em briquetes como biomassa e combustível para a caldeira, o ciclo Rankine com Regeneração Aberta, conforme mostra a figura 1.

Figura 1 - Ciclo Rankine com Regenerador aberto



Fonte: Çengel (2004)

Para equacionar o ciclo, foram consideradas as seguintes hipóteses:

- O sistema opera em regime permanente;
- As quedas de pressão e perdas de calor na tubulação são desprezíveis;
- As variações das energias cinética e potencial são desprezíveis;
- Bombas e turbinas são adiabáticas;
- A pressão e temperatura do estado de referência são 100 kPa e 300 K, respectivamente;
- Os valores de eficiência isentrópica para a turbina a vapor e bombas são 77% e 80%, respectivamente.

3.5.1. Análise Energética e Exergetica do Ciclo

A análise feita no ciclo busca encontrar as quantidades de todos os estados nos componentes do ciclo regenerativo. Para a mesma, utiliza-se a Primeira Lei da Termodinâmica

em cada componente da caldeira, onde torna-se possível determinar o calor gerado no ciclo e o seu trabalho perdido.

3.5.2. Caldeira

O calor fornecido na caldeira para a água na forma de líquido saturado e sai na condição de vapor saturado é baseado no balanço da primeira lei da termodinâmica e é demonstrado na equação 3.3 seguir:

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}_a(h_5 - h_4) \quad (3.3)$$

O calor do combustível gerado na caldeira pode ser calculado pelo produto da vazão mássica de combustível que entra na caldeira em $\frac{kg}{s}$ com o Poder Calorífico Inferior do combustível como mostrada na equação 3.4 a seguir:

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{comb} \times PCI \quad (3.4)$$

O rendimento energético da caldeira pode ser calculado então na equação 3.5:

$$n_{cald} = \frac{\dot{Q}_{cald}}{\dot{Q}_{comb}} \quad (3.5)$$

Sendo:

\dot{m}_a – vazão mássica de vapor que passa pela caldeira;
 h_4 e h_5 - Entalpias específicas nas respectivas tubagens;
 n_{cald} – rendimento energético da caldeira

A exergia total da água na caldeira na entrada e saída pode ser calculada pelo produto da vazão de massa de água as suas exergias específicas do estado termodinâmico das linhas de pressão 4 e 5 respectivamente gerando as equações 3.6 e 3.7 mostradas a seguir.

$$E_4 = m e_4 = \dot{m}_4[(h_4 - h_0) - T_o(s_4 - s_0)] \quad (3.6)$$

$$E_5 = m e_5 = \dot{m}_5[(h_5 - h_0) - T_o(s_5 - s_0)] \quad (3.7)$$

É possível calcular a exergia química do combustível utilizando-se da fórmula de Li e das propriedades da casca de arroz citadas acima gerando a equação 3.8:

$$\frac{e_{comb}^{ch}}{PCI} = \frac{1,0430 + 0,0013 * \frac{H}{C} - 0,4453 * \frac{O}{C} * (1 + 0,0051 * \frac{H}{C}) + 0,0521 * \frac{N}{C}}{1 - 0,5385 * \frac{O}{C}} \quad (3.8)$$

Onde e_{comb}^{ch} é a exergia química da casca de arroz, desta maneira se torna possível o cálculo da exergia total do combustível, do fluxo de exergia do combustível na caldeira assim como sua exergia destruída, como mostram as equações 3.9, 3.10 e 3.11:

$$E_{comb} = \dot{m}_{comb} * e_{comb}^{ch} \quad (3.9)$$

$$0 = \sum_s m e_1 - E_{d_{cald}} \quad (3.10)$$

Onde \dot{m}_{comb} é a vazão mássica de combustível sendo queimada na caldeira em kg/s, pode-se assim, chegar na equação 3.11 da exergia destruída na caldeira:

$$E_{d_{cald}} = E_{comb} + E_4 - E_5 \quad (3.11)$$

E o rendimento exerético da caldeira é demonstrado na equação 3.12:

$$nE_{cald} = \frac{E_4 - E_5}{E_{comb}} \quad (3.12)$$

3.5.3. Análise Termodinâmica da Turbina

A análise termodinâmica da turbina é feita levando em consideração situações reais de utilização da mesma, por isso, leva-se em consideração um rendimento de 77% sobre uma expansão reversível. Observando o ciclo, pode-se verificar que o caminho percorrido pelo vapor superaquecido saído da caldeira entra na turbina a partir do ponto de pressão 5, onde realiza trabalho e se expande até uma fração do vapor sair no ponto de pressão 6 como mistura bifásica,

indo ao regenerador aberto, e o restante se expande até o ponto de pressão 7 onde se dirige ao condensador também como mistura bifásica com o objetivo de levá-lo ao estado de líquido saturado.

A partir dos conceitos da Primeira Lei da Termodinâmica, e tendo assumido como 77% o rendimento da turbina, pode-se encontrar os valores reais das entalpias dos pontos de pressão resultantes do processo de acordo com as equações 3.13 e 3.14:

$$\eta = \frac{h_5 - h_6}{h_5 - h_{6s}} \quad (3.13)$$

$$h_6 = h_5 + \eta_{\text{turb}}(h_{6s} - h_5) \quad (3.14)$$

Em que o subscrito “s” representa uma expansão totalmente reversível, com eficiência 100%. A equação acima utilizada para encontrar a entalpia do ponto de pressão 6 também é utilizada de maneira análoga para o cálculo da linha de pressão 7.

O trabalho ideal da turbina é mostrado na equação 3.15:

$$\dot{W}_{\text{turbI}} = \dot{m}_5 h_{5s} - \dot{m}_6 h_{6s} - \dot{m}_7 h_{7s} \quad (3.15)$$

E o trabalho real é definido como mostrada na equação 3.16:

$$W_{\text{turbR}} = W_{\text{tI}} \times \eta_{\text{turb}} \quad (3.16)$$

Sendo:

\dot{m}_5 – Massa da entrada na turbina;

\dot{m}_6 – Massa de saída da turbina para o regenerador;

\dot{m}_7 - Massa de saída da turbina para o condensador;

h_5 – Entalpia específica de entrada na turbina;

h_6 – Entalpia específica de saída da turbina para o regenerador;

h_7 – Entalpia específica de saída da turbina para o condensador.

A exergia total dos pontos de pressão da saída da turbina podem ser calculadas pelo produto da exergia específica multiplicado pela vazão mássica de água encontrada nos pontos de pressão como mostram a equação 3.17:

$$E_6 = \dot{m}_6 \times (h_6 - h_o - T_o \times (s_6 - s_o)) \quad (3.17)$$

E calculada de maneira análoga no ponto de pressão 7 mostrado na equação 3.18:

$$E_7 = \dot{m}_7 \times (h_7 - h_o - T_o \times (s_7 - s_o)) \quad (3.18)$$

A exergia destruída na turbina pode ser calculada pela fórmula 3.19 mostrada abaixo:

$$E_{dturb} = E_5 - (E_6 + E_7 + W_{turbR}) \quad (3.19)$$

E a eficiência exérgica é calculada a partir da equação 3.20 dividindo o trabalho real da turbina pela diferença de exergia de entrada e saída da turbina:

$$\eta_{turbE} = \frac{W_{turbR}}{E_5 - E_6 - E_7} \quad (3.20)$$

3.5.4. Condensador

O condensador é responsável pela rejeição de calor do fluido de trabalho saindo da turbina na forma de vapor ou mistura bifásica. O processo deve transformar todo o fluido em líquido saturado para que possa ser bombeado de volta ao ciclo.

A vazão mássica do ponto de pressão 7 é definido na equação 3.20:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 \times (1 - y) \quad (3.20)$$

Onde y é correspondente à percentagem de vapor que sai do primeiro ponto da turbina.

A exergia de fluxo de saída do condensador pode ser calculada de acordo com a equação 3.21:

$$E_1 = \dot{m}_7 \times ((h_1 - h_o) - T_o \times (s_1 - s_o)) \quad (3.21)$$

As irreversibilidades são representada pela diferença da exergia de entrada e saída (fora as perdas) e é calculada de acordo com a equação 3.22:

$$E_{dcond} = E_7 - E_1 \quad (3.22)$$

Aplicando-se a primeira lei pode-se encontrar o calor perdido no condensador de acordo com a equação 3.23:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_7 h_1 \quad (3.23)$$

3.5.5. Regenerador aberto

O regenerador aberto é basicamente uma câmara de mistura, onde o vapor extraído da turbina é misturado com a água de alimentação saída da bomba. O balanço energético no regenerador pode ser calculado de acordo com a equação 3.24:

$$(1 - y) \times h_2 + y \times h_6 = h_3 \quad (3.24)$$

Onde y é a fração mássica de vapor que sai na primeira fase da turbina. E a exergia destruída é calculada de acordo com a equação 3.25:

$$E_{dReg} = E_2 + E_6 - E_3 \quad (3.25)$$

3.5.6. Bombas

As bombas são os componentes responsáveis por levar o líquido saturado de volta para a caldeira para reiniciar o ciclo com um aumento de pressão.

O balanço energético das bombas pode ser simplificado como mostra a equação 3.26:

$$(h_s - h_e) = m_d(p_s - p_e) \quad (3.26)$$

E o seu rendimento isentrópico é demonstrado na equação 3.27:

$$\eta_b = \frac{m_d(p_s - p_e)}{h_s - h_e} \quad (3.27)$$

O trabalho das bombas é calculado de acordo com a equação 3.28:

$$W_b = m \times (h_e - h_s) \quad (3.28)$$

Onde o subscrito "e" significa entrada e o subscrito "s" significa saída.

A exergia destruída das bombas é calculada de acordo com o balanço de segunda lei mostrada na equação 3.29:

$$E_{db} = E_e + W_b - E_s \quad (3.29)$$

3.5.7. Análise termodinâmica do Ciclo

A eficiência do ciclo pode ser calculada através da equação 3.30:

$$n_{ciclo} = \dot{W}_{liq} / \dot{Q}_{cald} \quad (3.30)$$

3.5.8. Especificações

A metodologia utilizada neste trabalho é dada em função de uma modelagem termodinâmica, utilizando das equações definidas previamente e simuladas no software EES (*Engineering Equation Solver*).

Em um primeiro momento são calculadas todas as especificações do ciclo de acordo com a Usina Termelétrica de Biomassa em funcionamento de São Sepé com casca de arroz, em seguida é feito um estudo comparativo dos resultados com outras biomassas comumente adotadas em termelétricas brasileiras, no caso, bagaço de cana de açúcar e casca de coco.

Utilizando-se das informações disponibilizadas ao público sobre a termelétrica de São Sepé e das especificações de uma caldeira em uma central que opera com biomassa para uma aproximação real de resultados, tem-se:

Um silo de 8.000 m² com capacidade de armazenagem para operar com 60 m³/h, representando quatro dias de operação na usina e uma torre de resfriamento com capacidade para 1.900 m³/h (O SEPEENSE, 2016).

A caldeira contará com especificações demonstradas na tabela 2:

Tabela 2 - Especificações da Caldeira

Fabricante da Caldeira	SATHEL
Tipo	VUS-50
Superfície de Aquecimento	750 m ²
Capacidade Evaporativa com biomassa da Caldeira	37.500 kg/h
Pressão de Projeto	25,2 kg/cm ²
Pressão de prova hidrostática da Caldeira	37,5 kg/cm ²
Pressão de operação	21 kg/cm ²
Temperatura do vapor (T_5)	300°C
Grelha para biomassa	Rotativa
Temperatura da Água de Alimentação (T_4)	105 °C
Tensão de alimentação	440V, 60 Hz
Tensão de comando	220V, 60 Hz
Eficiência mínima ao PCI médio de 2.800 Kcal/kg	77,5%
Combustíveis	Biomassa
Instalação	Ao tempo

Fonte: Elaborada pelo autor com base nas informações disponibilizadas por Sathel Energia, Caldeira 3

4 RESULTADOS

Nessa seção, se encontram os resultados obtidos por meio da análise termodinâmica individual e global do ciclo de potência trabalhado e onde se verificam os parâmetros de relevância ao rendimento exergético, destruição de exergia e ao rendimento total do ciclo.

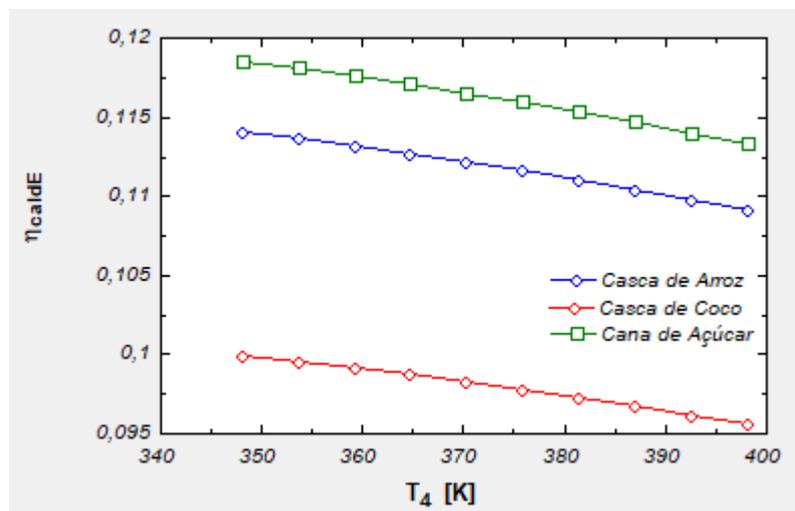
Considerando todas as possibilidades de simulação a partir do uso do *software* EES, foram definidas a restringir às simulações a intervalos de temperatura de entrada e saída da caldeira. Assim puderam ser analisadas as eficiências energéticas e exergéticas utilizadas na caldeira de queima de biomassa comercial analisada.

A fim de obter-se um resultado comparativo, utilizou-se da casca de coco e da cana de açúcar nos mesmos moldes do ciclo para melhor verificar a viabilidade do uso da casca de arroz nas mesmas condições de biomassas já aceitas no mercado.

4.1. ANÁLISE TERMODINÂMICA DO CICLO

A figura 2 representa a variação do rendimento exergético da caldeira nos três combustíveis estudados com a variação da temperatura de entrada da água de alimentação da caldeira. Pode-se observar que a caldeira, que já possui um rendimento baixo, apresenta uma diminuição de eficiência conforme a temperatura de entrada da água aumenta.

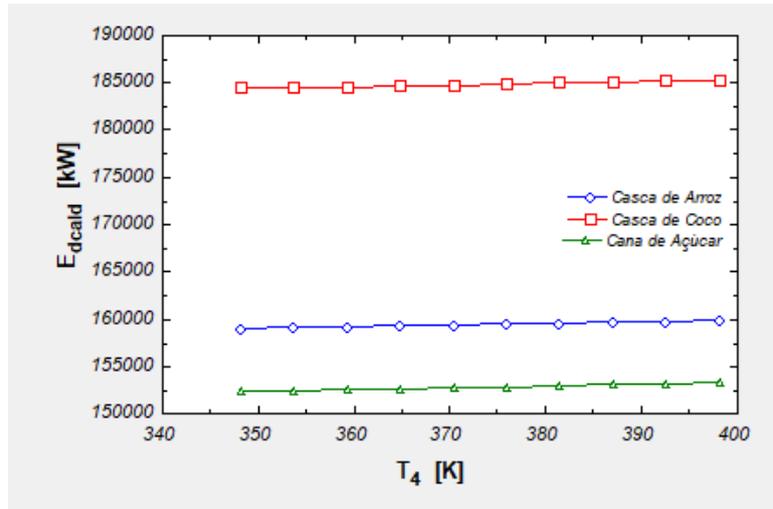
Figura 2 - Eficiência Exergética da caldeira



Fonte: Elaborado pelo autor

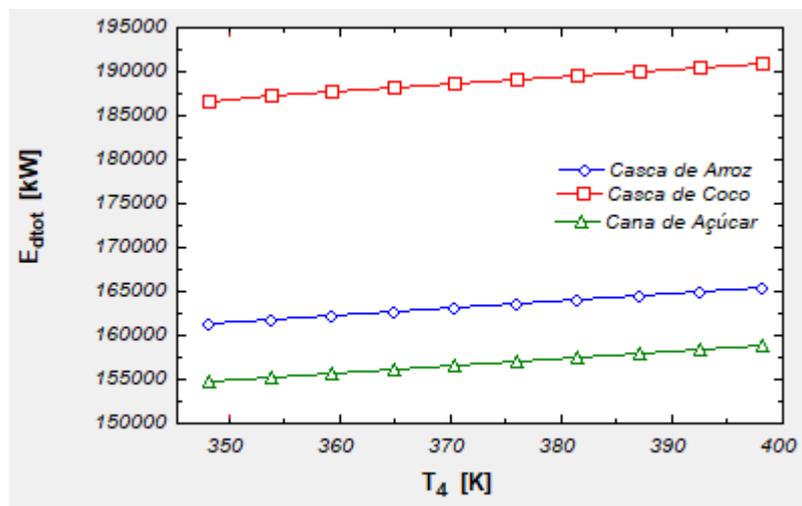
As figuras 3 e 4 mostram a quantidade de exergia destruída da caldeira e do ciclo total com a variação da temperatura de entrada da água. Nota-se um leve aumento no desperdício de energia nos três casos estudados.

Figura 3 - Exergia destruída na caldeira



Fonte: Elaborado pelo autor

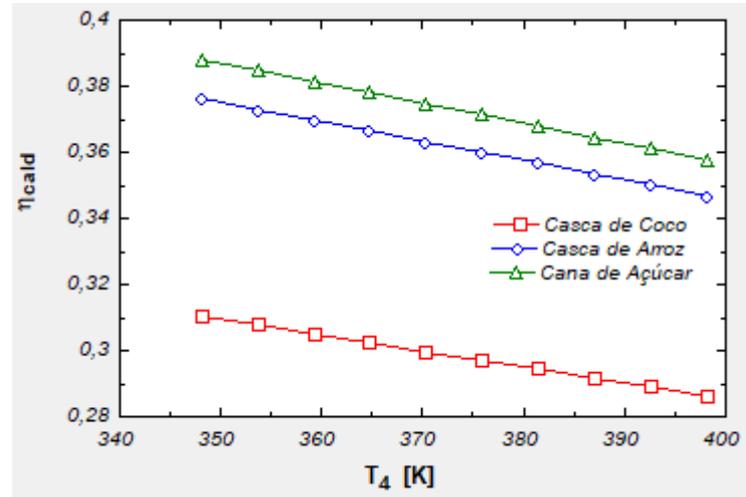
Figura 4 - Exergia total destruída no ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 5 mostra uma queda linear de rendimento da caldeira numa ordem de aproximadamente 5% para os três combustíveis, com o aumento da temperatura de entrada da água na caldeira, o que é contraintuitivo, porém explicável pela limitação da temperatura de saída estipulada na simulação.

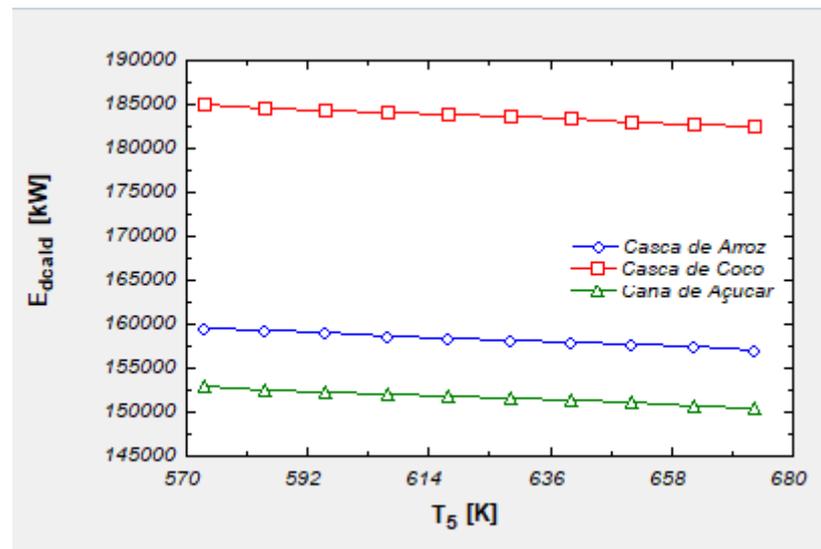
Figura 5 - Eficiência da caldeira



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 6 representa a queda de destruição de exergia, que apesar de não ser expressiva por ter um aumento relativamente baixo de temperatura, é visível. Essa queda é explicada por um maior aproveitamento e maior rendimento da caldeira com a temperatura de saída mais elevada.

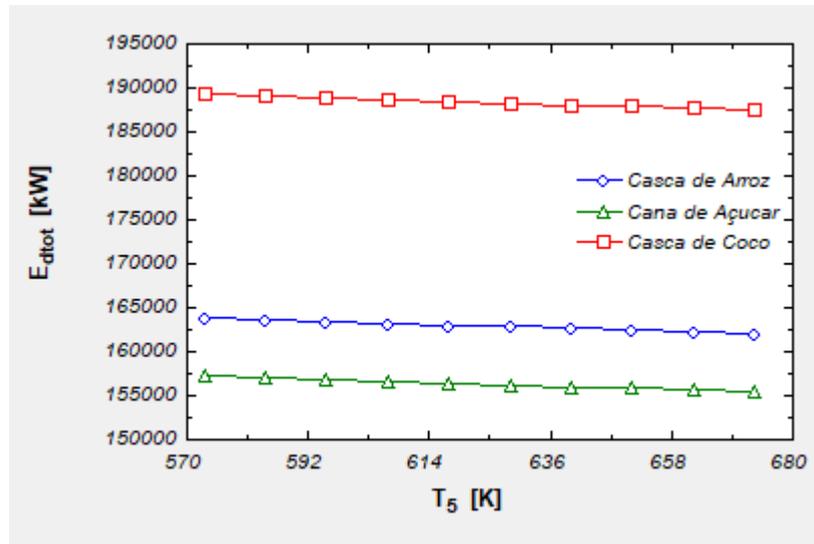
Figura 6 - Exergia destruída na caldeira



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 7 mostra a queda de destruição total de exergia na mesma faixa de variação de temperatura da figura 6. Pode-se observar que a maior quantidade de exergia destruída em todo ciclo se encontra na caldeira, onde, comparativamente, os gráficos ficam muito semelhantes.

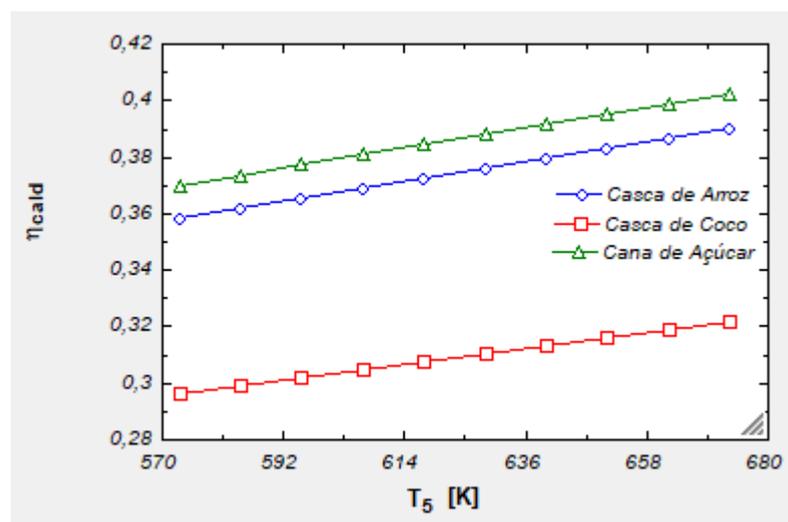
Figura 7 - Exergia destruída total



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 8 mostra um aumento de aproximadamente 5% de eficiência térmica com o aumento da temperatura de saída da caldeira. Este aumento é explicado pelo maior aproveitamento do calor gerado pelo combustível dentro da caldeira, porém inviável devido às limitações do maquinário estudado.

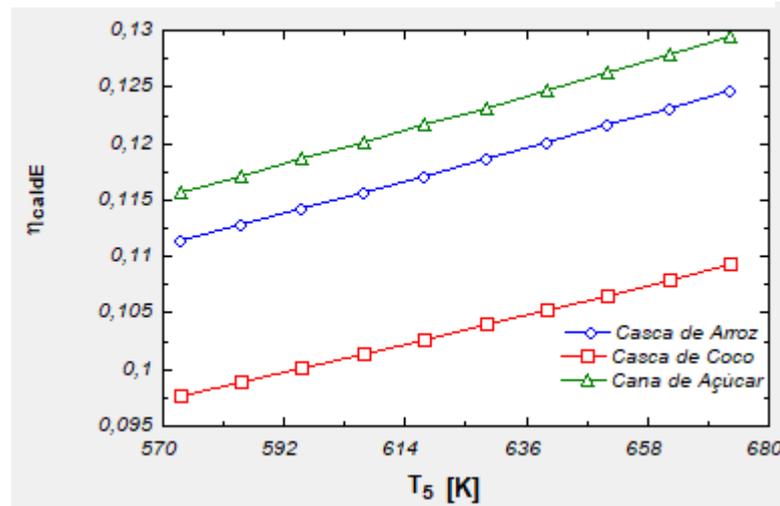
Figura 8 - Eficiência térmica do ciclo



Fonte: Elaborado pelo autor

De forma análoga, a eficiência exérgica da figura 9 também aumenta com o aumento da temperatura de saída do vapor da caldeira, porém em escalas bem menores devida ao grande desperdício de energia não aproveitado pela caldeira que trabalha em temperaturas relativamente baixas e à grande taxa de cinzas que o combustível de biomassa gera.

Figura 9 - Rendimento exérgico da caldeira



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÕES

Foi realizado um estudo quantitativo envolvendo a análise energética e exergética de uma usina termelétrica atuando com a biomassa da casca de arroz, levando em consideração as especificações de caldeiras e componentes de termelétricas conhecidas no mercado. No estudo, a usina operou com um ciclo de regeneração aberta e a análise foi fundamentada nos princípios termodinâmicos, com a aplicação de balanços da primeira e segunda lei em cada componente do ciclo. Os cálculos foram realizados utilizando o *software Engineering Equation Solver – EES*, escolhido devido às suas capacidades de facilitar a análise termodinâmica, incluindo a disponibilidade de tabelas termodinâmicas necessárias para a execução do trabalho.

O presente estudo consistiu na análise do ciclo variando as temperaturas de entrada e saída da água na caldeira para três diferentes biomassas investigadas. Nesse contexto, foram calculadas a eficiência total do ciclo, a exergia destruída total no ciclo e a taxa de exergia destruída na caldeira. Os resultados foram apresentados de forma gráfica nas Figuras (2-9). Com base nos resultados obtidos, algumas observações relevantes devem ser destacadas:

- A caldeira é o componente principal na taxa de destruição de exergia do ciclo, onde ocorre a maior troca de calor, sendo onde ocorrem as maiores irreversibilidades do ciclo termodinâmico.
- A cana de açúcar possui a menor taxa de destruição de exergia. Por ter uma exergia química menor, e a caldeira ser limitada a temperaturas relativamente baixas, o calor por ela gerado é mais facilmente aproveitado pela caldeira, tendo assim menos perdas. Analogamente, a casca de coco, biomassa com a maior exergia química, possui a maior perda de exergia na caldeira por ter muito mais calor dissipado pela caldeira limitada. A casca de arroz se mostra mais próxima à cana de açúcar, onde o aproveitamento, longe do ideal ainda é aproximadamente 5% mais eficiente, como pôde ser observado nos gráficos, do que a casca de coco.

Ao considerar essas observações, é possível identificar um significativo desperdício de energia em um ciclo já em operação no interior do estado. Onde as irreversibilidades são altas, o projeto é sustentável apenas pela grande quantidade de material de baixo custo, ou custo zero, disponibilizado pelo grande descarte do material no estado do Rio Grande do Sul.

Os códigos desenvolvidos por meio do software EES proporcionaram uma clara visualização das variáveis termodinâmicas relevantes. No entanto, as restrições presentes na caldeira analisada não permitem realizar alterações significativas no projeto, o que resulta em altas taxas de irreversibilidade e consideráveis desperdícios de energia. Além disso, é importante ressaltar que a caldeira não está otimizada de acordo com a biomassa utilizada, o que contribui para os mencionados problemas energéticos.

6 REFERÊNCIAS

BASU, Prabir. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Taylor & Francis Group. Ed. 1, Boca Raton, 2006.

BAZZO, Edson. **Geração de Vapor**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BIOMAX. **O que é Briquetagem?** [s.d.].

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 5th. ed. Chicago: McGraw-Hill, 2004.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Grãos**. Brasília, 2017.

CORTEZ, Augusto Barbosa, et al. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

HOFFMANN, Ronaldo. **Método Avaliativo da Geração Regionalizada de Energia, em Potências Inferiores a 1 MW, a partir da Gestão dos Resíduos de Biomassa – O caso da Casca do Arroz**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

LUDWIG, Rafael; ARAÚJO, Adamo de Souza; PUTTI, Fernando Ferrari. **Usina Termelétrica a partir da casca de arroz**. VIII Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 8, n. 7, p. 79-93, S2012.

MAYER, Flavio Dias. **Aproveitamento da Casca de Arroz em uma Micro Central Termoelétrica - Avaliação dos Impactos Econômicos e Ambientais para o Setor Arrozeiro do Rio Grande do Sul**. 2009. Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2009.

MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5th. ed. Sussex: John Wiley & Sons, Inc, 2006.

NESS, James; MOGHTADERI, Behdad. Biomass and Bioenergy. *In.*: NESS, James; MOGHTADERI, Behdad. **Coal-Biomass Cofiring Handbook**. 2008. Cap 1.

OLADEJI, John Taiwo. Theoretical Aspects of Biomass Briquetting – A Review Study. **Journal of Energy Technologies and Policy**. Vol. 5, nº 3, 2015

O SEPEENSE. **Obras da Usina Termelétrica de São Sepé vão iniciar em junho. 2016.** Disponível em: <<http://osepeense.com/obras-da-usina-termeletrica-de-sao-sepe-vaio-iniciar-em-junho/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.

PAULA, Luana Elis de Ramos. *et al.* Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **CERNE**, v. 17, n. 2, abr. 2011.

QUIRINO, Waldir Ferreira. **Utilização Energética de Resíduos Vegetais.** IBAMA, 2003.

SATHEL ENERGIA. Usina Termelétrica em Ariquemes (RO) 19MW. Caldeira 3. Disponível em: https://www.sathel.com.br/projetos_executados/usina-termeletrica-em-ariquemes-ro-19mw/

SILVA, Ana Teresa Oliveira Santos. **Análise Termodinâmica de uma Central de Biomassa Lenhosa.** 2013. Universidade Nova de Lisboa, [s. l.], 2013.

SILVA, Laura Araújo; SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; MACHADO, Gabriel de Oliveira; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio; BARROS, Regina Mambeli. **Rice husk energy production in Brazil: An economic and energy extensive analysis.** Journal of Cleaner Production. Elsevier, v. 290, 25 march, 2021.

SILVA, Reginaldo Ferreira da. **Análises Energética e Exergética de uma Micro Central de Cogeração inserida em uma Planta de Carbonização de Madeira Reflorestada.** 2009. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SILVEIRA, Monica Silva. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de Briquete em Salvador – BA.** 2008. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

SIRVINSKAS, Luís Paulo. **Manual do Direito Ambiental.** São Paulo: Saraiva, 2002.

VIEIRA, Nailce Aparecida Dornelles. **Obtenção de Briquetes a partir da casca do arroz e avaliação do seu potencial energético.** 2014. Centro Universitário Univates, Lajeado, 2014.

ANEXO A

"Estado Morto"

$$T_o=20+273,15$$

$$P_o=101,325$$

$$h_o = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; T=T_o; P=P_o)$$

$$s_o = \text{ENTROPY}(\text{Steam}; T=T_o; P=P_o)$$

"Estado 4 - caldeira entrada"

$$P_4 = 2059$$

$$21\text{kg/cm}^2$$

"Kpa,

$$T_4=105+273,15$$

"temperatura da agua na entrada da caldeira"

$$h_4 = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; T=T_4; P=P_4)$$

$$s_4 = \text{ENTROPY}(\text{STEAM}; T=T_4; P=P_4)$$

"Estado 5 - caldeira saída"

$$T_5=300+273,15$$

$$P_5 = 2059$$

"Kpa, 21kg/cm²"

$$h_5 = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; T=T_5; P=P_5)$$

$$s_5 = \text{ENTROPY}(\text{Steam}; T=T_5; P=P_5)$$

" Cálculos complementares caldeira "

$$m_{\text{dot}}_4 = 20$$

"vazão do vapor gerado pelo equipamento"

$$m_{\text{dot}}_4\text{comb} = 37,5/3,6$$

"vazão de combustível na caldeira kg/s"

$$Q_{\text{comb}} = m_{\text{dot}}_4\text{comb} * \text{PCI}$$

"calor do combustível gerado na caldeira na caldeira"

$$Q_{\text{cald}} = m_{\text{dot}}_4 * (h_5 - h_4)$$

"calor gerado na caldeira"

$$\text{eta}_{\text{cald}} = Q_{\text{cald}} / Q_{\text{comb}}$$

"exergia da caldeira"

$$E_5 = m_{\text{dot}}_5 * ((h_5 - h_o) - T_o * (s_5 - s_o))$$

"exergia saída da caldeira"

$$E_4 = m_{\text{dot}}_4 * ((h_4 - h_o) - T_o * (s_4 - s_o))$$

"exergia entrada da caldeira"

"Exergia destruída caldeira e exergia química casca de arroz "

$$H=5,35$$

"porcentagem de Hidrogenio na composição da casca de arroz"

$$O=39,55$$

"Porcentagem de Oxigenio na composição da casca de arroz"

$$C=44,8$$

"Porcentagem de Carbono na composição da casca de arroz"

$$N=0,38$$

"Porcentagem de Nitrogenio na composição da casca de arroz"

$$\text{PCI} = 13388,8$$

"Poder calorífico inferior da casca de arroz"

$$(E_q_{\text{comb}}) / \text{PCI} = (1,0430 + 0,0013 * H/C - 0,4453 * O/C * (1 + 0,0051 * H/C) + 0,0521 * N/C) / (1 - 0,5385 * O/C)$$

"Fórmula da exergia química de Li para a casca de arroz"

$$E_{\text{comb}} = m_{\text{dot}}_4\text{comb} * E_q_{\text{comb}}$$

$$E_{\text{dcald}} = E_{\text{comb}} + E_4 - E_5$$

"exergia destruída na caldeira"

$$\text{eta}_{\text{caldE}} = (E_5 - E_4) / E_{\text{comb}}$$

"rendimento exergético da caldeira"

"Estado 6 saída 1 da turbina"

$P_6 = 120$ "autor"
 $s_{6s} = s_5$ "entropia do primeiro ponto de saída da turbina é igual a entropia da saída da caldeira (ideal)"
 $h_{6s} = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; P=P_6; s=s_{6s})$ " Entalpia ideal"
 $h_6 = h_5 + (h_{6s} - h_5)/\eta_{\text{turb}}$
 $T_6 = \text{TEMPERATURE}(\text{Steam}; P=P_6; h=h_6)$
 $s_6 = \text{ENTROPY}(\text{Steam}; h=h_6; P=P_6)$
 $x_6 = \text{QUALITY}(\text{Steam}; h=h_6; P=P_6)$ "título saída 1 da turbina"

"dados complementares turbina no ponto 6"

$y = 0,14$ "fração mássica da vazão no primeiro estágio da turbina"

$m_{\text{dot}}_4 = m_{\text{dot}}_5$
 $m_{\text{dot}}_6 = m_{\text{dot}}_5 * y$

"Exergia total na primeira saída da turbina"

$E_6 = m_{\text{dot}}_6 * (h_6 - h_o - T_o * (s_6 - s_o))$

"Estado 7 saída dois da turbina, menor pressão"

$P_7 = 4$ "12"
 $s_{7s} = s_5$ "entropia do primeiro ponto de saída da turbina é igual a entropia da saída da caldeira (ideal)"

$h_{7s} = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; P=P_7; s=s_{7s})$
 $h_7 = h_6 + (h_{7s} - h_6)/\eta_{\text{turb}}$ " Entalpia ideal"
 $T_7 = \text{TEMPERATURE}(\text{Steam}; P=P_7; h=h_7)$
 $s_7 = \text{ENTROPY}(\text{Steam}; h=h_7; P=P_7)$
 $x_7 = \text{QUALITY}(\text{Steam}; h=h_7; P=P_7)$

"dados complementares turbina mais expandida"

$m_{\text{dot}}_7 = m_{\text{dot}}_5 * (1-y)$
 $Q_{\text{cond}} = m_{\text{dot}}_7 * h_7 - m_{\text{dot}}_7 * h_1$

"Rendimento exergetico da turbina"

$\eta_{\text{turbE}} = W_{\text{turbR}} / (E_5 - E_6 - E_7)$

"Exergia total saída menor pressão da turbina"

$E_7 = m_{\text{dot}}_7 * (h_7 - h_o - T_o * (s_7 - s_o))$

"trabalho gerado na turbina"

$W_{\text{turbI}} = m_{\text{dot}}_5 * (h_5 - h_6 * y - h_7 * (1-y))$
 $W_{\text{turbR}} = W_{\text{turbI}} * \eta_{\text{turb}}$
 $\eta_{\text{turb}} = 0,77$

"Estado 1 saída condensador"

$x_1 = 0$ "título"
 $P_1 = P_7$
 $h_1 = \text{ENTHALPY}(\text{Steam}; P=P_1; x=x_1)$

$s_1 = \text{ENTROPY}(\text{steam}; P=P_1; x=x_1)$
 $T_1 = \text{TEMPERATURE}(\text{Water}; P=P_1; x=x_1)$
 $Q_{\text{saída}} = m_{\text{dot}_7} \cdot (h_7 - h_1)$

"Estado 2"

$P_2 = P_6$ "P_6"
 $x_2 = x_1$
 $h_2 = \text{ENTHALPY}(\text{water}; P=P_6; T=T_2)$
 $s_2 = s_1$
 $T_2 = T_1$

"Estado 3"

$P_3 = P_2$
 $T_3 = \text{TEMPERATURE}(\text{Steam}; P=P_2; h=h_3)$
 $x_3 = x_2$
 $h_3 = \text{ENTHALPY}(\text{water}; P=P_2; x=x_2)$
 $s_3 = \text{ENTROPY}(\text{water}; P=P_2; x=x_2)$

"Trabalho perdido nas bombas"

$W_{b12} = m_{\text{dot}_7} \cdot (h_2 - h_1)$

$W_{b34} = m_{\text{dot}_4} \cdot (h_4 - h_3)$

"Exergia total ao passar pelo Regenerador"

$E_3 = m_{\text{dot}_4} \cdot ((h_3 - h_o) - T_o \cdot (s_3 - s_o))$
 $E_2 = m_{\text{dot}_7} \cdot ((h_2 - h_o) - T_o \cdot (s_2 - s_o))$
 $E_1 = m_{\text{dot}_7} \cdot ((h_1 - h_o) - T_o \cdot (s_1 - s_o))$

"Exergia Destruída"

$E_{\text{dturb}} = E_5 - (E_6 + E_7 + W_{\text{turb}_R})$
 $E_{\text{dreg}} = E_6 + E_2 - E_3$
 $E_{\text{db12}} = E_1 - E_2 + W_{b12}$
 $E_{\text{db34}} = E_3 - E_4 + W_{b34}$
 $E_{\text{dcond}} = E_7 - E_1$

$\text{Eta}_{\text{cond}} = E_1 / E_7$
 $\text{Eta}_{\text{reg}} = E_3 / (E_6 + E_2)$

$W_{\text{total}} = W_{\text{turb}_R} - W_{b12} - W_{b34}$
 $\text{eta}_{\text{total}} = W_{\text{total}} / Q_{\text{cald}}$

$E_{\text{tot}} = (E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 + E_7)$
 $E_{\text{dtot}} = E_{\text{dturb}} + E_{\text{dreg}} + E_{\text{db12}} + E_{\text{db34}} + E_{\text{dcond}} + E_{\text{dcald}}$