



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOÃO VICTOR SANTOS FERNANDES

**FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM
GERADOR DE CALOR MOVIDO A CASCA DA CASTANHA DE CAJU**

FORTALEZA

2023

JOÃO VICTOR SANTOS FERNANDES

FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM GERADOR
DE CALOR MOVIDO A CASCA DA CASTANHA DE CAJU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.^a Dra. Maria Alexandra de Sousa Rios

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F399f Fernandes, João Victor Santos.

Ferramenta para análise da eficiência energética de um gerador de calor movido a casca da castanha de caju / João Victor Santos Fernandes. – 2023.
34 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.

Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.

1. Rendimento energético. 2. Exergia. 3. Gerador de vapor. 4. Biomassa. 5. Casca da castanha de caju.
I. Título.

CDD 620.1

JOÃO VICTOR SANTOS FERNANDES

FERRAMENTA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UM GERADOR
DE CALOR MOVIDO A CASCA DA CASTANHA DE CAJU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios
Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Rômulo do Nascimento Rodrigues
Universidade Federal do Ceará

Prof. Me. José Nogueira do Nascimento Júnior
Universidade Federal do Ceará

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre esteve presente em todos os momentos, me apoiando e acreditando em mim. À minha namorada, que me deu forças e incentivo para continuar, mesmo nos momentos mais difíceis. Aos meus amigos, que foram fundamentais para a realização da minha formação, seja pela ajuda, seja pela amizade; eu Duvido que tudo isso seria possível sem eles. E por fim, agradeço a Deus, por ter me dado forças para realizar esse sonho e por ter me guiado nessa árdua jornada.

RESUMO

A eficiência energética é uma das principais preocupações em relação ao uso de combustíveis, sejam eles de uma fonte limpa e renovável ou fósseis. Em se tratando de energia limpa, suas vantagens são atrativas, já que apresentam uma forma mais sustentável a respeito da utilização dos recursos naturais. Assim, abre-se uma gama de possibilidades no ramo da pesquisa desses meios. Atualmente, existem diversas áreas de estudo de fontes renováveis, dentre elas podemos destacar a biomassa. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a criação de uma ferramenta que possa analisar a eficiência energética de um gerador de calor, o qual opera utilizando um tipo de biomassa, a casca da castanha de caju. O desenvolvimento consiste na utilização de metodologias de cálculo de eficiência de caldeiras e análise de poder calorífico do combustível. Em suma, entende-se os valores relativos à operação do gerador através de eficiência de 1ª lei e destruição de exergia, e como eles se comportam de acordo com as características do biocombustível. Através da ferramenta *Excel* e da extensão *CoolProp*, foram desenvolvidos todos os cálculos deste projeto. Os resultados consistem na obtenção de valores referentes ao rendimento do gerador, avaliando também suas perdas. Dessa maneira, é possível plotar gráficos que correlacionam o rendimento da caldeira e quanta exergia é destruída, mostrando um ponto ótimo de operação de acordo com as condições iniciais. Portanto, é válido dizer que a ferramenta foi desenvolvida e cumpre suas expectativas, seguindo um plano metodológico capaz de analisar de forma simples a eficiência de um gerador de calor, e contribuindo para o estudo de futuros graduandos em engenharia, já que pode facilitar o entendimento teórico e prático na área de eficiência energética e biocombustíveis.

Palavras-chave: Rendimento energético; Exergia; Gerador de vapor; Biomassa; Casca da castanha de caju; CoolProp.

ABSTRACT

Energy efficiency is one of the main concerns regarding the use of fuels, whether they are from a clean and renewable source or fossil fuels. When it comes to clean energy, its advantages are attractive, as they present a more sustainable way of using natural resources. Thus, a range of possibilities is opened up in the field of research on these means. Currently, there are several areas of study on renewable sources, among them biomass can be highlighted. Therefore, this work aims to create a tool that can analyze the energy efficiency of a heat generator that operates using a type of biomass, cashew nut shell. The development consists of using boiler efficiency calculation methodologies and fuel calorific power analysis. In summary, the values related to the operation of the generator are understood through 1st law efficiency and exergy destruction, and how they behave according to the characteristics of the biofuel. All calculations of this project were developed using the Excel tool and the CoolProp extension. The results consist of obtaining values related to the generator efficiency, also evaluating its losses. Thus, it is possible to plot graphs that correlate the efficiency of the boiler and how much exergy is destroyed, showing an optimal point of operation according to the initial conditions. Therefore, it is valid to say that the tool has been developed and fulfills its expectations, following a methodological plan capable of analyzing the efficiency of a heat generator in a simple manner, and contributing to the study of future engineering graduates, as it can facilitate theoretical and practical understanding in the field of energy efficiency and biofuels.

Keywords: Energy efficiency; Exergy; Steam generator; Biomass; Cashew nut shell; CoolProp.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama esquemático de um ciclo de potência.....	12
Figura 2- Ciclo Rankine	12
Figura 3- Caldeiras flamotubular e aquatubular	14
Figura 4- Pré-aquecedor de ar SFW	15
Figura 5- Projeto Instalação Pré Ar – SFW	16
Figura 6- Produtos derivados do caju	17
Figura 7- Interface da calculadora.	26
Figura 8- Representação do CoolProp.....	27
Figura 9- Valores de entrada e de saída do CoolProp.....	28
Figura 10- Valores de propriedades da água.....	28
Figura 11- Valores referentes ao ar de entrada	29
Figura 12- Valores referentes ao ar de saída.....	29
Figura 13- Comportamento das variações de eficiência e destruição de exergia de acordo com as variações de temperatura dos fluidos de trabalho. Ar variando de 200 a 352°C e água a 20°C.....	30
Figura 14- Comportamento das variações de eficiência e destruição de exergia de acordo com as variações de temperatura dos fluidos de trabalho. Água variando de 20 a 105°C e ar a 200°C.....	30
Figura 15- Curva de variação de ponto ótimo.	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados médios da composição elementar da casca da castanha de caju	22
Tabela 2- Dados de catálogo do fabricante.....	23
Tabela 3- Fração mássica e molar da queima de 100 kg de Casca de Castanha de Caju	24
Tabela 4- Dados de entrada e saída da água e do combustível.....	26
Tabela 5- Dados de saída de destruição de exergia.	26
Tabela 6- Dados de entrada e de saída referentes ao ar.	26
Tabela 7- Dados de saída referentes às perdas.	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivos gerais.....	11
1.1.2	Objetivos específicos	11
2	FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Ciclo de Potência	12
2.2	Ciclo Rankine.....	12
2.3	Caldeira	13
2.4	Pré-aquecedor de ar	14
2.5	Produção da castanha de caju	16
2.6	Poder calorífico.....	17
2.7	Teor de umidade	18
2.8	Poder calorífico superior e inferior	18
2.9	Descarga de fundo da caldeira	19
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	Biocombustível.....	22
3.2	Caldeira	22
3.3	Pré-Aquecedor	23
3.4	Relação Ar-Combustível	23
3.5	Descarga de fundo da caldeira	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
4.1	Desenvolvimento da Ferramenta em <i>Excel</i>	25
4.1.1	Variáveis	25
4.1.2	Interface	27
4.2	CoolProp	27
4.3	Eficiência	29
5	CONCLUSÕES.....	32
5.1	Considerações finais	32
5.2	Considerações futuras	32
	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

O estudo da termodinâmica é essencial na formação do engenheiro, uma vez que permite que se entenda sobre o funcionamento físico de processos industriais em geral. Ela é o ramo da física que estuda o comportamento dos sistemas termodinâmicos, ou seja, sistemas que trocam calor e trabalho (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 2014). Ela é fundamental para a compreensão de diversos fenômenos que ocorrem no dia a dia, como o funcionamento de motores, a geração de energia elétrica em usinas termoelétricas e até mesmo o funcionamento de um refrigerador (VAN WYLEN; SONNTAG, 2016).

O estudo da termodinâmica é importante para a engenharia mecânica, pois permite ao engenheiro projetar e analisar o desempenho de máquinas térmicas, como motores a combustão interna, motores elétricos e ciclos de potência (FAIRES; SIMMANG, 2015). Além disso, a termodinâmica também é aplicada na análise de sistemas de refrigeração e na otimização de processos industriais (ÇENGEL; BOLES; KANOĞLU, 2016).

Neste trabalho de conclusão de curso, foi abordada a análise energética, de maneira aprofundada, explorando suas leis e principais conceitos, bem como sua aplicação na engenharia mecânica. Sendo assim, vale ressaltar os estudos referentes às emissões de gases que contribuem para a poluição, além do uso eficiente dos combustíveis, visando formas de produção de energia que sejam menos prejudiciais ao meio ambiente (MORAN et al., 2013). Dessa forma, é necessário entender e conhecer a importância do uso de biocombustíveis, uma vez que faz jus ao uso de uma forma limpa de energia e também permite o estudo do seu melhor uso de acordo com a conjuntura.

Durante os últimos anos, tem ocorrido um movimento que diz respeito ao uso cada vez maior de fontes energéticas alternativas, visando diminuir a emissão de CO₂ (URQUIAGA; ALVES; BOODEY, 2005). Assim, o uso de biocombustíveis tornou-se uma alternativa ao controle de gases do efeito estufa (LEITE; LEAL, 2007). Tais fatores contribuem para que os biocombustíveis sejam alvo de estudos de eficiência energética, de forma a entender melhor as vantagens energéticas e econômicas do seu uso.

Conforme Alencar et al. (2018) o Ceará é um dos principais produtores da castanha de caju no Brasil. Um dos subprodutos do processo produtivo da castanha do caju é a sua casca, a qual pode ser utilizada como biocombustível. Levando em conta o quadro citado, este trabalho buscou entender melhor sobre a eficiência do uso de um biocombustível, a casca da castanha do caju, além de utilizar de metodologias que facilitem o entendimento da sua aplicação e que permitam uma explicação simplificada do processo de análise energética.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Desenvolvimento de uma ferramenta no *Excel* que possa calcular a eficiência e a perda de um gerador que utiliza como combustível a casca de castanha de caju.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver a habilidade de avaliar um biocombustível e suas características;
- Desenvolver a habilidade de análise para efetuar os cálculos necessários no projeto de um gerador de calor;
- Apresentar um meio simples para o desenvolvimento das habilidades citadas acima, de forma a guiar futuros graduandos em engenharia.

2 FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA

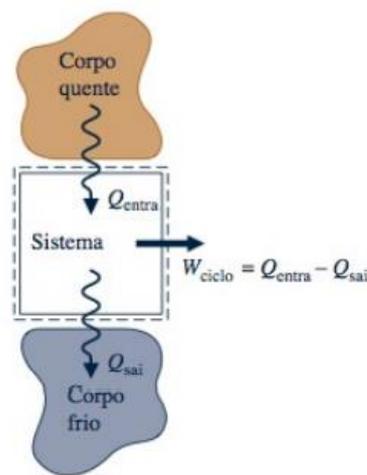
2.1 Ciclo de Potência

De acordo com Moran et al. (2013), qualquer sistema termodinâmico está sujeito a um balanço de energia conforme a seguinte equação 2.1.

$$\Delta E_{CICLO} = Q_{CICLO} - W_{CICLO} \quad (2.1)$$

Em que Q e W representam as transferências líquidas de calor e de trabalho respectivamente. Um ciclo de potência pode ser representado de acordo com figura 1.

Figura 1- Diagrama esquemático de um ciclo de potência



Fonte: Moran et al. (2013).

Conforme Moran et al. (2013), o ciclo apresentado na figura 1 fornece uma transferência líquida de energia para a vizinhança sob a forma de trabalho, o qual podemos entender pela equação 2.2.

$$W_{CICLO} = Q_{ENTRA} - Q_{SAI} \quad (2.2)$$

Em que Q_{entra} e Q_{sai} representam respectivamente a transferência de calor do corpo quente para o sistema e a transferência de calor do sistema para o corpo frio. Assim, a eficiência do sistema pode ser interpretada como o quanto ele aproveita a partir do calor que é fornecido, podendo ser expressa como a razão entre o trabalho fornecido e a transferência de calor recebida pelo corpo quente conforme a equação 2.3.

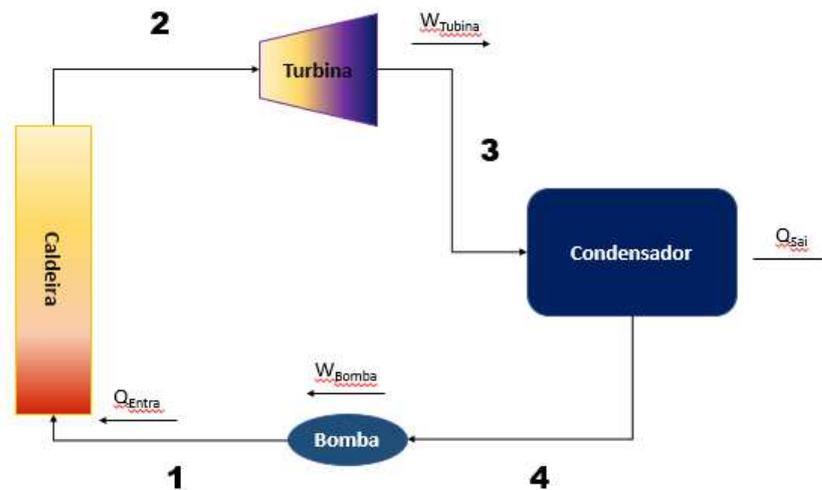
$$\eta_{SISTEMA} = \frac{W_{CICLO}}{Q_{ENTRA}} \quad (2.3)$$

2.2 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é formado por quatro processos: aquecimento de vapor, expansão de

vapor, resfriamento de vapor e compressão de vapor. No primeiro processo, o fluido é aquecido em uma caldeira até chegar à temperatura de ebulição. Em seguida, o vapor é expandido em uma turbina, gerando trabalho. Depois, o vapor é resfriado em um condensador até chegar à temperatura ambiente. Por fim, o vapor condensado é compressivo e retorna à caldeira para iniciar o ciclo novamente (VAN WYLEN; SONNTAG, 2016). Podemos ver esses processos na figura 2.

Figura 2- Ciclo Rankine



O ciclo Rankine é amplamente utilizado na geração de energia elétrica em usinas termoelétricas. Ele é também usado em sistemas de refrigeração e em outras aplicações que requerem a produção de trabalho a partir de calor (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 2014).

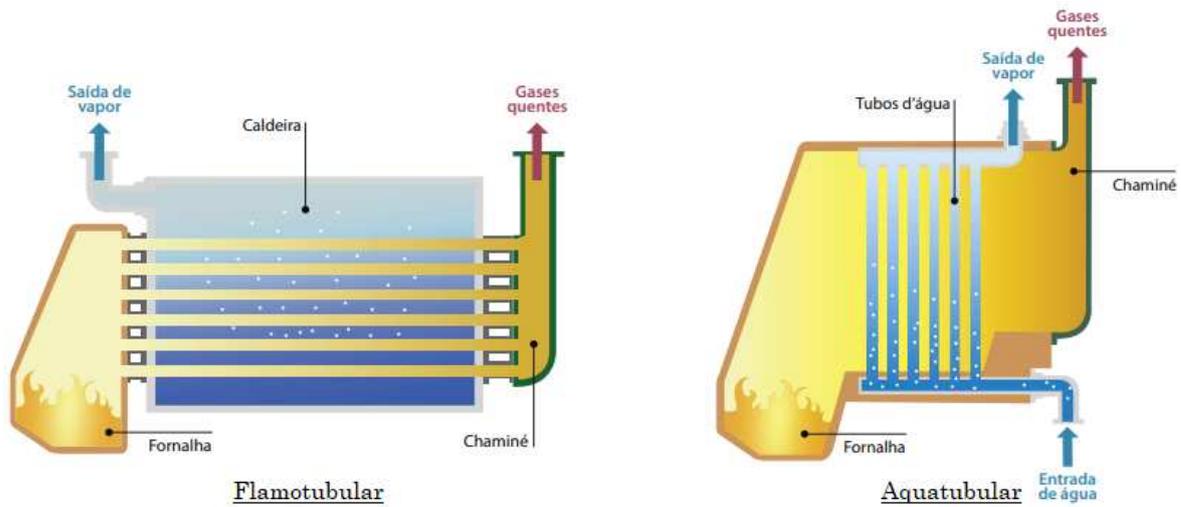
O rendimento térmico do ciclo Rankine pode ser expressado da mesma forma que a eficiência do ciclo de potência. Vale frisar que o rendimento do ciclo Rankine é menor do que o rendimento do ciclo de Carnot, pois o ciclo Rankine é um modelo para motores térmicos reais, que apresentam perdas de calor e de trabalho (KONDEPUDI; PRIGOGINE, 2014). No entanto, o ciclo Rankine é um modelo eficiente e amplamente utilizado na prática, especialmente na geração de energia elétrica (VAN WYLEN; SONNTAG, 2016).

2.3 Caldeira

Segundo Vergnhanini Filho (2018), a caldeira consiste em um trocador de calor responsável pela transferência de calor dos gases de combustão para a água de alimentação, fazendo com que a mesma passe para o estado de vapor saturado.

Dentre os tipos de caldeira, pode-se ressaltar as de tipo flamotubular e aquatubular, as quais podem ser vistas na figura 3.

Figura 3- Caldeiras flamotubular e aquatubular



Fonte: Vergnhanini Filho (2018).

Segundo Trevelim (2013), caldeiras do tipo flamotubular consistem naquelas em que os gases da combustão transferem calor ao se movimentarem por dentro dos tubos, os quais estão em contato com a água de alimentação. Já nas caldeiras do tipo aquatubular, o interior dos tubos é ocupado pela água de alimentação, enquanto os gases da queima transferem calor pela região externa ao tubo, fazendo assim com que a área de transferência de calor acabe sendo maior nesse tipo de caldeira.

Conforme Trevelim (2013) aponta, as flamotubulares são geradores de pequeno e médio porte, uma vez que a sua capacidade de produção de vapor é inferior, trabalhando com baixas pressões. No que diz respeito ao uso das aquatubulares, seu uso é ideal quando se espera níveis de pressão e rendimento consideravelmente maiores.

2.4 Pré-aquecedor de ar

Os pré-aquecedores de ar são equipamentos utilizados em processos industriais para aquecer o ar antes de sua entrada em uma câmara de combustão ou em outros equipamentos (THRING, 1992). Eles são amplamente utilizados em usinas térmicas, caldeiras industriais e em outras aplicações em que o ar precisa ser aquecido para melhorar o rendimento ou a eficiência do sistema (GRIMALDI; BECCALI, 2008). De acordo com Jabbari, Kianmehr e Tavakoli (2005), esses equipamentos também podem ser utilizados em sistemas de secagem, para aumentar a eficiência do processo e reduzir o consumo de energia. A figura 4 ilustra um tipo de pré-aquecedor.

Figura 4- Pré-aquecedor de ar SFW

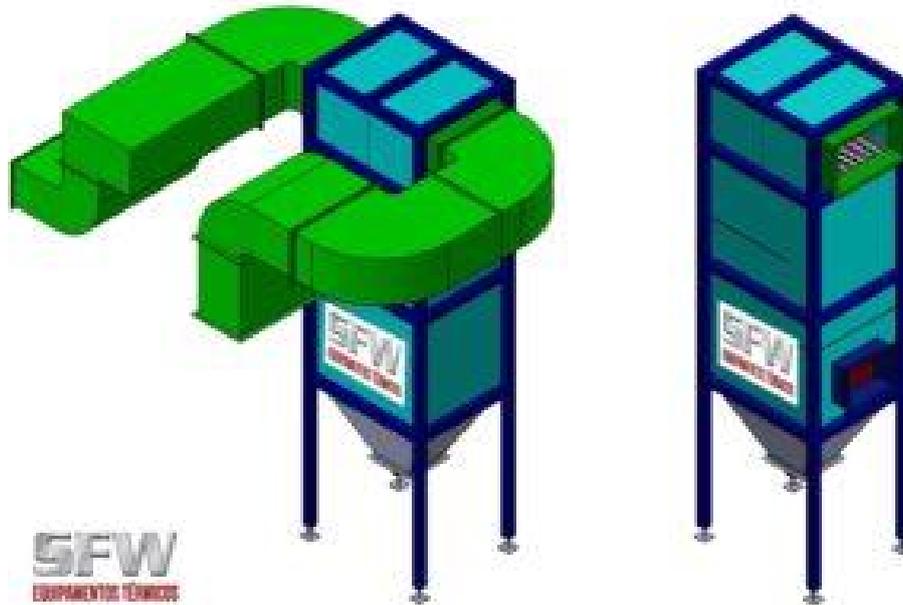


Fonte: SFW SISTEMAS TÉRMICOS (2022).

O pré-aquecedor de ar pode ser um equipamento simples, como um trocador de calor de tubos a serpentina, ou pode ser um sistema mais complexo, sendo movido a gás (THRING, 1992). O tipo a ser utilizado depende da aplicação e das condições de operação (GRIMALDI; BECCALI, 2008). Segundo Chen, Chen e Yang (2007), os pré-aquecedores de ar a gás são mais eficientes do que os trocadores de calor de tubos a serpentina, mas podem ser mais caros e complexos de serem projetados e construídos.

O pré-aquecedor de ar é projetado para aumentar a temperatura do ar de entrada, sem alterar sua pressão e volume (THRING, 1992). Isso é importante para garantir que o ar esteja em condições ideais para a combustão ou para o processo em questão (GRIMALDI; BECCALI, 2008). De acordo com Süleyman, Kucuk e Kucuk (2013), o aumento da temperatura do ar também pode melhorar o rendimento do sistema, pois aumenta a eficiência da combustão ou do processo. A figura 5 ilustra um exemplo de projeto de pré-aquecedor.

Figura 5- Projeto Instalação Pré Ar – SFW



Fonte: SFW SISTEMAS TÉRMICOS (2022).

De forma geral, esses trocadores de calor são importantes em processos industriais, pois permitem aumentar a eficiência do sistema e reduzir o consumo de energia. Eles são projetados de acordo com as condições de operação do sistema em que estão inseridos e devem ser dimensionados corretamente e construídos com materiais resistentes ao calor e à corrosão. A manutenção preventiva também é importante para garantir a eficiência e a durabilidade do equipamento.

2.5 Produção da castanha de caju

O Brasil é um país que possui em abundância as plantas do tipo *Anacardium occidentale L.*, a qual é coletivamente conhecida como cajueiro. De acordo com Almeida et al. (2017), o investimento nesse tipo de cultura faz-se viável em muitas regiões do país, uma vez que, em seu estudo, demonstrou uma prévia rentabilidade positiva perante um planejamento de longo prazo acerca desse plantio. Assim, levando em conta a larga produção de caju, vale ressaltar outros produtos que advêm do mesmo processo, dos quais podemos destacar a castanha do caju.

Segundo o IBGE (2022), no ano de 2021 foram produzidas aproximadamente 111 mil toneladas de castanha de caju no Brasil, sendo o Ceará responsável pela maior parte dessa produção. Isso faz com que a aplicabilidade desse item seja vasta, já que é possível explorar várias possibilidades mediante a sua elevada produção atualmente.

Segundo Guanzirolí, Souza Filho e Valente Junior (2009), o refinamento das castanhas feito pelas indústrias grandes e pequenas faz com que seja gerada a casca da castanha de caju

(CCC) como um subproduto. Amorati et al. (2001) aponta que aproximadamente 25% da massa da castanha seja composta pelo líquido retirado de sua casca, conhecido como líquido da casca da castanha de caju (LCCC). Segundo Osmari et al. (2015), o LCCC é um líquido inflamável e possui diversas aplicações industriais, desde a produção de materiais como resina e verniz até a alimentação animal. Podemos ver um esquema dos derivados do caju na figura 6.

Figura 6- Produtos derivados do caju



Fonte: Osmari et al. (2015).

2.6 Poder calorífico

Em se tratando de potencial energético das substâncias, deve-se destacar o poder calorífico, uma vez que é a representação da quantidade de energia que determinada substância possui e pode liberar durante a combustão.

Segundo Francesquett et al. (2013), a definição de poder calorífico consiste no calor liberado por um composto durante a reação do mesmo com oxigênio molecular, resultando em produtos de oxidação. Assim, pode-se constatar que é necessário conhecer a composição da substância assim como seu processo de queima para que haja entendimento acerca de seu poder calorífico.

A unidade de medida do poder calorífico pode ser expressa em kJ/kg, kcal/kg, btu/lb entre outras unidades de energia. Normalmente, ela é expressa como poder calorífico superior (PCS) ou poder calorífico inferior (PCI).

2.7 Teor de umidade

É importante a avaliação do teor de umidade das amostras para a realização de ensaios que envolvam a determinação dos valores de PCS e PCI. Segundo Poli et al. (2013), que em seus ensaios desenvolveu uma metodologia para realizar essa verificação, pode-se avaliar o teor de umidade da substância a partir da equação 2.4.

$$w = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{cs}} + m_{\text{água}}} \quad (2.4)$$

Em que:

w = teor de umidade (% em massa, expressa entre 0 e 1);

$m_{\text{água}}$ = massa de água evaporada em kg;

m_{cs} = massa do combustível seco em kg.

2.8 Poder calorífico superior e inferior

Resumidamente, o poder calorífico superior consiste na liberação de energia da queima do combustível, considerando que exista água condensada após a combustão. Conforme Francesquett et al. (2013), no PCS é considerada que a energia da combustão da água é recuperada durante o processo, não ocorrendo o mesmo para o PCI, em que se subtrai a energia utilizada para o processo de vaporização da água. Assim, o valor do PCS excede o valor do PCI, levando em conta a energia que seria liberada na condensação da água existente no produto da reação.

Segundo Moran et al. (2013), para o cálculo do PCS, faz-se a análise da entalpia da combustão, a qual consiste na diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes. A equação 2.5 representa a entalpia.

$$\overline{h}_{\text{RP}} = \sum_{\text{P}} n_e * \overline{h}_e - \sum_{\text{R}} n_i * \overline{h}_i \quad (2.5)$$

Em que:

h_{RP} = Entalpia da combustão em base molar;

n_e = Coeficiente da equação de reação que fornece os mols dos produtos;

h_e = Entalpia dos produtos em base molar;

n_i = Coeficiente da equação de reação que fornece os mols dos reagentes;
 h_i = Entalpia dos reagentes em base molar.

Vale ressaltar que essa é uma das diversas formas que existem de mensurar-se o poder calorífico e que pode mudar dependendo da abordagem utilizada. Segundo Poli et al. (2013), para o cálculo do PCI, leva-se em conta o valor referente ao PCS seco, o qual considera que a amostra apresenta teor de umidade igual a 0. Assim, pode-se estimar um PCI corrigido com o teor de umidade da amostra a partir da equação 2.6.

$$PCI_w = (1 - w) * PCI - w * 2441 \quad (2.6)$$

Em que:

PCI_w = Poder Calorífico Inferior, levando em conta a umidade w ;

w = teor de umidade (% em massa, expressa entre 0 e 1);

PCI = Poder Calorífico Inferior.

Dessa forma, o valor encontrado de PCI_w seria o equivalente à energia total da fração seca menos a entalpia de vaporização da parcela de água no combustível.

2.9 Descarga de fundo da caldeira

É importante pensar na vida útil da caldeira e também nos processos que existem que podem beneficiar sua longevidade. Levando isso em conta, tem-se o processo de descarga de fundo para caldeiras. Segundo Lorensetti (2020), a qualidade da água de alimentação é essencial para a segurança e para a eficiência desse equipamento, fazendo com que seja necessária a eliminação de resíduos de sais e lodo para que a caldeira possa operar de forma padrão. Dessa forma, uma parte da água de alimentação não é transformada em vapor e é eliminada no sistema de purgas.

De forma geral, é importante ter o conhecimento a respeito desse fator quando se pensa em mensurar cálculos de eficiência, uma vez que a ideia é ser o mais assertivo possível.

Além do mais, a ideia é que se pense a respeito da pureza da água de alimentação, uma vez que essa característica faz com que a descarga se torne menor.

Abaixo, pode-se ver a relação que representa a água de alimentação com a descarga na equação 2.7.

$$m_L = \frac{m_V}{1 - d} \quad (2.7)$$

Em que:

m_L = água de alimentação (t/h);

m_V = vapor produzido (t/h);

d = percentual de descarga.

3 METODOLOGIA

No desenvolvimento deste trabalho, levou-se em conta a hipótese de que o volume de controle estudado estava em estado de regime permanente.

Escolheu-se utilizar da metodologia de cálculo desenvolvida pelo Laboratório de Engenharia Térmica (LET) (VERGNHANINI FILHO, 2018), em que se calcula o rendimento térmico de caldeiras e as perdas referentes aos processos de queima.

O rendimento da caldeira pode ser calculado através da equação 3.1.

$$\eta = \frac{m_V * h_V - m_{H_2O} * h_{H_2O}}{m_c * PCI_c + m_c * Cp_c * (T_c - T_{REF.}) + m_{AR} * Cp_{AR} * (T_{AR} - T_{REF.})} \quad (3.1)$$

Em que:

m_v = vazão mássica de vapor gerado em kg/h;

h_v = entalpia específica do vapor gerado em kJ/kg;

m_{H_2O} = vazão mássica de água fornecida à caldeira em kg/h;

h_{H_2O} = entalpia específica da água de alimentação da caldeira em kJ/kg;

m_c = vazão mássica do combustível em kg/h;

PCI_c = poder calorífico inferior do combustível em kJ/kg;

Cp_c = calor específico médio do combustível entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C);

T_{REF} = temperatura de referência em °C;

T_c = temperatura de entrada do combustível na caldeira em °C;

m_{AR} = vazão mássica do ar de combustão em kg/h;

T_{AR} = temperatura do ar de combustão na entrada do volume de controle em °C;

Cp_{AR} = calor específico médio do ar entre a temperatura de entrada na caldeira e a de referência, à pressão constante em kJ/(kg °C).

Além do mais, também se utilizou do cálculo de potência não aproveitada desenvolvido pelo LET, o qual pode ser descrito pela equação 3.2.

$$P = P_{gases} + P_{CO} + P_{MPO} + P_{purgas} + P_{cinzas} + P_{ambiente} \quad (3.2)$$

Em que:

P_{gases} = potência perdida associada aos gases de combustão em kJ/h;

P_{CO} = potência não aproveitada associada à presença de CO nos gases de combustão em kJ/h;

P_{MPO} = potência não aproveitada associada à presença de carbono nos sólidos presentes nos gases de combustão em kJ/h;

P_{purgas} = potência perdida por purgas em kJ/h;

P_{cinzas} = potência perdida associada à retirada de cinzas do processo em kJ/h;

$P_{ambiente}$ = potência perdida para o ambiente em kJ/h.

3.1 Biocombustível

O combustível escolhido para essa análise foi a Casca da Castanha de Caju (CCC), uma vez que ela é um biocombustível em grande abundância na nossa região (GADELHA et al., 2015). Primeiramente, foi necessário entender a composição e o poder calorífico da CCC para dar prosseguimento à análise. Conforme Gadelha et al. (2015), o PCI adotado para esse estudo foi de 17,52 MJ/kg e o teor de umidade adotado foi de 14,1%. Ademais, foi utilizado para esse estudo os dados referentes à CCC sem LCCC por conta do menor teor de umidade se comparado à CCC com o LCCC, que consistia em 21,85% de umidade, superior aos 14,1% da outra amostra. Conforme o artigo de Souza et al. (2019), os dados de análise elementar da CCC são:

Tabela 1- Dados médios da composição elementar da casca da castanha de caju

Elemento	Percentual (%)
N	0,25
C	52,91
H	6,84
O	29,88
S	0
Cinzas	10,13

Em outras literaturas como em Maia (2021), a CCC contém cerca de 50-55% de carbono, 5-6% de hidrogênio, 30-35% de oxigênio e 1-2% de nitrogênio. Conforme Tsai et al. (2006), outros tipos de biomassa como palha de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e casca de coco apresentam valores similares. Dessa forma, tem-se material suficiente que corrobora os dados utilizados para a composição elementar da CCC neste trabalho.

3.2 Caldeira

Para a escolha da caldeira, tem-se a caldeira FAM 15, um modelo que opera com combustíveis sólidos. A escolha desse modelo se deu por conta de o mesmo já trabalhar bem

com outros tipos de biocombustíveis. Na tabela 2 estão apresentados os dados que foram utilizados a partir do catálogo disponível para esse modelo:

Tabela 2- Dados de catálogo do fabricante

Modelo	FAM 15
Produção de vapor (água a 20°C)	15.000 kg/h
Produção de vapor (água a 80°C)	16.500 kg/h
Produção de vapor (água a 105°C)	17.250 kg/h
Capacidade térmica	9.662.442 kcal/h
Pressão de operação	153 psig
Rendimento (lenha/cavaco)	87/88 %
Consumo de lenha (PCI=2750 kcal/kg)	4.039 kg/h
Consumo de cavaco (PCI=2750 kcal/kg)	3.993 kg/h
Temperatura de saída dos gases	180°C
Teor de CO ₂ nos gases (lenha/cavaco)	13/15 %
Superfície de aquecimento	503 m ²
Taxa de evaporação	30 kg/h*m ²
Volume de água em operação	24,2 m ³
Volume de água com a caldeira cheia	27,5 m ³

Levando em conta que os dados de operação são referentes a combustíveis sólidos, foram considerados para esse estudo com a casca da castanha de caju.

Conforme o catálogo, juntamente com a caldeira, é fornecido um pré-aquecedor, o qual justifica as temperaturas elevadas de ar de admissão que foram utilizadas para esse estudo de caso.

3.3 Pré-Aquecedor

Como foi citado anteriormente, a caldeira é acompanhada de um pré-aquecedor de ar, o qual é útil para o desenvolvimento desse estudo. Conforme Caillat (2017), pré-aquecer o ar beneficia o processo de combustão, portanto, fez-se uso desse artifício, visando melhor desempenho. As análises consistem em utilizar um intervalo de temperatura de ar de 200 a 352 °C, a fim de aprimorar os resultados obtidos.

3.4 Relação Ar-Combustível

De acordo com Segundo (2015), a queima que ocorre dentro de uma caldeira pode ser completa ou incompleta. Quando a combustão é incompleta, o combustível não é completamente queimado, o que resulta em mais gases de saída indesejáveis, como o monóxido de carbono. Quando a combustão é completa, o resultado é dióxido de carbono e água (SILVA et al., 2019). A melhor performance é alcançada com a combustão completa, que envolve a admissão de ar mais elevada para reduzir os gases poluentes gerados pela queima (SEGUNDO, 2015).

Diante desse quadro, a relação ar-combustível é uma medida da quantidade de ar e de combustível que estão sendo misturados e queimados durante o processo de combustão. Se houver pouco ar em relação ao combustível, a chama pode ficar instável e pode haver uma falha na combustão, o que resulta em uma redução da potência e um aumento da emissão de poluentes. Se houver muito ar em relação ao combustível, a chama pode se tornar muito quente, o que pode danificar o equipamento e aumentar a emissão de poluentes. Em resumo, a relação ar-combustível é importante para garantir uma combustão eficiente e potente.

Dessa forma, considerou-se uma queima completa de combustível para esse estudo, e assim, pôde-se analisar a relação estequiométrica entre ar e combustível a partir das frações molares de cada elemento presente na CCC.

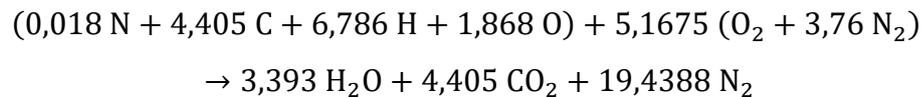
Conforme Silva et al. (2018), utilizou-se do cálculo do ar estequiométrico, a fim de analisar a vazão mássica de ar de entrada da forma mais eficiente. Fez-se a análise utilizando os dados da tabela 1, visando estabelecer as proporções estequiométricas de cada componente da combustão. Dessa forma, calculou-se a queima de 100 kg de combustível. Os dados podem ser analisados na Tabela 3.

Tabela 3- Análise da queima de 100 kg de Casca de Castanha de Caju.

Elemento	Fração molar	Massa molecular (g/mol)	Massa (g)	mol	kmol
Nitrogênio	0,0025	14,005	250	17,85	0,018
Carbono	0,5291	12,01	52910	4405,50	4,405
Hidrogênio	0,0684	1,008	6840	6785,71	6,786
Oxigênio	0,2988	16	29880	1867,50	1,868
Enxofre	-	-	-	-	-
Cinzas	0,1013	-	-	-	-

Assim, obteve-se a seguinte fórmula para a reação da queima completa de 100 kg de

CCC:



Em que o primeiro fator do lado esquerdo representa o combustível, o segundo representa a admissão de ar e o fator do lado direito representa o produto da queima. Assim, pode-se substituir valores e calcular a proporção de ar-combustível presente na reação. Dessa maneira, tem-se que é necessário 709,59 kg de ar teórico para queimar 100 kg de CCC, ou seja, temos que a relação é aproximadamente 7,09 kg ar/kg combustível.

De acordo com Strobel, Waldner e Gablinger (2018), o excesso de ar na combustão é essencial para ajudar na obtenção de melhores resultados, portanto, levou-se em conta esse fator no desenvolvimento deste trabalho. Conforme Lora (2000), o excesso de ar aceitável para combustíveis sólidos está dentro de intervalo de 15 e 30%. Neste momento, optou-se por trabalhar com um valor de 20%.

3.5 Descarga de fundo da caldeira

Para esse projeto, optou-se por utilizar um percentual de 5% para a descarga da caldeira. Esse número é arbitrário e baseado nele, pode-se ter ciência de valores que propiciam uma melhor acurácia no que diz respeito ao cálculo de eficiência. Ainda, é um valor que também reflete o nível de pureza da água de alimentação que está sendo utilizada. Ter conhecimento desse tipo de variável é imprescindível no projeto de qualquer gerador de energia, uma vez que a qualidade da fonte de água irá refletir diretamente nos resultados energéticos obtidos da planta em questão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento da Ferramenta em *Excel*

Os cálculos deste trabalho foram desenvolvidos na ferramenta *Microsoft Excel*. Neste tópico são citadas as variáveis utilizadas para o desenvolvimento dos cálculos, assim como a interface da calculadora.

4.1.1 Variáveis

Trabalhou-se com os seguintes dados de entrada e saída referentes à água e ao combustível:

Tabela 4- Dados de entrada e saída da água e do combustível

Entrada	$m_{\text{vap}}(\text{t/h})$	$P_{\text{vap}}(\text{kPa})$	$T_{\text{Liq}}(^{\circ}\text{C})$	$P_{\text{Liq}}(\text{kPa})$	$m_{\text{comb}}(\text{t/h})$	d	Umidade
		15	1054,9	20	1054,9	4	5%
Saída	n	$h_{\text{vap}}(\text{kJ/kg})$	$T_{\text{vap}}(^{\circ}\text{C})$	$m_{\text{Liq}}(\text{t/h})$	$h_{\text{Liq}}(\text{kJ/kg})$	PCI(kJ/kg) úmido	PCI(J/kg) seco
	67,8%	2779,1119	182,2	15,79	84,9043	15049,34	17520000

Em que temos como dados de entrada: vazão de vapor de água, pressão do vapor saturado, temperatura da água de alimentação, pressão da água de alimentação, vazão de combustível, descarga do processo e umidade do combustível respectivamente. Como dados de saída temos: eficiência, entalpia específica do vapor, temperatura do vapor, vazão da água de alimentação, entalpia específica da água de alimentação, PCI úmido e PCI seco respectivamente.

Além do mais, tem-se os dados de saída referentes à destruição de exergia:

Tabela 5- Dados de saída de destruição de exergia.

$s_{\text{Liq}}(\text{kJ/kg})$	$s_{\text{vap}}(\text{kJ/kg})$	ED (kW)
0,2963	6,5665	13.227

Onde se tem a exergia específica do líquido, a exergia específica do vapor e a destruição de exergia respectivamente.

Os dados de entrada e de saída referentes ao ar estão na tabela abaixo:

Tabela 6- Dados de entrada e de saída referentes ao ar.

Dados de Entrada	$T_{\text{ent ar}}(^{\circ}\text{C})$	$T_{\text{sai ar}}(^{\circ}\text{C})$	$m_{\text{ar/m comb}}$	-	-
		200	180	7,10	-
Dados de Saída	$h_{\text{ent ar}}(\text{kJ/kg})$	$s_{\text{ent ar}}(\text{kJ/kg}\cdot\text{K})$	$s_{\text{sai ar}}(\text{kJ/kg}\cdot\text{K})$	$h_{\text{sai ar}}(\text{kJ/kg})$	$m_{\text{ent ar}}(\text{t/h})$
	475,47	2,1628	2,1188	455,01	34,06

Onde temos a temperatura de entrada do ar, a entalpia específica do ar de entrada, a exergia específica do ar de entrada, a temperatura de saída do ar, a exergia específica do ar de saída, a entalpia específica do ar de saída, a vazão de ar e a relação ar-combustível.

Os dados de saída da tabela abaixo são referentes às perdas:

Tabela 7- Dados de saída referentes às perdas.

$P_{\text{GASES}}(\text{kW})$	$P_{\text{CO}}(\text{kW})$	$P_{\text{MPO}}(\text{kW})$	$P_{\text{PURGAS}}(\text{kW})$	$P_{\text{CINZAS}}(\text{kW})$	$P_{\text{AMB}}(\text{kW})$
324,1271	-	-	590,8350	-	-

Levando em conta as limitações para o desenvolvimento deste projeto, utilizou-se apenas as perdas referentes aos gases e às purgas, desprezando o restante.

4.1.2 Interface

Na figura 7, é possível observar a versão da interface da calculadora criada. Do lado esquerdo, encontram-se os dados de entrada que o usuário deve inserir, enquanto do lado direito estão os dados de saída. As operações foram projetadas para trabalhar com a casca da castanha de caju, ou seja, esses valores se aplicam exclusivamente a esse tipo de combustível. É importante notar que essa calculadora foi desenvolvida especificamente para trabalhar com a casca da castanha de caju e não pode ser utilizada para outros tipos de combustível.

Figura 7- Interface da calculadora

Combustível Casca da Castanha de Caju	
Variáveis da Água	Eficiência 68%
Qtde de vapor a ser produzida (t/h)	15
Pressão de operação (kPa)	1054,9
Temperatura da água de alimentação (°C)	20
Qtde de combustível (t/h)	4
Percentual de descarga (%)	0,05
Umidade do combustível (%)	0,141
Variáveis do Ar	Perdas
Temperatura de entrada (°C)	200
Temperatura de saída (°C)	180
Massa de ar/Massa de combustível	7,10
	Gases (kW) 324,1
	Purgas (kW) 590,8

A interface deste trabalho foi projetada de maneira simples, mas reflete a integração de todos os esforços usados como base para o seu desenvolvimento.

4.2 CoolProp

Para garantir a acurácia dos valores de entalpia e entropia, usufruiu-se da extensão do CoolProp para Excel, a qual pode ser vista na figura 8.

Figura 8- Representação do CoolProp.



CoolProp
EXAMPLE CALCULATIONS

Function Usage	Units	COOLPROP	Expected value	Function Call
Critical temperature of R410A:	K	344,494	344,494	=PropsSI("R410A","Tcrit")
Critical density of propane:	kg/m³	220,4781	220,4781	=PropsSI("Propane","rho crit")
Density of Nitrogen at STP:	kg/m³	1,25038613	1,25038613	=PropsSI("Dmass","T",298.15,"P",101325,"HEOS::Nitrogen")
Density of Air at STP:	kg/m³	1,293065616	1,293065616	=PropsSI("Dmass","T",298.15,"P",101325,"HEOS::Air")
Boiling point of water at 1 atm:	°C	99,97429585	99,97429585	=PropsSI("T","P",101325,"Q",0,"HEOS::Water")-273.15
Boiling point of water at 1 atm:	°C	#VALUE!	99,97429585	=PropsSI("T","P",101325,"Q",0,"REFPROP::Water")-273.15

Visando a automatização da planilha que estava sendo construída, o CoolProp foi essencial para permitir o cálculo rápido e eficiente das propriedades em questão. As entalpias e entropias específicas da água foram calculadas por meio de funções dessa ferramenta.

A verificação dos resultados obtidos se deu através da comparação entre os valores retornados pelo CoolProp e o cálculo manual utilizando as propriedades tabeladas. Como podemos ver na figura 9, os valores do CoolProp para vapor saturado a 10,549 bar são:

Figura 9- Valores de entrada e de saída do CoolProp.

T vap(°C)	P vap(Bar)	h vap(kJ/kg)	s vap (kJ/kg)
182,2137	10,549	2779,111927	6,56652778

Utilizando os dados tabelados encontrados no livro de estudo “Princípios de termodinâmica para engenharia” (MORAN et al., 2013), temos os valores da figura 10:

Figura 10- Valores de propriedades da água.

$p = 10,0 \text{ bar} = 1,0 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 179,91^\circ\text{C}$)					$p = 15,0 = 1,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 198,32^\circ\text{C}$)			
T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
Sat.	0,1944	2583,6	2778,1	6,5865	0,1318	2594,5	2792,2	6,4448

Fonte: Moran et al. (2013)

Fazendo a interpolação desses valores de saturação para 10,549 bar, os valores de entalpia e entropia específicas são 2779,6 (kJ/kg) e 6,5709 (kJ/kg·K) respectivamente. Esses valores apresentam apenas 0,02% e 0,07% de erro com relação aos valores retornados pela ferramenta. Dessa forma, é possível dizer que os valores retornados são úteis e válidos para o desenvolvimento de todos os cálculos referentes a entalpia e entropia da água.

Com relação aos valores de entalpia e entropia específicas do ar, notou-se uma diferença de valores com relação às tabelas utilizadas. Diante desse quadro, fez-se uma outra calculadora apenas para os valores referentes ao ar, utilizando as tabelas de propriedades do ar como referência e interpolando-as. Podemos ver a representação disso na figura 11 e na figura 12.

Figura 11 - Valores referentes ao ar de entrada

Entrada									
Maior	T Maior	h maior	s maior	h in	Menor	T Menor	h menor	s menor	s in
50	630	638,63	2,46048	631,3964	49	620	628,07	2,44356	2,44889
50	630	638,63	2,46048	631,3964	49	620	628,07	2,44356	2,44889
50	630	638,63	2,46048	631,3964	49	620	628,07	2,44356	2,44889
35	480	482,49	2,1776	475,4688	34	470	472,24	2,15604	2,162831
35	480	482,49	2,1776	475,4688	34	470	472,24	2,15604	2,162831
35	480	482,49	2,1776	475,4688	34	470	472,24	2,15604	2,162831
35	480	482,49	2,1776	475,4688	34	470	472,24	2,15604	2,162831
35	480	482,49	2,1776	475,4688	34	470	472,24	2,15604	2,162831
39	520	523,63	2,25997	514,5057	38	510	513,32	2,23993	2,242235
39	520	523,63	2,25997	514,5057	38	510	513,32	2,23993	2,242235
39	520	523,63	2,25997	514,5057	38	510	513,32	2,23993	2,242235

Figura 12 - Valores referentes ao ar de saída

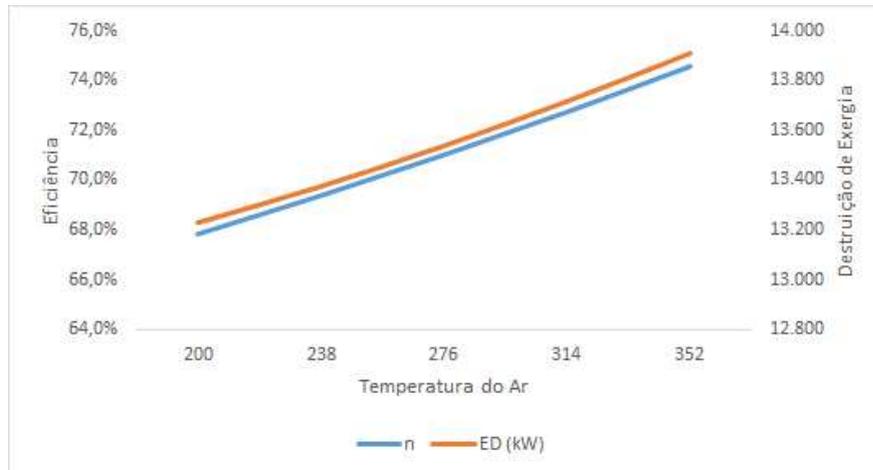
Saída									
Maior	T Maior	h maior	s maior	h out	Menor	T Menor	h menor	s menor	s out
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827
32	450	451,8	2,11161	455,0099	31	440	441,61	2,0887	2,118827

Assim como os outros recursos da ferramenta desenvolvida, essa parte também foi automatizada, tornando o uso da ferramenta o mais simples possível. Com relação aos valores, os mesmos foram obtidos através dos dados tabelados; assim, a verificação não foi necessária, uma vez que esses são os resultados das interpolações de dados verificados.

4.3 Eficiência

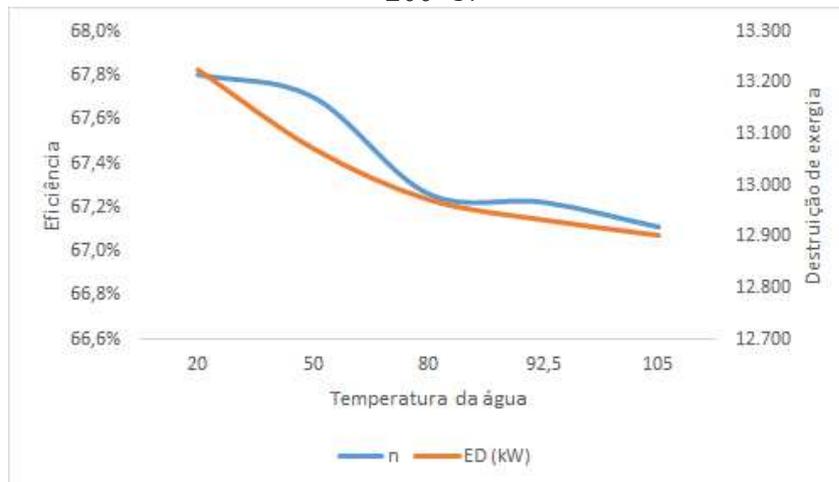
Fez-se uma série de simulações de operação variando as temperaturas de entrada dos fluidos de trabalho (água e ar) e as vazões, e notou-se que a eficiência estava dentro de um intervalo entre 64 e 75%.

Figura 2- Comportamento das variações de eficiência e destruição de exergia de acordo com as variações de temperatura dos fluidos de trabalho. Ar variando de 200 a 352°C e água a 20°C.



Como podemos ver na figura 13, o melhor cenário no que diz respeito à eficiência foi quando se trabalhou com a água de entrada a 20°C e temperatura do ar de entrada de 352°C. A eficiência do gerador de vapor para essa simulação foi de 74,6% e apresentou uma destruição de exergia de 13,9 MW.

Figura 3 - Comportamento das variações de eficiência e destruição de exergia de acordo com as variações de temperatura dos fluidos de trabalho. Água variando de 20 a 105°C e ar a 200°C.



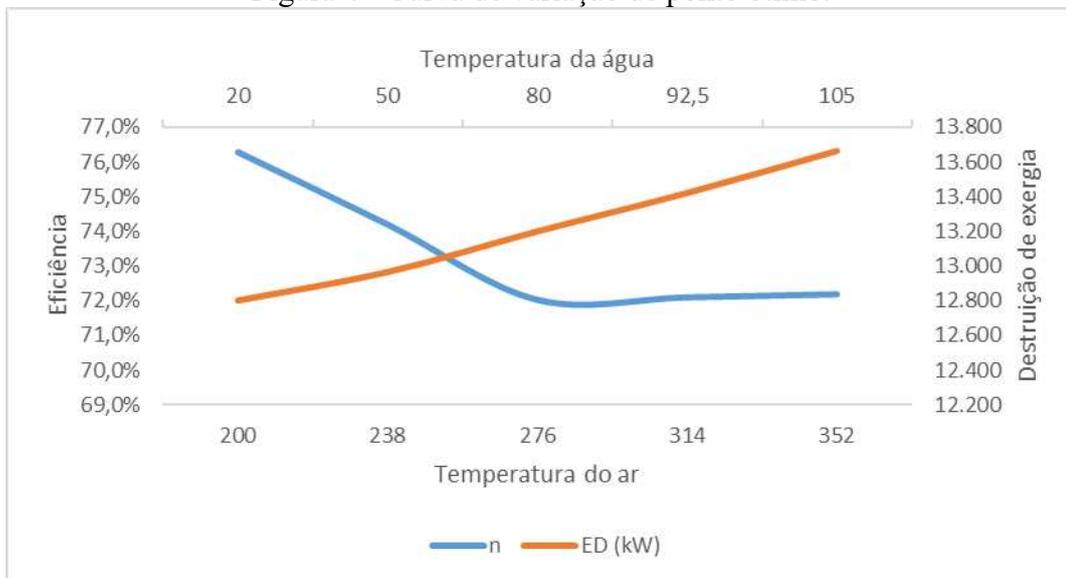
Analisando a figura 14, no que diz respeito à destruição de exergia, a menor destruição jaz onde se tem água de alimentação a 105°C e temperatura do ar de entrada a 200°C, com um valor de 12,9 MW. A eficiência nesse caso foi de 67,1%.

Os resultados apresentados estão de acordo com a literatura de estudo térmico, “Princípios de termodinâmica para engenharia” (MORAN et al., 2013), uma vez que se sabe que a grande variação de temperatura entre a entrada e a saída do gerador de vapor reflete em

uma melhor eficiência, no entanto, fomenta uma maior destruição de exergia por conta das irreversibilidades do processo.

Além disso, é possível avaliar e buscar um ponto de operação ótimo, considerando as temperaturas dos fluidos de trabalho. Neste caso, as temperaturas do ar e da água estão variando. Dado que podem existir diversas condições de operação, é interessante poder ter essa visualização. Isso permite analisar como as temperaturas dos fluidos de trabalho influenciam o rendimento do sistema e ajuda a identificar o ponto de operação mais eficiente para cada cenário.

Figura 4 - Curva de variação de ponto ótimo.



Como podemos ver na figura 15, no ponto em questão, a água encontra-se a aproximadamente 70 °C e o ar a aproximadamente 257 °C. Dentro dessas condições, esse seria uma das possibilidades para trabalhar com um ponto ótimo de operação, balanceando a destruição de exergia com a eficiência térmica do gerador.

No que diz respeito à potência teórica perdida durante os processos do gerador das simulações, tem-se o valor de 0,91 MW. Ademais, a potência média desenvolvida nas simulações foi de 11,1 MW.

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Conclui-se que o trabalho desenvolvido foi satisfatório naquilo que se propunha. Construiu-se um plano metodológico que é capaz de analisar de forma simples a eficiência de um gerador de calor. Essa contribuição é importante para o estudo de futuros graduandos em engenharia, já que pode facilitar o entendimento teórico e prático acerca do aprendizado aprofundado de alguns tópicos importantes da termodinâmica.

Além do mais, desenvolveu-se com sucesso a ferramenta em *Excel* capaz de realizar os cálculos de forma pragmática. A ideia de estabelecer um meio que fosse o mais automatizado possível também foi alcançada, fazendo com que a ferramenta em questão possa ser útil para o que se propõe.

Ainda, entendeu-se melhor a respeito das nuances quando se trabalha com um biocombustível sólido como a casca da castanha de caju. Viu-se a importância de entender os métodos necessários para poder vir a utilizar um combustível desse tipo e a forma de encontrar os valores úteis para o prosseguimento da análise. Assim, independente da escolha de combustível, pode-se descobrir os dados que representam valores vitais de uma amostra com praticidade.

5.2 Considerações futuras

Levando em conta o tempo e o esforço colocado neste trabalho, não foi possível alcançar todas as proposições originais. Desse modo, como possíveis trabalhos futuros, existem três propostas. Pode-se aprimorar a ferramenta para que se possa trabalhar com mais de um combustível, de forma a criar um pequeno banco de dados com as informações de cada amostra. Além do mais, existe a possibilidade de expansão do tipo de combustível, que foi limitado para sólido neste trabalho. Adicionar a possibilidade de efetuar a análise com uma mistura de um ou mais combustíveis, para que se possa avaliar a eficiência do processo e comparar com outras situações. Ainda, apurar mais dados teóricos e práticos para sanar alguns fatores no cálculo de exergia que foram desconsiderados neste projeto.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, N. dos S. et al. Produção da Castanha de Caju nas microrregiões do Ceará no período de 1993 a 2016. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 4, n. 1, p. 103-116, 2018.
- ALMEIDA, L. H. F. et al. Viabilidade econômica da produção de caju (*Anacardium occidentale* L.). **Nativa**, v. 5, n. 1, p. 09-15, 2017.
- AMORATI, R. et al. Absolute rate constants for the reaction of peroxy radicals with cardanol derivatives. **Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2**, n. 11, p. 2142-2146, 2001.
- CAILLAT, S. Burners in the steel industry: utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing lines. **Energy Procedia**, v. 120, p. 20-27, 2017.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; KANOĞLU, M. **Thermodynamics: an engineering approach**. New York: McGraw-hill, 2016.
- CHEN, Y. Y.; CHEN, Y. J.; YANG, C. C. Air preheater design optimization for a steam power plant. **Energy Conversion and Management**, v. 48, n. 1, p. 121-127, 2007.
- FAIRES, J. D.; SIMMANG, J. P. **Numerical methods with applications**. Cengage Learning, 2015.
- FRANCESQUETT, J. Z. et al. Determinação do poder calorífico de amostras de gasolina utilizando espectroscopia no infravermelho próximo e regressão multivariada. **Orbital: The Electronic Journal of Chemistry**, v. 5, n. 2, p. 88-95, 2013.
- GADELHA, A. et al. Análise comparativa da casca da castanha de caju com e sem LCC para produção sustentável de combustível sólido. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC', 2015, Fortaleza. **Anais [...]** Ceará: Fortaleza, 2015.
- GRIMALDI, M.; BECCALI, G. **Heat exchangers for the chemical and process industries**. John Wiley & Sons, 2008.
- GUANZIROLI, C. E.; SOUZA FILHO, H. M.; VALENTE JUNIOR, A. S. Estudo da cadeia produtiva do caju: Estudo das relações de mercado. **Banco do Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura: Banco do Nordeste do Brasil, 152 p. 2009.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção de Castanha-de-caju (cultivo)**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/castanha-de-caju-cultivo/br>>. Acesso em: 08 dez. 2022.
- JABBARI, A.; KIANMEHR, M.; TAVAKOLI, H. Air preheater design optimization. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 5, p. 739-749, 2005.
- KONDEPUDI, D.; PRIGOGINE, I. **Modern thermodynamics: from heat engines to dissipative structures**. John Wiley & Sons, 2014.

LEITE, R. C. de C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos estudos CEBRAP**, p. 15-21, 2007.

LORA, E. S. Controle da poluição do ar na indústria açucareira. **Itajubá: STAB**, 2000.

LORENSETTI, R. **Descarga de fundo de caldeira: conheça sua importância**. Blog Coontrol, 2020. Disponível em: <<https://blog.coontrol.com.br/descarga-de-fundo-de-caldeira-conheca-sua-importancia/>>. Acesso em: 28/12/2022 às 10:48 AM.

MAIA, D. S. **Aproveitamento do carvão ativado obtido da casca de castanha de caju no processo de tratamento de águas cinzas**. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2021.

MORAN, M. J. et al. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. **LTC — Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda**. 7 ed. 2013.

OSMARI, M. P. et al. Líquido da casca da castanha de caju: características e aplicabilidades na produção animal. **PUBVET**, v. 9, p. 101-157, 2015.

POLI, D. de C. R. et al. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de ciências exatas e tecnologia**, v. 8, n. 8, p. 9-31, 2013.

SEGUNDO, V. B. S. **Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas indústrias sucroalcooleiras**. 2015. Monografia (Graduação) — Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2015.

SFW SISTEMAS TÉRMICOS. **Pré Aquecedor de Ar**, 2022. Disponível em: <<https://sfwsistemas.net/portfolio/pre-aquecedor-de-ar/>>. Acesso em: 28 dez. 2022.

SILVA, L. et al. Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar. In: XXII Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), 2018, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2018.

SILVA, C. C. et al. Reações de combustão: teoria versus experimental relato de experiência com alunos do ensino médio de uma escola pública do município de Coari. **Revista Ensino, Saúde e Biotecnologia da Amazônia**, v. 1, n. especial, p. 1-1, 2019.

SOUZA, A. et al. Comparativo da análise elementar de casca de coco babaçu e casca de castanha de caju. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia CONTECC, 2019, Palmas. **Anais [...]** Tocantins: Palmas, 2019.

STROBEL, R.; WALDNER, M. H.; GABLINGER, H. Highly efficient combustion with low excess air in a modern energy-from-waste (EfW) plant. **Waste Management**, v. 73, p. 301-306, 2018.

SÜLEYMAN DEMIREL, B.; KUCUK, H.; KUCUK, M. Optimization of an industrial air preheater using response surface methodology. **Energy Conversion and Management**, v. 76,

p. 431-438, 2013.

THRING, R. H. **Industrial boilers and heat recovery steam generators: design, applications, and calculations.** CRC Press, 1992.

TREVELIM, W. J. Caldeiras flamotubulares-reconstituição de prontuários. **Revista Eletrônica da Faculdade de Alta Floresta**, v. 2, n. 2, 2013.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHANG, Y.M. **Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction heating reactor.** Journal Anal. Appl. Pyrolysis, v. 76, p. 230 - 237, 2006.

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BOODEY, R. M. Produção de biocombustíveis A questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, v. 14, n. 1, p. 42-46, 2005.

VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. **Fundamentals of thermodynamics.** John Wiley & Sons. 2016.

VERGNHANINI FILHO, R. Metodologia simplificada de cálculo do rendimento térmico de caldeiras. **Revista IPT: Tecnologia e Inovação**, v. 2, n. 7, 2018.