

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

LUCAS VERHAGEN

**ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PLANTA
TERMOELÉTRICA ABASTECIDA COM CASCA DE ARROZ**

**GUARAPUAVA
2021**

LUCAS VERHAGEN

**ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PLANTA
TERMOELÉTRICA ABASTECIDA COM CASCA DE ARROZ**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Mecânica, como
requisito parcial à obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Mecânica, da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Renan Manozzo Galante

GUARAPUAVA
2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

TERMO DE APROVAÇÃO
ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA PLANTA TERMOELÉTRICA ABASTECIDA
COM CASCA DE ARROZ

LUCAS VERHAGEN

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 08 de dezembro de 2021, de forma remota, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

RENAN MANOZZO GALANTE
Prof. Orientador

RAQUEL DA CUNHA RIBEIRO DA SILVA
Membro da Banca

SÉRGIO DALMÁS
Membro da Banca

SÉRGIO DALMÁS
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

LUCAS VERHAGEN
Nome do aluno

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à minha família,
por todo incentivo e apoio necessário
para que este trabalho fosse concluído.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a cada um que por um meio ou outro me auxiliou nesta trajetória para conseguir alcançar meu objetivo, não citarei nomes, para não esquecer de nenhum, porém a cada um que de alguma forma contribuiu fica aqui minha gratidão e que Deus abençoe ricamente a cada um.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renan Manozzo Galante, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, juntamente com todos os conselhos e ensinamentos que levarei por toda minha vida profissional.

Aos meus colegas de sala, que no decorrer desta trajetória se tornaram bons amigos.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento por todo incentivo por parte da minha namorada, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

VERHAGEN, Lucas. **Análise Exergética de uma Planta Termoelétrica Abastecida com Casca de Arroz**. 2021. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a análise termodinâmica e econômica da implantação de uma Usina Térmica de Eletricidade (UTE), utilizando como combustível um resíduo agroindustrial que é a casca de arroz. A análise é uma termoelétrica no estado do Rio Grande do Sul, que é o maior produtor de arroz do Brasil, com $7.866,9 \times 10^3$ toneladas de arroz bruto produzido na safra de 2019/20. A planta do presente estudo opera com uma potência de geração elétrica de 5 MW, supondo que a biomassa para abastecer esta planta é proveniente da Arrozeira Pelotas (2021). A metodologia a ser utilizada nesta análise é através de uma análise exergética, baseada em Galante (2019), que por sua vez usa como base a metodologia descrita em Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995). Também tem por objetivo atestar a viabilidade da queima de casca de arroz em um ciclo de potência a vapor, ciclo Rankine, com uma análise pela primeira lei e segunda lei da termodinâmica. O payback feito para esta planta com vida útil de 20 anos resultou em um prazo para retorno de investimento de 8,53 anos. Todos os cálculos foram realizados a partir da linguagem de programação Python.

Palavras-chave: Casca de Arroz. Exergia. Ciclo Rankine. Payback.

VERHAGEN, Lucas. **Exergy Analysis of a Thermoelectric Plant Fueled with Rice Husk.** 2021. 54 f. Completion of coursework to obtain a bachelor's degree in Mechanical Engineering – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021.

ABSTRACT

The present work has as objective a thermodynamic and economic analysis of the implantation energy in a Thermal Power Plant (TTP), using as fuel an agroindustrial residue that is the rice husk. The analysis is a thermoelectric in the State of Rio Grande do Sul, which is the largest rice producer in Brazil, with $7,866.9 \times 10^3$ tonnes of rice produced in the 2019/20 harvest. The plant in the present study has an electrical generation power of 5 MW, assuming that the biomass to supply this plant comes from Arrozeira Pelotas (2021). The methodology to be used in this analysis is through an exergetic analysis, based on Galante (2019), which in turn uses the methodology described in Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995), as a basis. It also aims to attest to the feasibility of burning rice husks in a steam power cycle, Rankine cycle, with an analysis by the first law and second law of thermodynamics. The payback made for this 20-year-life plant resulted in a payback period of 8,53 years. All calculations were performed using the Python programming language.

Keywords: Rice Husk. Exergy. Rankine Cycle. Payback.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Matriz elétrica do Brasil em 2019.	13
Figura 2.2 - Matriz elétrica do Brasil, por fonte de geração de energia.	15
Figura 2.3 - Plantação de arroz e casca de arroz.	16
Figura 2.4 - Safra de arroz na região sul do Brasil, plantio e colheita	21
Figura 2.5 - Arrozeira Pelotas, na cidade de Pelotas-RS.....	21
Figura 2.6 - Ciclo Rankine a) Representação do ciclo, b) Diagrama Temperatura (T) – entropia (s).....	23
Figura 2.7 - Transferência de calor, entropia e exergia com uma diferença finita de temperatura	27
Figura 4.1 - Volume de controle da caldeira	35
Figura 4.2 - Volume de controle do condensador	35
Figura 4.3 - Equações para cálculo de taxas de exergia e determinação de custos	37
Figura 5.1 - Fluxo de Exergia na Caldeira	44
Figura 5.2 - Fluxo de exergia na turbina	44
Figura 5.3 - Fluxo de exergia no condensador	45
Figura 5.4 - Fluxo de exergia na bomba.....	46
Figura 5.5 - Comparativo entre taxas de entrada de exergia, exergia destruída e saídas de exergia	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Empreendimentos que utilizam casca de arroz como combustível final	17
Tabela 2.2 – Arroz produção mundial (base beneficiado), julho/2021	18
Tabela 2.3 – Arroz produção no Brasil (base bruto)	19
Tabela 2.4 - Produção e uso da casca de arroz no Rio Grande do Sul (1986).....	20
Tabela 3.1 - Dados de entrada de operação da planta.....	31
Tabela 4.1 - Composição do combustível, base seca.....	33
Tabela 4.2 - Taxas de exergia de produto e combustível	38
Tabela 4.3 - Valores comuns do fator de escala α	39
Tabela 5.1 - Resultados casca de arroz	41
Tabela 5.2 - Custos estimados dos equipamentos para uma planta de 5 MW, considerando os dados de Santos (2014).....	42
Tabela 5.3 - Dados de operação da planta, após cálculos.....	43
Tabela 5.4 - Eficiência Exergética e taxa de destruição de exergia dos equipamentos	47
Tabela 5.5 - Eficiência térmica e eficiência exergética do sistema	48
Tabela 5.6 - Valores de exergia de combustível e produto, eficiência exergética, exergia destruída e razão de destruição de exergia para cada equipamento	49
Tabela 5.7 - Balanço de caixa, baseado no valor de mercado do MWh.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas com Capacidade Reduzida
CGU	Central Geradora Undi-elétrica
EOL	Central Geradora Eólica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SIGA	Sistema de Informações de Geração da ANEEL
UFV	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usinas Térmicas de Eletricidade
UTN	Usina Termonuclear

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA.....	11
1.2	OBJETIVOS	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	12
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE A MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL.....	13
2.2	GERAÇÃO TERMOELÉTRICA.....	13
2.3	CASCA DE ARROZ NA GERAÇÃO TERMOELÉTRICA	15
2.4	CICLO RANKINE	22
2.5	MODELOS TERMODINÂMICOS	24
3.	ASPECTOS METODOLÓGICOS	29
3.1	LEVANTAMENTO DE DADOS	30
3.2	HIPÓTESES ADOTADAS	31
4.	CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	33
4.1	MODELAGEM EXERGÉTICA	37
4.1.1	Taxas de Investimento de Capital e Operação e Manutenção.....	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	CÁLCULOS DO CICLO RANKINE.....	42
5.2	ANÁLISE EXERGÉTICA	43
5.3	ANÁLISE ECONÔMICA	49
6.	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

O arroz é uma *commodity* importante no Brasil, a maior produção de arroz no Brasil se concentra na região sul do país e dentro desta região se destaca o estado do Rio Grande do Sul (RS), com uma produção expressiva de 70,34% de arroz produzido no Brasil, na última safra de 2019/2020, sendo que nesse período foi produzido 11,2 milhões de toneladas (Conab - Série Histórica das Safras, 2021), que é a companhia nacional de abastecimento e é vinculada ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

O grão é um dos principais alimentos que compõe a base da alimentação no Brasil, em que serve de base para a maioria da população. Em média o consumo de arroz é de 32 kg por ano por habitante, fazendo a produção deste grão de grande importância na cadeia produtiva nacional, impactando tanto no meio ambiente, quanto na economia também. O arroz faz parte do mercado global de grãos secos, e vem crescendo a uma taxa alta, devido a grande conscientização dos benefícios do grão para a saúde (Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste-ETENE, 2021).

Parte significativa desta produção de arroz, inicialmente bruto passa pelo processo de beneficiamento, este processo que inclui a secagem, descascamento e embalagem do grão para ser comercializado, onde é realizado no estado e geralmente perto da região produtora de arroz, com a finalidade de minimizar custos com transporte do grão. Deste processo resta um subproduto do arroz, que é a casca que representa 20% do peso do arroz segundo De Campos (2016). Neste caso necessita a destinação correta da casca de arroz, que nem sempre tem um fim adequado na indústria, sendo um problema ambiental que precisa de atenção para sua correta destinação.

Por ser uma porcentagem de cascas significativas em peso e apresentar uma densidade relativamente baixa, torna-se um resíduo que tem um volume grande e não é viável utilizar a casca como adubo no campo, pois para transportar uma grande quantidade do resíduo ocuparia muito espaço. Além disso a casca de arroz emite o gás metano (CH₄) em grandes quantidades, devido a sua demora na decomposição. E este destino na utilização como adubo não é viável, pois a casca de arroz não possui muitos nutrientes (WALTER; ROSSATO, 2010).

Mesmo que o resíduo agroindustrial da casca de arroz seja utilizado de maneira a ser aproveitado em outras aplicações como a queima para secagem do grão na safra, ou destinado a geração de vapor, ou também na indústria do cimento, cabe ainda sua utilização em outras

aplicações como para a geração de potência elétrica com este excedente de casca que totaliza em média 60% da casca de arroz gerada segundo um estudo conduzido pela Cientec (1986).

Pensando além da destinação correta da casca de arroz, como por exemplo em fontes alternativas para geração de energia elétrica, visando a preservação do meio ambiente e uma diminuição na poluição, além de diminuir os impactos devido ao aquecimento global observa-se que é possível ter várias alternativas para a geração desta energia que é usada nos setores industrial, residencial e comercial. Uma dessas soluções é a energia proveniente da queima de um combustível que gera vapor para a geração de energia elétrica. Com isso este estudo atende a duas necessidades que é a de produção de energia elétrica limpa e a correta destinação de um resíduo agroindustrial que é a casca de arroz. Alguns outros trabalhos já citam diversas aplicações para a casca de arroz, como De Campos (2016) e Fontoura (2015), no entanto para uma melhor compreensão do assunto é válido trazer uma análise que compare os custos para ver se realmente é viável determinada destinação para a casca de arroz.

Dentre as diversas aplicabilidades de destinação da casca de arroz este trabalho é focado em atestar a viabilidade da queima da casca de arroz para geração de energia elétrica através de um ciclo de potência a vapor, chamado de ciclo Rankine, que é uma Usina Térmica de Eletricidade (UTE), que conta com a elaboração de um modelo de combustão da casca de arroz neste ciclo termodinâmico, além do restante da parte de uma análise termodinâmica de primeira e segunda Lei.

Além dessa análise pela primeira lei da termodinâmica, para verificar o potencial de quanta energia é gerada, também se faz útil uma outra análise que é análise exergética. Esta traz pontos relevantes para verificar cautelosamente se a aplicação da casca de arroz como combustível de uma termoelétrica é realmente viável e vantajosa. Segundo Galante (2019), a análise exergética é base para um outro tipo de abordagem de estudo, chamado análise exergoeconômica, que é uma abordagem que se utiliza da exergia, e analisa os custos e então traz uma melhoria de eficiência financeira dos sistemas.

E para que esta análise conte com uma alta eficiência se faz uso da linguagem de programação Python, para que os cálculos sejam realizados, com a elaboração de algoritmos simples e intuitivos. Entende-se por algoritmo uma sequência finita e ordenada de comandos, que levam à aplicação de um método para a execução de tarefas e problemas. Neste âmbito a escolha da linguagem Python se dá por ter várias aplicações na ciência e por também ter a disponibilidade de pacotes de bibliotecas que possibilitam encontrar estados termodinâmicos, assim facilitando os cálculos sem existir a necessidade de interpolar valores em tabelas de

livros, mostrando grande praticidade e poder ao realizar tais cálculos de maneira simples. A linguagem se destaca por ser orientada a objeto, porém com uma sintaxe simples e trivial, com uma vantagem de não haver a necessidade de declarar variáveis, pois o próprio interpretador infere o tipo da variável, além de diversas outras vantagens (BORGES, 2014). O principal uso de Python ocorre pela aplicação da biblioteca *CoolProp*, utilizada para determinação das propriedades termofísicas (CoolProp, 2021).

1.1 JUSTIFICATIVA

As indústrias responsáveis pelo beneficiamento do arroz estão em constante busca para a destinação correta da casca de arroz, sendo necessárias novas soluções que não tragam malefícios ao meio ambiente, e sejam soluções viáveis em todos os sentidos, a fim de que todos os envolvidos, tanto indústria quanto o meio possam sair ganhando e a destinação adequada seja também uma destinação rentável que não traga prejuízos para o setor de beneficiamento de arroz.

Outro ponto a ser levado em consideração é a alta demanda de energia elétrica no contexto nacional com a busca de empreendimentos que não sejam poluentes e não tenham combustíveis com preços elevados, que elevam o preço do produto final que é a energia elétrica que chega nas indústrias, comércios e residências.

A fim de facilitar a análise e evitar trabalhos manuais na parte de cálculos, tudo isso será feito por meio da linguagem de programação Python, por ser uma linguagem poderosa, simples e intuitiva, com a finalidade de ter uma melhor análise, além de potencializar os resultados da análise.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é verificar a viabilidade da implantação de uma termoelétrica em a uma indústria de beneficiamento de arroz, através uma análise exergética

pela segunda lei da termodinâmica e uma análise econômica. Neste caso a escolhida foi a arrozeira Pelotas, que fica localizada em Pelotas no estado do Rio Grande do Sul.

1.2.2 **Objetivos Específicos**

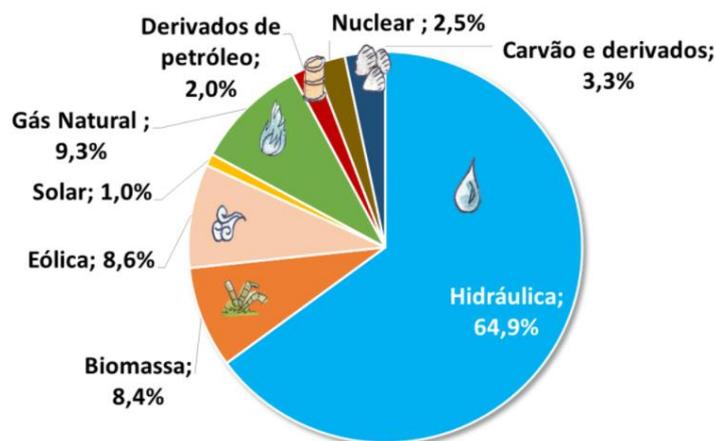
- Verificar a disponibilidade de resíduos provenientes do beneficiamento do arroz, bem como sua aplicabilidade como combustível;
- Desenvolver um modelo de planta termoelétrica baseado nos princípios das Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, apoiado no conceito da exergia;
- Elaborar uma análise exérgica para verificar a viabilidade técnica da planta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE A MATRIZ ELÉTRICA NACIONAL

A matriz elétrica nacional é sustentável possuindo mais de metade da oferta de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Segundo a Epe (2020) que é a empresa de pesquisa energética vinculada ao ministério de minas e energia o processo hidráulico das usinas hidrelétricas é a fonte que mais impacta na geração elétrica, representando 64,9% da matriz elétrica brasileira de 2019 conforme a Figura 2.1. O Brasil ainda está a frente dos outros países quando se trata de energias renováveis, mostrando que a matriz energética brasileira é proveniente de fontes naturais. A biomassa representa 8,4% da matriz elétrica, esta possui significativa importância devido aos resíduos da agroindústria.

Figura 2.1 - Matriz elétrica do Brasil em 2019.



Matriz Elétrica Brasileira 2019 (BEN, 2020)

Fonte: EPE (2020).

2.2 GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

No Brasil a primeira usina elétrica a ser instalada foi uma usina termoelétrica em 1883, na cidade de Campos (RJ), com uma potência de 52 kW. No contexto atual da época era muito difícil construir uma usina elétrica, pois no país ainda não tinha nenhuma fábrica de máquina térmica. Ainda havia o problema de disponibilidade de combustível para essas plantas térmicas,

pois os principais combustíveis utilizados ainda eram raros de se encontrar, já que o Brasil não possuía grandes reservas exploradoras de carvão ou petróleo (BARBOSA, 2010).

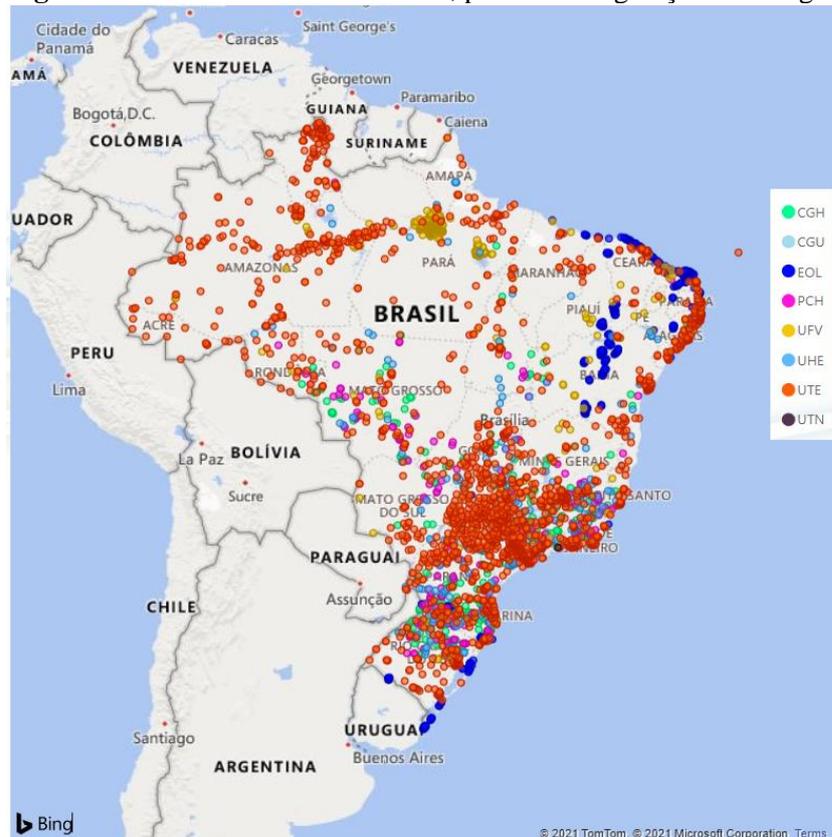
As usinas termoeletricas, como o próprio nome já diz transformam o potencial de energia de uma fonte térmica (calor) em energia elétrica, são chamadas de Usinas Térmicas de Eletricidade (UTE). Estas usinas precisam utilizar uma fonte de combustíveis e existem diversas opções e fontes que são utilizadas, tais como gás natural, carvão mineral, bagaço de cana, casca de arroz, resíduos agroindustriais em geral, dentre outros (CASTRO et al., 2008).

Independente do combustível utilizado o funcionamento das termoeletricas é semelhante, ou seja, mesmo que mude a fonte de energia térmica que é o combustível da instalação, pode-se afirmar que o princípio de funcionamento é semelhante, que não possui grandes alterações (CASTRO et al., 2008).

Segundo o sistema de informações de geração da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) – SIGA, dos empreendimentos que geram energia elétrica e estão em operação, no total são 9487, este é um número de empreendimentos bem expressivo, a potência total fiscalizada destes empreendimentos em operação é de 176.668,76 MW. Destes 24,40 % geram energia por meio de usinas termoeletricas (UTE) que totalizam um total de 3094 empreendimentos que geram energia elétrica por esse tipo. A potência total que esses empreendimentos produzem gira em torno de 43103,4 MW (Mega Watt). Destes empreendimentos os que utilizam biomassa como combustível são 588, computando um total de 35,33 % das usinas termoeletricas do país. Ainda se tem que 13 usinas termoeletricas utilizam casca de arroz como combustível para geração de energia elétrica, e a soma da potência outorgada através da casca de arroz é de 53,33 MW. O percentual de energia gerado pelas usinas termoeletricas que geram energia através da casca de arroz em relação a potência total fiscalizada é de 0,0302%.

Na figura abaixo para uma melhor compreensão tem-se a distribuição geográfica dos empreendimentos em operação no Brasil, com a aplicação de um filtro nas fontes de geração de energia, entre elas: Centrais Geradoras Hidrelétricas com Capacidade Reduzida (CGH), Central Geradora Eólica (EOL), Usina Termoeletrica (UTE), Central Geradora Solar Fotovoltaica (UFV), etc. Os demais nomes contidos na legenda do gráfico, podem ser encontrados na lista de abreviatura e siglas.

Figura 2.2 - Matriz elétrica do Brasil, por fonte de geração de energia.



Fonte: Sistema de informações de geração da ANEEL – SIGA. Acessado: 28/07/2021.

2.3 CASCA DE ARROZ NA GERAÇÃO TERMOELÉTRICA

Para que a energia elétrica chegue nas residências domésticas e alimente as indústrias do Brasil, é necessário que haja a conversão de alguma forma de energia que pode ser ela, proveniente de fontes não renováveis ou de fontes renováveis. Dentre as fontes não renováveis segundo o EPE, se tem as fontes fósseis geralmente derivados do petróleo e a energia nuclear, que pertencem a um grupo de fontes de energia que são finitas ou esgotáveis. Já as fontes renováveis se têm a energia hidráulica que (energia proveniente das populares usinas hidrelétricas), energia solar, energia eólica, biomassa, energia geotérmica e energia oceânica. Este segundo grupo pertence a classe das fontes de energia que são consideradas inesgotáveis, pois sua quantidade a cada vez que é usada se renova, algumas dessas fontes renováveis por sua vez podem ser sazonais, ou seja, gera energia elétrica apenas em um determinado período de tempo do ano, ou apenas em uma parte do dia, como é o caso da energia solar, que somente é aproveitada durante o dia, não sendo possível uma geração de energia solar durante 24 horas do dia (FONTES DE ENERGIA, 2021).

Segundo o Epe toda matéria vegetal e orgânica existente, chamada de biomassa, pode ser utilizada na produção de energia. Existem diversas formas para extrair essa energia que está concentrada em um estado e transformar em energia elétrica, como por exemplo fazer a queima direta como no fogão a lenha, para aproveitamento do calor. Outro meio para aproveitar a energia é aquecer a água, para produzir vapor a alta pressão, que é utilizado para acionar turbinas que são responsáveis por transformar essa energia em energia mecânica (FONTES DE ENERGIA, 2021).

Dentre a classe de fontes de energia renováveis, Barbosa (2010), indica que entre os combustíveis mais utilizados para a geração de energia por meio da utilização de biomassa, tem os que se destacam como a lenha que é proveniente de madeira cortada, bagaço de cana-de-açúcar, pó de serra; papel já utilizado, embalagens de papelão descartadas, casca de arroz e capim-elefante.

Segundo o SIGA (2021), da ANEEL, é o Sistema de Informações de Geração da ANEEL foi desenvolvido para disponibilizar à sociedade informações da capacidade de geração de energia elétrica do Brasil e constam informações de todas as usinas que possuem concessão e autorização nas fases de construção não iniciada, construção e operação. É dividido em diversos módulos separados em capacidade de geração do Brasil, resumo estadual, usinas e agentes de geração e empreendimentos por Sub-bacia.

Figura 2.3 - Plantação de arroz e casca de arroz.

a) Plantação de arroz



b) Casca de arroz



Fonte: (Casca de arroz - Portal Embrapa, [s.d.]; Revista Globo Rural, 2014). Acessado: 18/08/2021.

Neste trabalho, serão consultados os dados de quantidade de empreendimentos que utilizam a casca de arroz como combustível por meio da aplicação de um filtro pela capacidade de geração do Brasil na base de dados SIGA e um filtro da matriz por tipo e combustível final, por meio dessa consulta obtém-se dados dos empreendimentos baseado no tipo de combustível como por exemplo a biomassa e dentro deste grupo das biomassas encontra-se dados de um dos

tipos de combustível final que é a casca de arroz. Esta possui atualmente treze empreendimentos espalhados no Brasil, com uma potência total outorgada de 53.333 kW, cuja lista de empreendimentos que utilizam casca de arroz que é um combustível agroindustrial e sua localização é descrita na tabela abaixo.

Tabela 2.1– Empreendimentos que utilizam casca de arroz como combustível final

Estado (UF)	Quantidade de empreendimentos	Potência Outorgada (kW)
Rio Grande do Sul	9	46.645
Rondônia	1	2.288
São Paulo	1	2.000
Mato Grosso	1	1.200
Santa Catarina	1	1.200
Total	13	53.333

Fonte: (SIGA, 2021, da ANEEL - Sistema de Informações de Geração, [s.d.]). Acessado: 04/08/2021.

O levantamento de informações da quantidade de casca de arroz produzida em determinada região, visando delimitar uma determinada região de estudo que possua uma produção de arroz que justifique a implantação de um empreendimento termoelétrico. Esse estudo busca encontrar uma região que seja uma grande produtora de arroz, limitando a região de estudo sendo a região sul do Brasil. Para que seja um empreendimento viável a região precisa ter abundância desse recurso a ser consumido como combustível, que é a casca do arroz. Na Figura 2.3 a) está ilustrada uma plantação do grão de arroz ainda na lavoura e na parte b) da figura mostra o resíduo agroindustrial que é a casca de arroz.

Ao encontrar essa região que será a fonte do combustível para abastecer a planta do empreendimento termoelétrico, é importante que a termoelétrica consumidora seja localizada perto do gerador deste resíduo agroindustrial, pois o transporte a longas distâncias pode acarretar em custos ao empreendimento, diminuindo assim a viabilidade deste empreendimento.

Vale ressaltar que o Brasil está entre os grandes produtores de arroz do mundo, segundo o Departamento americano de agricultura, do inglês *United States Department of Agriculture* (USDA, 2021) o Brasil está entre os 6 países que mais produzem arroz no mundo, com uma produção total de 8 milhões de toneladas de arroz beneficiado no ano, que representa 1,58% da produção mundial de arroz no mundo. A produção de arroz no mundo na safra 2019/2020 foi de 506 milhões de toneladas de arroz já beneficiado. Demais dados da produção

de arroz de outros países é descrita na tabela abaixo, mostrando que a China é o maior produtor de arroz do mundo com 149 milhões de toneladas na safra, representando 29,45% da produção mundial.

Tabela 2.2– Arroz produção mundial (base beneficiado), julho/2021

	Países	Produção [Mt – mega toneladas] 10⁶toneladas	% produção
1	China	149,0	29,45%
2	Índia	121,0	23,91%
3	Indonésia	35,3	6,98%
4	Tailândia	19,5	3,85%
5	Paquistão	8,2	1,62%
6	Brasil	8,0	1,58%
7	Estados Unidos	6,3	1,25%
8	Argentina	0,8	0,16%
9	Rússia	0,7	0,14%
10	Austrália	0,6	0,12%
11	Turquia	0,6	0,12%
12	México	0,2	0,04%
13	Outros	155,8	30,79%
	Total Mundial	506,0	100,00%

Fonte: Foreign Agricultural Service/USDA. Acessado: 05/08/2021.

De acordo com Conab - Série Histórica das Safras(2021) dividindo a produção de arroz por regiões do Brasil se tem que a região que mais produz arroz no Brasil é a região sul que produz 82,54 % do arroz bruto no Brasil. Dentro desta região o estado que mais produz arroz é o estado do Rio Grande do Sul que será o estado a ser estudado, já que possui uma produção de arroz maior que totaliza 7.866,9 mil toneladas de arroz bruto, logo possui também maior disponibilidade da casca que será utilizada no empreendimento para geração de energia elétrica. Os valores descritos na Tabela 2.3 ilustram quanto cada região produz e também a quantidade produzida por cada um dos estados da região sul do país, que é a região que mais produz arroz do Brasil.

Tabela 2.3– Arroz produção no Brasil (base bruto)

Região/UF	Produção bruta 2019/20 [1000 t]
NORTE	991,9
NORDESTE	323,9
CENTRO-OESTE	594,1
SUDESTE	42,2
SUL	9.231,3
PR	152,6
SC	1.211,8
RS	7.866,9
NORTE/NORDESTE	1.315,8
CENTRO-SUL	9.867,6
Total Brasil	11.183,4

Fonte: Conab - Série Histórica das Safras(2021). Acessado: 06/08/2021

A casca do arroz é obtida através do beneficiamento do grão de arroz, pelo processo de descascamento após a pré-limpeza, as demais etapas do beneficiamento do grão são a secagem e a limpeza. Durante esse processo além da separação da casca, parte do farelo que fica entre a casca e o grão, também é retirado.

Segundo Armesto et al. (2002), Chand; Fahim (2020) e Siddique; Cachim (2018) a casca de arroz representa em média 20% do peso grão de arroz. E as principais características deste resíduo de acordo com Armesto et al. (2002), são um conteúdo de 74% de matéria volátil e 12,8% de cinzas. Com isso fica claro que a casca arroz tem potencial para ser um bom combustível.

Para Mayer (2009) com a utilização de resíduos não tem o efeito negativo de utilização quando comparado com outros tipos de biomassa, como é o caso quando é utilizado biomassas que são produtos alimentícios, pois por exemplo quando é utilizado o milho na produção do etanol a utilização deste produto encarece os alimentos que utilizam milho, porque gera então essa concorrência entre os produtos. Por outro lado, quando se utiliza um resíduo elimina estes efeitos negativos, pois o resíduo não compete com a produção de alimentos.

Da casca de arroz que é produzida tem-se uma porcentagem desta que já é aproveitada para outras finalidades, como secagem do grão, geração de vapor, indústria do cimento e geração de força motriz. Segundo um estudo feito pela Cientec (1986), no período mencionado aproximadamente 60% da casca não tem aplicação nenhuma e é excedente, as demais aplicações da casca de arroz encontram na Tabela 2.4. O estudo em questão é do ano de 1986

e é um dos poucos estudos a respeito do assunto, quando se trata em quantificar para quais usos segue a casca de arroz.

De acordo com Mayer (2009) o estudo realizado pela Cientec (1986) apesar de haver uma defasagem de tempo ainda representa proximidade com a situação atual, devido a todas as unidades de beneficiamento possuírem um sistema de secagem do grão, com uso da própria casca de arroz ou lenha. Também quando há o processo de parbolização do arroz a casca é destinada a geração de vapor.

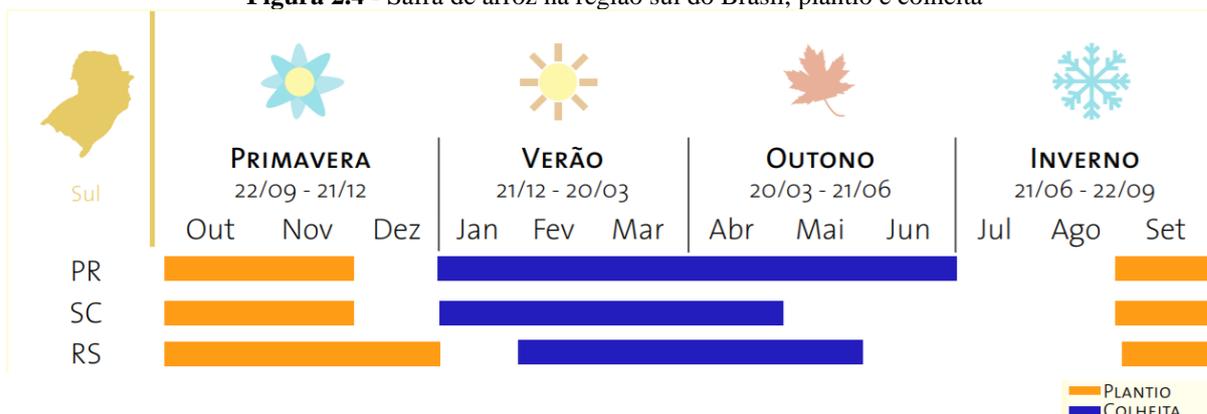
Tabela 2.4 - Produção e uso da casca de arroz no Rio Grande do Sul (1986)

Item	Quantidade [t]	Valor percentual [%]
Casca produzida no RS	571.000	100
Destinada à secagem do grão (na safra)	87.000	15,20
Destinada à geração de vapor	80.000	14
Utilizada por indústria de cimento	40.000	7
Destinada a gerar força motriz	24.000	4,20
Excedente de casca	340.000	59,60

Fonte: (CIENTEC, 1986)

A umidade do grão de arroz quando este vem da lavoura é de 18-23% (AGEITEC-EMBRAPA, [s.d.]), mas para ser armazenada em uma unidade de beneficiamento necessita ter uma umidade em torno de 11-13%, por questões de se prolongar o tempo em que o grão pode ser armazenado, no entanto elevar os padrões de umidade acelera o processo respiratório do grão ocorrendo a deterioração do mesmo (BRAGANTINI, 2005). Mayer (2009) considera a umidade da casca 12% que por sua vez será a umidade da casca adotada neste trabalho.

Na região sul do Brasil a safra do arroz acontece em períodos semelhantes, sendo o início do plantio em média no início de setembro, podendo se estender até dezembro, com um período de colheita variando de janeiro até maio do ano subsequente, sendo que em média o tempo que leva do plantio do arroz até a sua colheita no estado do Rio Grande do Sul varia dependendo do tipo de ciclo, que pode ser entre superprecoce com um ciclo menor que 100 dias, até semi-tardio que tem um ciclo maior que 130 dias (AGEITEC-EMBRAPA, [s.d.]), com um calendário dos períodos de plantio e de colheita descritos na Figura 2.4 (Conab - Outras Publicações - Calendário Agrícola (plantio e colheita), [s.d.]).

Figura 2.4 - Safra de arroz na região sul do Brasil, plantio e colheita

Fonte: (Conab - Outras Publicações - Calendário Agrícola (plantio e colheita), [s.d.]) Acessado: 18/10/2021.

A indústria de beneficiamento de arroz escolhida foi a Arrozeira Pelotas localizada no estado do Rio Grande do Sul, na cidade de Pelotas, que é a cidade onde a maior quantidade de arroz é beneficiado no estado do Rio Grande do Sul, totalizando 841.085 toneladas por ano, com 17 unidades de beneficiamento. A Arrozeira Pelotas possui 3 unidades de beneficiamento na cidade de Pelotas, uma próxima a outra, sendo assim possível considerar a quantidade de produção somada dessas 3 unidades para encontrar a quantidade de combustível do resíduo agroindustrial da casca de arroz (Arrozeira Pelotas | A Arrozeira, 2021).

Desde de 1995 a Arrozeira Pelotas trabalha nos processos de produção, armazenamento, secagem, beneficiamento e exportação de arroz branco, parbolizado e integral. Segundo o site da empresa, ela está entre as primeiras exportadoras de arroz do Brasil e também entre os membros do grupo Brazilian Rice e também conta com uma ampla estrutura para realizar o beneficiamento e armazenagem dos grãos conforme mostra a Figura 2.5 (Arrozeira Pelotas | A Arrozeira, 2021).

Figura 2.5 - Arrozeira Pelotas, na cidade de Pelotas-RS

Fonte: (Arrozeira Pelotas, 2021). Acessado: 03/11/2021.

A empresa possui uma capacidade de armazenamento estática de 125 mil toneladas, além de possuir a capacidade de beneficiar mensalmente 12 mil toneladas de arroz branco e também 6 mil toneladas de arroz parbolizado, totalizando uma capacidade de expedição diária de 20 mil fardos de 30 kg (Arrozeira Pelotas | A Arrozeira, 2021).

Para descobrir quanta energia o combustível libera utiliza-se o poder calorífico do combustível, que pode ser o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCS é a quantidade de calor gerado pela combustão de uma unidade de volume do combustível, já o PCI é o calor gerado, mas com a água formada na reação já em estado gasoso, a diferença entre PCS e o PCI é calor latente de vaporização da água e depende da composição química (MORAN; SHAPIRO, 2013). Para combustíveis sólidos é utilizada a equação descrita em BAZZO, (1995) que garante boa aproximação e está descrita nas Equações 2.1 e 2.2, em que C, H, O, S e W representam as frações em massa de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre e umidade, respectivamente.

$$PCS = 33900C + 141800 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 9200S \quad 2.1$$

$$PCI = PCS - 2440(9H + W) \quad 2.2$$

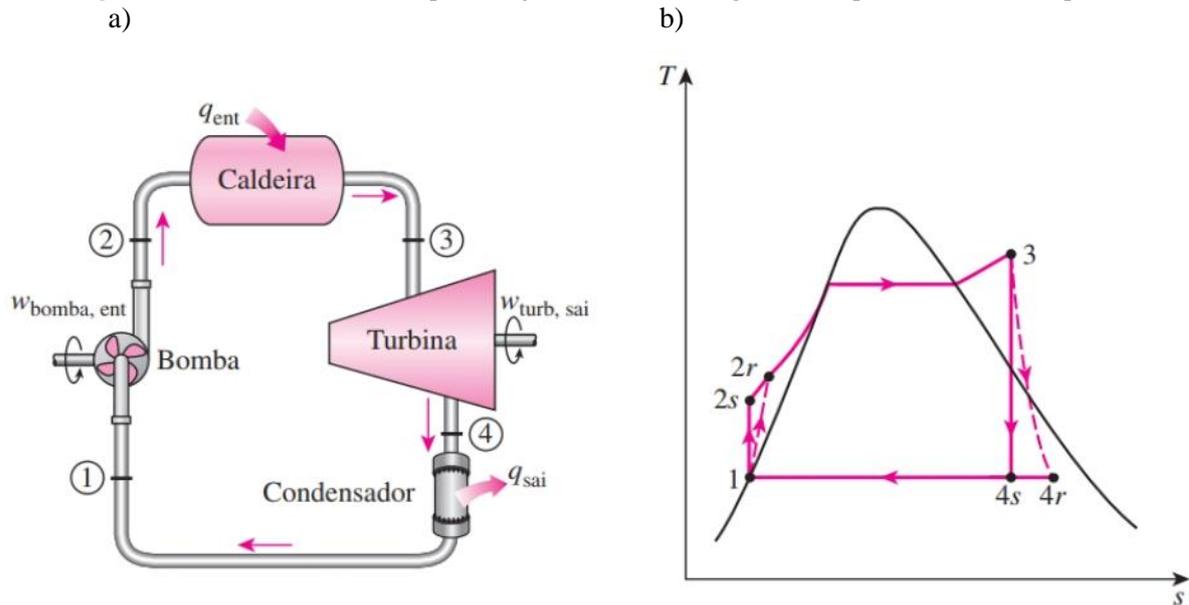
2.4 CICLO RANKINE

Pensando justamente em fontes alternativas de energia elétrica, visando a preservação do meio ambiente e uma diminuição na poluição, além de diminuir os impactos devido ao aquecimento global observa-se que é possível ter várias alternativas para a geração desta energia que é usada em todos os setores, que são industrial, residencial e comercial. Uma dessas soluções é a energia proveniente da queima de um combustível que gera vapor para a geração de energia elétrica.

O ciclo Rankine é o ciclo utilizado nas usinas de potência a vapor, para geração de energia elétrica. Este ciclo se baseia na queima de combustível que fornece calor para então possibilitar a movimentação de uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. Este é o princípio fundamental de funcionamento de um ciclo Rankine que pode ser visualizado na figura abaixo de acordo com Çengel (2013), conforme a descrição dos 4 processos seguintes:

- 1-2s Compressão isentrópica em uma bomba
- 2s-3 Fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira
- 3-4s Expansão isentrópica em uma turbina
- 4s-1 Rejeição de calor a pressão constante em um condensador.

Figura 2.6 - Ciclo Rankine a) Representação do ciclo, b) Diagrama Temperatura (T) – entropia (s)



Fonte: (ÇENGEL, 2013).

O fluido a ser utilizado neste ciclo é a água que inicialmente entra no início do processo como líquido saturado e então é comprimida até o estado 2r na pressão de operação da caldeira, de forma não isentrópica considerando que a bomba não possui uma eficiência isentrópica de 100%, mas que existem algumas perdas de energia associadas a este processo. No estado 2r a água está no estado de líquido comprimido, para então ser aquecida a pressão constante na caldeira até chegar ao estado 3 como vapor superaquecido. Posteriormente no estado 4r a pressão e temperatura do fluido baixam devido a passagem deste pela turbina, nesta etapa 4r já são consideradas as perdas ao longo deste processo de expansão devido a turbina não possuir uma eficiência isentrópica de 100%. A mistura de líquido e vapor saturado é então condensado do estado 4r até o estado 1, com pressão e temperatura constante, deixando o condensador no estado de líquido saturado e entrando novamente na bomba completando assim o ciclo (ÇENGEL, 2013).

Também é calculado o trabalho produzido pela turbina (w_{sai}), ou também chamado trabalho que sai do sistema, para o caso isentrópico, é dado pela variação de entalpia da entrada

da turbina (ponto 3) menos o a entalpia de saída da turbina (ponto 4), dado pela Equação abaixo (ÇENGEL, 2013).

$$w_{sai} = h_3 - h_4 \quad 2.3$$

Para determinar o trabalho que entra no sistema através da bomba (w_{ent}), que é o trabalho fornecido a bomba, também se dá através da variação de entalpia e também considerando um processo isentrópico, obtém-se a Equação abaixo (ÇENGEL, 2013):

$$w_{ent} = h_2 - h_1 \quad 2.4$$

Para a realização dos cálculos da eficiência isentrópica da bomba e da turbina se faz uso das Equações 2.5 e 2.6, em que η_{bomba} é a eficiência isentrópica da bomba e $\eta_{turbina}$ é a eficiência isentrópica da turbina, respectivamente (ÇENGEL, 2013).

$$\eta_{bomba} = \frac{w_s}{w_r} = \frac{h_{2,s} - h_1}{h_{2,r} - h_1} \quad 2.5$$

$$\eta_{turbina} = \frac{w_r}{w_s} = \frac{h_3 - h_{4,r}}{h_3 - h_{4,s}} \quad 2.6$$

2.5 MODELOS TERMODINÂMICOS

A análise termodinâmica de um ciclo se baseia nos princípios da primeira e segunda lei da termodinâmica, que conta com a utilização de equações balanços de massa, energia e também de entropia para desenvolver o modelo do ciclo. Além disso, a análise exérgica também será realizada para que seja possível obter adiante a análise termodinâmica.

Segundo Çengel (2013) a primeira lei da termodinâmica, também é conhecida como princípio de conservação de energia, esta lei diz com base em observações experimentais que energia não pode ser criada nem destruída durante um processo, ela pode apenas mudar de forma. Assim sendo a variação líquida da energia total do sistema durante um processo é igual a diferença total de energia que entra (E_{ent}) e energia que sai (E_{sai}) do sistema durante o

processo, a esta relação é dada o nome de balanço de energia, que está expressa na Equação 2.7.

$$\Delta E_{sistema} = E_{ent} - E_{sai} \quad 2.7$$

Os cálculos realizados neste trabalho utilizando como base a primeira Lei tem como hipótese que o sistema está em regime permanente, logo pode-se afirmar que a o fluxo de massa que entra em um volume de controle a ser analisado é igual ao fluxo de massa que sai do mesmo. O balanço do fluxo de massa pode ser descrito como:

$$\sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sai} = 0 \quad 2.8$$

A energia pode ser transferida por diferentes mecanismos de transferência, através de transferência de calor (Q), realização de trabalho (W) e fluxo de massa (m) e pode ser transferida para ou de um sistema (ÇENGEL, 2013). Com isso a Equação 2.7 pode ser expandida, pois a transferência líquida é igual à diferença entre as quantidades transferidas na entrada e na saída e pode ser expressada em razão de taxa de transferência como:

$$\Delta E_{sistema} = (\dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sai}) + (\dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sai}) + \sum (\dot{m}_{ent} h_{ent} - \dot{m}_{sai} h_{sai}) = 0 \quad 2.9$$

A primeira lei mostra que a energia não pode ser criada nem destruída, mas somente essa lei não é suficiente para descrever outros processos, sendo necessário outra lei que é chamada de segunda lei da termodinâmica. Para Çengel (2013) um processo não pode ocorrer a menos que atenda a primeira e a segunda leis da termodinâmica. Enquanto a primeira lei está limitada a sobre a quantidade de energia e suas transformações de uma forma para outra, a segunda lei afirma que a energia tem qualidade, bem como quantidade.

O enunciado de Kelvin-Planck diz que é impossível para um dispositivo que opera em um ciclo receber calor de um único reservatório e produzir a mesma quantidade líquida de trabalho, ou seja, uma máquina térmica deve rejeitar ao menos uma quantidade de calor para um reservatório de baixa temperatura. Este enunciado também pode ser expresso como nenhuma máquina térmica pode ter uma eficiência de 100% (ÇENGEL, 2013).

Há outro enunciado além do de Kelvin-Planck, o enunciado de Clausius em que é impossível existir a transferência de calor de um meio frio para um meio mais quente, a não ser que tenha uma fonte de energia externa, como por exemplo o caso de um refrigerador doméstico convencional exige que o compressor seja acionado por um motor elétrico ou outra fonte de energia externa. Neste caso este dispositivo modifica o ambiente (ÇENGEL, 2013).

Segundo Oliveira Filho (2020), que utiliza como referência Çengel (2013), a entropia é a grandeza que quantifica as irreversibilidades de um sistema e com relação a esta propriedade tem-se que um processo avança na direção compatível com o aumento de entropia, a entropia é uma propriedade que não é conservada em um processo irreversível e também as quanto mais graves as irreversibilidades em um sistema, ocorre uma maior geração de entropia, pois as irreversibilidades geram entropia.

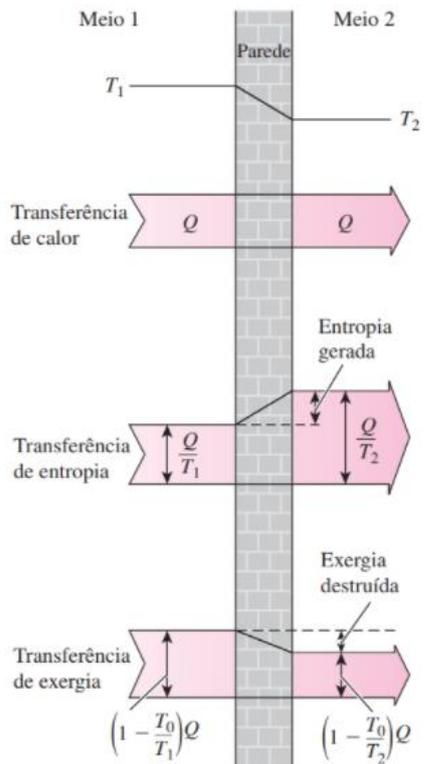
Para um volume de controle em regime permanente tem-se que a taxa de variação de entropia durante um processo é equivalente à soma da taxa de transferência de entropia através da fronteira do volume de contro devido a transferência de calor, da taxa líquida de transferência de entropia pelo fluxo de massa e a geração de entropia devido as irreversibilidades, conforme descrito pela Equação 2.10, com \dot{S} sendo a taxa de geração de entropia e s a entropia específica (ÇENGEL, 2013).

$$\dot{S}_{sistema} = \sum (\dot{m}_{sai} s_{sai}) - \sum (\dot{m}_{ent} s_{ent}) - \sum (\dot{Q}_k / T_k) \quad 2.10$$

Com a crescente busca por otimizar e melhorar os sistemas termodinâmicos em busca de um melhor aproveitamento energético e redução de custos, consegue-se por meio de uma análise pela segunda lei da termodinâmica otimizar e melhorar a eficiência térmica de um sistema a fim de diminuir os custos e obter melhores resultados, ou seja, produzir mais com menos recursos disponíveis a fim de otimizar o processo. Para esta análise de segunda lei é introduzida uma nova propriedade que tem o nome de exergia, que mede o potencial máximo de geração de trabalho, ou também chamada de disponibilidade. A definição de exergia para Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995) é dada como a oportunidade de se realizar trabalho útil sempre que existirem dois sistemas em estados termodinâmicos, que ao serem conectados, podem entrar em equilíbrio. Segundo Galante (2019) a exergia também é uma medida de quanto um sistema se afasta de seu estado morto que é a condição ambiente.

Diferente da energia que é conservada a definição de exergia diz que quando entropia é gerada devido as irreversibilidades, exergia está sendo destruída. A geração de entropia e a destruição de exergia está ilustrada na Figura 2.7 devido a transferência de calor por meio de uma parede.

Figura 2.7 - Transferência de calor, entropia e exergia com uma diferença finita de temperatura



Fonte: (ÇENGEL, 2013).

A exergia é uma propriedade extensiva, mas é comumente utilizada em base intensiva ou molar. A Equação 2.11 mostra a exergia específica total de um sistema, associada a uma vazão mássica. Os dois primeiros termos desta equação correspondem a exergia física em função da temperatura e pressão do escoamento. O terceiro termo está associado a parcela cinética, o quarto é devido ao potencial gravitacional, por fim o último termo está associado a exergia química do sistema, relacionado à entrada/saída de produtos/reagentes em reações químicas, como por exemplo, combustíveis. Quando as eficiências exergeticas são mantidas coerentes, garantem o respeito a segunda lei da termodinâmica.

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{1}{2}V^2 + gz + e^{CH} \quad 2.11$$

Em um sistema que opera em regime permanente as componentes associadas a energia cinética ($\frac{1}{2}V^2$) e energia potencial gravitacional (gz), podem ser considerados como nulos. E o último termo da Equação 2.11, e^{CH} , trata-se da exergia química, que por sua vez está associada a ocorrência de reações químicas, como combustível Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995).

3. ASPECTOS METODOLÓGICOS

Analisando o cenário da produção de arroz e seu beneficiamento, pode-se obter informações da quantidade de casca que é gerada por tonelada de arroz. Assim é possível realizar os cálculos de quanto combustível se tem disponível na região de estudo, uma vez que se tem o dado da produção de arroz produzido em toneladas.

Dentro do estado do Rio Grande do Sul serão utilizados outros trabalhos que citam a produção de arroz e de casca no estado, como um facilitador no desenvolvimento da pesquisa. Utilizando Mayer (2009) consegue-se obter valores para a produção de arroz e quantidade de cascas geradas ao longo de um ano, além de outros dados sobre a casca de arroz.

Outro passo para a pesquisa é encontrar um local onde possa de fato se instalar um empreendimento para a geração termoelétrica, com o menor custo possível, para proceder com este estudo foi realizado uma pesquisa de que região do estado do Rio Grande do Sul é a maior produtora de arroz, e então se chegou a cidade de Pelotas, que é uma das cidades onde ocorre maior parte do beneficiamento de arroz do estado, e em seguida foi escolhido um grande empreendimento que então disponibilizasse as informações de produção e quantidade de arroz beneficiado, e a empresa em que se encontrou essa combinação de fatores foi a arrozeira Pelotas, que de forma transparente disponibiliza as informações da quantidade de arroz beneficiado em seu próprio site, sendo assim de fácil acesso (Arrozeira Pelotas | A Arrozeira, 2021).

Como descrito na revisão para realizar a queima deste combustível será considerada a utilização de uma termoelétrica que funciona a partir de um ciclo de potência a vapor, chamado ciclo Rankine. Todo o estudo termodinâmico e estudo de potência produzida pela planta passa pelos cálculos que tem como sua principal base e referência a metodologia conforme Çengel (2013).

Nesta análise termodinâmica foram definidos os dados de entrada de operação da termoelétrica, segundo De Campos (2016), como as pressões e temperaturas em determinados pontos, e depois de definidos estes dados de entrada consegue-se realizar a definição de todos os estados nos quatro pontos do ciclo Rankine, conforme descrito na Tabela 3.1. Para este estudo será realizado os balanços de massa e energia para cada ponto do sistema, além da análise de combustão na caldeira, realizando os cálculos para quantidade de ar necessário para queimar o combustível, e também a taxa de saída dos gases de exaustão. Também se fez a análise e o dimensionamento do condensador para estimar o custo do mesmo, além de encontrar todas as propriedades do ciclo termodinâmico e definir todos os estados em cada ponto, para que

posteriormente esses resultados possam ser utilizados nos demais cálculos da análise exergética (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1995; ÇENGEL, 2013; GALANTE, 2019; MORAN; SHAPIRO, 2013).

Para a análise de combustão será necessário conhecer o poder calorífico da casca de arroz juntamente com outro dado já levantado, que é a disponibilidade de casca de arroz para então saber depois do processo de combustão do combustível qual a taxa de calor que entra através da caldeira deste ciclo Rankine, para esta determinação também se necessita da composição química elementar da casca de arroz.

Os dados coletados dessa análise termodinâmica da planta serão utilizados para a realização de uma análise exergética. Será utilizada como base a pesquisa de Galante (2019), que por sua vez usa como base a metodologia descrita em Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995).

Galante (2019), diz que para um equipamento ser mais eficiente exergéticamente depende do desempenho da conversão de combustível em produto, de maneira que quanto maior for a conversão de combustível em produto, maior será a sua eficiência exergética. Esta eficiência exergética é descrita pela divisão da taxa de exergia de seus produtos pela taxa de exergia de seus combustíveis.

Os modelos serão desenvolvidos para determinação dos estados do ciclo termodinâmico serão realizadas através de uma ferramenta que será a linguagem de programação Python, por demonstrar ser uma linguagem eficiente e com diversas bibliotecas que nos possibilitam facilitar a obtenção dos dados desejados, como por exemplo a biblioteca *CoolProp* que é escrita em código aberto em C++, utilizada para determinar as propriedades de estado termodinâmicas (CoolProp, 2021).

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Consirera-se uma planta que opera sobre o ciclo Rankine simples, com o abastecimento da biomassa do resíduo agroindustrial da casca de arroz, o sistema a ser analisado é o mesmo descrito na Figura 2.6, que é composto por 4 pontos a serem analisados, os dados de entrada do ciclo estão descritos na figura abaixo.

Tabela 3.1 - Dados de entrada de operação da planta

Pontos do sistema	Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	Título [-]
1	-	8	0
2	-	4500	-
3	257,5	4500	-
4	-	8	-

Fonte: Compilação do autor.

Os dados de entrada do sistema são utilizados como base os utilizados por De Campos (2016), que simulam um sistema real, com posse destes dados é possível realizar os cálculos para o ciclo termodinâmico, conforme a tabela acima.

3.2 HIPÓTESES ADOTADAS

Além de ter estes dados de entrada algumas hipóteses são adotadas no sistema termodinâmico, que estão descritas abaixo:

- Escoamento em regime permanente;
- Energia cinética e potencial negligenciadas;
- A eficiência isentrópica da bomba e da turbina são 85% ambas, baseado no estudo descrito em De Campos (2016);
- Considera-se uma eficiência de 93% da caldeira, pois ocorrem perdas de calor no processo de combustão e uma parte do calor não é aproveitado, valor obtido segundo De Campos (2016);
- Também se considera uma eficiência do gerador elétrico de 99%, pois devido ao atrito e outros fatores ocorrem perdas de energia de origem mecânica da turbina para o gerador;
- Apesar de haver um estudo da Cientec (1986), conforme mostra a Tabela 2.4, que parte da biomassa da casca de arroz das indústrias de beneficiamento já é utilizada em outras aplicações, no presente estudo se considera que 100% da biomassa da Arroeira Pelotas é utilizada na planta termoelétrica;
- Estimativa de eficiência térmica de 30%;

- Temperatura do fluido de entrada e temperatura do fluido de saída do condensador 29°C e 39,5°C, respectivamente, considerando estes dados retirados de Galante (2015);
- Para análise de custos pelo *payback* se considera custo com manutenção e operação de 9% do capital investido, com base na hipótese de Oliveira Filho (2020);
- Contempla-se os custos de montagem dos equipamentos, nos custos de aquisição destes;
- Vida útil do empreendimento para se considerar amortização será de 20 anos, desprezando o valor da venda dos equipamentos no fim de sua vida útil (OLIVEIRA FILHO, 2020);
- Desconsidera-se fatores de correção da inflação na análise (OLIVEIRA FILHO, 2020).

4. CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para realizar a modelagem do ciclo Rankine, segundo a metodologia de Çengel (2013), inicialmente se faz necessário quantificar a quantidade de combustível disponível para queima na planta de estudo. Como uma das hipóteses adotadas é que 100% do resíduo agroindustrial é utilizado na planta termoeletrica.

Sabendo que a quantidade total de arroz já beneficiado é de 18000 toneladas por mês e tendo a informação de que a casca de arroz representa 20% do peso do grão bruto, obtém-se que a casca de arroz disponível para queima é de:

$$\dot{m}_{CB} = 4500 \times 10^3 \frac{kg}{mês} = 1,736 \frac{kg}{s} \quad 4.1$$

Para determinar a energia liberada pelo combustível deve-se calcular o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI), que por sua vez depende da composição química do combustível. Na Tabela 4.1 tem informações da composição química elementar do combustível, já considerando a quantidade de cinzas geradas por este combustível, a composição contém carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas (Z).

Tabela 4.1 - Composição do combustível, base seca

Combustível	Composição elementar [%]					
	C	H	O	N	S	Z
Casca de arroz	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34

Fonte: (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Além de considerar a composição química da casca de arroz, para a realização do cálculo do PCI conforme descrito na Equação 2.2, também se faz necessário considerar a umidade do combustível (W), que segundo Mayer (2009) a umidade da casca é de 12%.

Como a transferência de calor do sistema não é ideal e ocorrem perdas, é considerada então uma eficiência da caldeira, que se faz necessária para calcular quanto de calor efetivamente entra no sistema e vai ser útil para aquecer o fluido de trabalho do ciclo Rankine. Com isso se obtém uma equação para determinar a quantidade de calor real que entra ($\dot{Q}_{real,ent}$) segundo a Equação 4.2:

$$\dot{Q}_{real,ent} = \eta_{cald} \dot{Q}_{ideal,ent} = \eta_{cald} \dot{m}_{CB} PCI \quad 4.2$$

Sabe-se que a eficiência térmica do sistema, ou também chamado de rendimento térmico pode ser escrito pela taxa de energia líquida o sistema produziu sobre a taxa de energia que o sistema consumiu na forma de calor que entrou no sistema, e está escrita conforme mostra a Equação 4.3:

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{ent}} = \frac{\dot{W}_{sai} - \dot{W}_{ent}}{\dot{Q}_{real,ent}} \quad 4.3$$

Esta equação para o cálculo do rendimento térmico do sistema, é importante para podermos determinar a escala de geração de energia da planta, pois é utilizada para a determinação dos dados de entrada do sistema. Inicialmente estima-se que a planta possui um rendimento térmico de 30%, que é um rendimento térmico baixo para termoeletricas, pois segundo a Copel ([s.d.]) (Companhia Paranaense de Energia) o rendimento térmico médio de uma UTE varia em média de 30% a 42% (Copel, [s.d.]).

Tendo uma estimativa do rendimento térmico se obtém a ordem de grandeza do trabalho líquido (\dot{W}_{liq}) da termoeletrica em (MW), para então possuir referências de valores de entrada de plantas similares a esta.

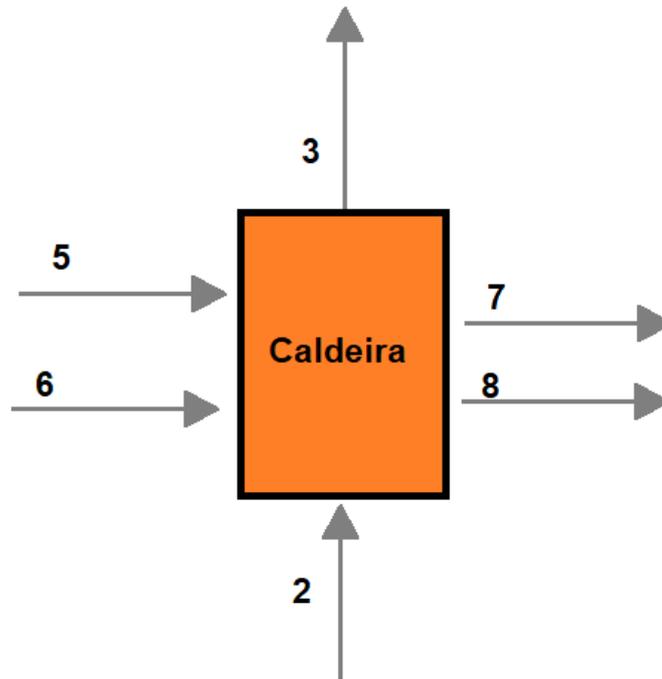
Uma vez definida a quantidade de calor que entra no sistema, é realizado então o cálculo da vazão mássica do fluido de trabalho do ciclo Rankine que é a água, para realizar este cálculo se faz um balanço de energia na caldeira utilizando a primeira lei através da variação de entalpia de entrada e de saída da água, e por fim obtém-se a vazão mássica da água ($\dot{m}_{\acute{a}gua}$) a partir da Equação 4.4:

$$\dot{m}_{\acute{a}gua} = \frac{\dot{Q}_{real,ent}}{h_3 - h_{2,r}} \quad 4.4$$

Com o auxílio da variação de entalpia nos pontos e eficiência isentrópica é calculado o trabalho necessário para a bomba (\dot{W}_{ent}) e também o trabalho produzido pela turbina (\dot{W}_{sai}) conforme ilustra a Figura 2.6 e com o auxílio das Equações 2.3 à 2.6.

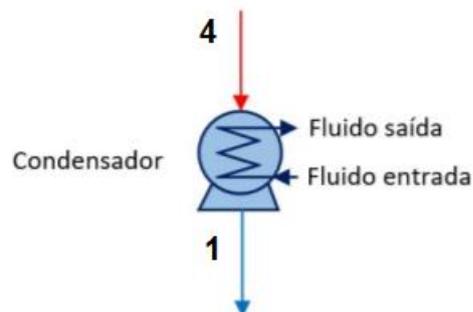
Na Figura 4.1 ilustra o volume de controle da caldeira, em que o ponto 5 representa a entrada de combustível, o ponto 6 a entrada de ar, os pontos 2 e 3 mostram o fluxo do fluido de trabalho que é aquecido na caldeira, e por fim os pontos 7 e 8 representam os gases de exaustão e as cinzas, respectivamente.

Figura 4.1 - Volume de controle da caldeira



Fonte: O autor.

Figura 4.2 - Volume de controle do condensador



Fonte: Modificado de OLIVEIRA FILHO, (2020).

A figura acima ilustra o condensador em que passa à água do ciclo de potência após passar pela turbina. Sua função como o próprio nome diz é condensar o que passa por ele, neste caso entra uma mistura de líquido e vapor saturado que veio da turbina, ponto 4, e é condensado para sair como líquido saturado (título 0) no ponto 1.

Com as temperaturas consegue-se obter a efetividade (ε) do condensador e o número de unidades de transferência (NUT). Esta modelagem é conhecida como método da Efetividade-NUT, cujo equacionamento da efetividade (ε) está descrito na Equação 4.5 conforme a metodologia descrita em Incropera; Dewitt; Lavine (2007).

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{cond}}{\dot{Q}_{max}} \quad 4.5$$

em que \dot{Q}_{cond} é taxa de transferência de calor real no trocador de calor e \dot{Q}_{max} é máxima taxa de transferência de calor possível neste trocador de calor.

Para Oliveira Filho, (2020) sabe-se que para qualquer trocador de calor:

$$\varepsilon = f\left(NUT, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \quad 4.6$$

Com o NUT consegue-se obter o produto entre a área e o coeficiente global de transferência de calor (UA), em que NUT é definido como:

$$NUT = \frac{UA}{C_{min}} \quad 4.7$$

No cálculo da efetividade é necessário determinar qual dos escoamentos possui capacidade térmica mínima, nesse caso como ocorre a condensação do vapor a temperatura constante, sua capacidade térmica é considerada infinita, logo a corrente de água fria é a que tem capacidade térmica mínima. Assim a efetividade de um condensador com escoamento paralelo como é considerado o condensador deste estudo é descrita pela Equação 4.8.

$$\varepsilon = \frac{T_{frio,sai} - T_{frio,ent}}{T_{quente,ent} - T_{frio,ent}} \quad 4.8$$

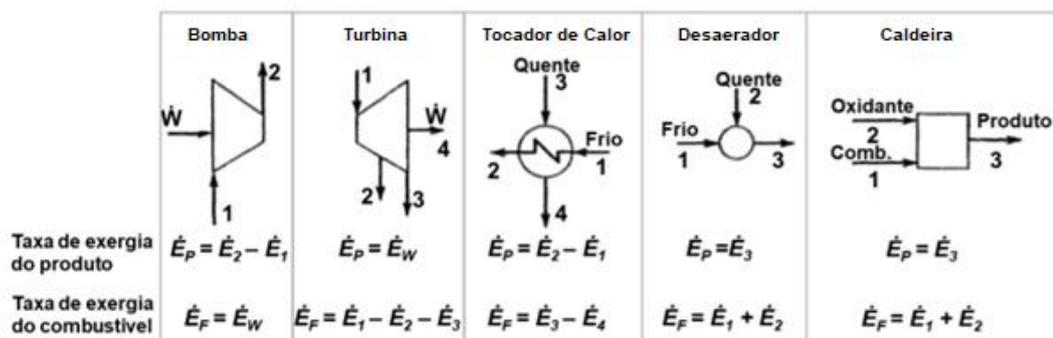
4.1 MODELAGEM EXERGÉTICA

Para o estudo exergético, utilizam-se como base para esta metodologia Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995), e Galante (2019), estes dizem que é necessário a determinação dos estados termodinâmicos de todos os pontos do sistema, juntamente com suas vazões mássicas. Para determinação da exergia total do sistema é necessário que se conheça a exergia física específica (kJ/kg) do sistema conforme ilustra a Equação 2.11. Para determinação da exergia química (e^{ch}) do sistema, basta tomar a fração mássica (Fm) e multiplicar pela exergia química em padrão molar (kJ/kmol) de cada um dos n componentes, sobre sua massa molar (MM), conforme mostra a Equação 4.9.

$$e^{ch} = \sum \frac{Fm_n \bar{e}_n^{ch}}{MM_n} \quad 4.9$$

Para a base de uma análise exergética e exergoeconômica, está a definição de combustível e produto de cada equipamento. Para determinar a taxa de exergia e a taxa de custos de cada equipamento a Figura 4.3 é usada como base para obter-se as equações. O termo combustível não é restrito a biomassa, no caso deste trabalho a casca de arroz, mas representa o quanto se gasta para gerar o produto Galante (2019). Neste trabalho foi feita somente a parte de análise exergética.

Figura 4.3 - Equações para cálculo de taxas de exergia e determinação de custos



Fonte: Adaptado de (BEJAN; TSATSARONIS; MORAN, 1995), e (GALANTE, 2019).

Tabela 4.2 - Taxas de exergia de produto e combustível

Equipamento	\dot{E}_P	\dot{E}_F
Caldeira	$\dot{E}_3 - \dot{E}_2$	$\dot{E}_5 + \dot{E}_6 - \dot{E}_7$
Turbina	\dot{W}_{sai}	$\dot{E}_3 - \dot{E}_4$
Condensador	$\dot{E}_{frio,sai} - \dot{E}_{frio,ent}$	$\dot{E}_4 - \dot{E}_1$
Bomba	$\dot{E}_2 - \dot{E}_1$	\dot{W}_{ent}

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA FILHO, 2020).

A eficiência exergética é o que mede quanto melhor um equipamento consegue converter combustível em produto, quantificado pela Equação 4.10. Esta grandeza de eficiência também pode ser quantificada pela razão de exergia de produto do sistema em relação a exergia de combustível do sistema.

$$\varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}} \quad 4.10$$

Outra relação útil é a razão de destruição de exergia (y_D), em que compara a taxa de destruição de exergia de cada equipamento em relação a entrada de exergia do combustível no sistema (GALANTE, 2019). Esta relação é dada pela Equação 4.11, conforme mostrada abaixo:

$$y_D = \frac{\dot{E}_{D,k}}{\dot{E}_{F,total}} \quad 4.11$$

Em que $\dot{E}_{F,total}$ é definido como:

$$\dot{E}_{F,total} = \dot{E}_{F,cald} + \dot{E}_{F,bomba} \quad 4.12$$

4.1.1 Taxas de Investimento de Capital e Operação e Manutenção

Para detalhar os custos um dos primeiros passos é estimar o Capital de Investimento do sistema (CI). Segundo Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995), uma das melhores formas de se determinar é segundo as informações do fabricante, ou quem é responsável pela venda dos

equipamentos. Porém na ausência destes dados ou na consulta direta com o fabricante pode-se utilizar uma extrapolação dos custos, em que já se conheça o custo dos equipamentos para diferente escala de trabalho. Este cálculo é dado pela Equação 4.13, sendo apropriado para equipamentos iguais quando necessário determinar o custo de um mesmo equipamento com diferentes capacidades (OLIVEIRA FILHO, 2020).

$$C_{PE,Y} = C_{PE,W} \left(\frac{X_Y}{X_W} \right)^\alpha \quad 4.13$$

Onde:

$C_{PE,Y}$ = Custo do equipamento que se deseja determinar;

$C_{PE,W}$ = Custo do equipamento conhecido;

X_Y = Capacidade ou tamanho do equipamento que se deseja determinar;

X_W = Capacidade ou tamanho do equipamento conhecido;

α = Fator de escala em função do tipo de equipamento, conforme exibido na Tabela

4.3.

Tabela 4.3 - Valores comuns do fator de escala α

Equipamento	Variável X	Faixa [MW]	Fator α
Caldeira	Carga térmica	5 – 350	0,78
Bomba	Potência	0,020 – 0,200	0,48
Turbina	Potência	0,1 – 50	0,50

Fonte: Adaptado de Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995).

É importante quantificar os fluxos financeiros de entrada e de saída, pois são utilizados para determinar o tempo para retorno de investimento, chamado de *payback*. A definição de *payback* é o tempo necessário para que a entrada líquida de renda que a planta termoeletrica gera, possa superar todo o investimento realizado. Esta é mais uma abordagem para se analisar a viabilidade da instalação de um empreendimento como este, cujo os cálculos estão descritos nas Equações abaixo:

$$Payback = \frac{CI_{total}}{hr_{ano}(Caixa_{ent} - Caixa_{sai})} \quad 4.14$$

$$Caixa_{ent} = \dot{C}_{P,turb} \quad 4.15$$

$$Caixa_{sai} = \dot{Z}_{OM,total} \quad 4.16$$

Para a realização do cálculo do *payback* precisa-se determinar por qual valor será vendida a energia elétrica, que é o trabalho líquido que sai do sistema, para isto se considera o mesmo valor usado por Oliveira Filho (2020), que por sua vez utilizou um dado do 29º Leilão de Energia Nova, que foi realizado em junho de 2019, no qual a empresa vencedora foi a Sonora Estancia S/A com uma potência habilitada de 21.390 MW, que venceu o leilão no valor de 179,87 R\$/MWh (EPE, 2020). Para este cálculo do *payback* os valores estimados de custo dos equipamentos são trazidos para o mesmo período em que é informada a data dos valores da energia elétrica, tomando os dados dos preços do trabalho de Santos (2014), utilizando como base de cálculos para inflação a calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (BCB - Calculadora do cidadão, 2021).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados da composição da casca de arroz consegue-se obter os valores de poder calorífico da biomassa, mediante as Equações 2.1 e 2.2, conforme o resultado disposto na tabela abaixo:

Tabela 5.1 - Resultados casca de arroz

Parâmetro	Valor	Unidade
PCS	12112,40	kJ/kg
PCI	10988,64	kJ/kg

Fonte: Compilação do autor.

Para determinação dos custos dos equipamentos utilizou-se como base os dados mostrados em Santos (2014). Para isto toma-se os valores dos equipamentos para a planta de 32 MW de capacidade de geração elétrica, movida a bagaço de cana de açúcar, além de se determinar os estados termodinâmicos para o cálculo da capacidade térmica dos equipamentos. De posse destes dados, tomou-se a correlação descrita por Bejan; Tsatsaronis; Moran (1995), conforme mostrada na Equação 4.13, para se estimar os custos dos equipamentos de uma termoelétrica de aproximadamente 5 MW do presente estudo, com os valores mostrados na Tabela 5.2.

O custo de investimento maior em valores absolutos do sistema é para aquisição da turbina, que custa através das estimativas, cerca de R\$ 12.056.262,00, em que o seu custo se justifica por se tratar de equipamento de precisão e através deste equipamento é onde sai a potência que efetivamente gera energia elétrica. O segundo maior custo é de R\$ 7.602.233,00 para aquisição da caldeira, que responsável pela transferência de calor para o sistema termodinâmico. Por sua vez os custos mais baixos de capital de investimento são para adquirir o condensador e a bomba, respectivamente.

Tabela 5.2 - Custos estimados dos equipamentos para uma planta de 5 MW, considerando os dados de Santos (2014)

Equipamento	Custo calculado [R\$]
Bomba	541.833,00
Caldeira	7.602.233,00
Condensador	973.766,00
Turbina	12.056.262,00

Fonte: Compilação do autor.

O combustível que é a biomassa da casca de arroz é o principal consumível do sistema, no caso da arrozeira Pelotas a suposição é de que a empresa já detém a casca, logo não tem custo algum, caso fosse adquirir a biomassa para fins da análise se faz necessário considerar que esta biomassa tem um custo dado em reais por tonelada (R\$/Ton). Como seu custo é desprezado, no sistema o único combustível com custo é a energia elétrica por parte da bomba, se fazendo necessário saber o custo da energia elétrica, que por sua vez é descontado da energia gerada pela planta.

5.1 CÁLCULOS DO CICLO RANKINE

Com estes valores determinam-se os demais estados do sistema termodinâmico, com o auxílio das Equações 2.1 a 2.6. Os valores e resultados são listados na Tabela 5.3, em que é descrito o ponto de determinação do estado conforme a Figura 2.6. Os pontos 5, 6 e 7 por sua vez representam respectivamente a entrada do combustível que é a casca de arroz, o ar para combustão e os gases que saem após a combustão. Na Tabela 5.3, são exibidos os valores de temperatura, pressão, vazão mássica, exergia específica e a taxa de exergia por hora, para todos os pontos que compõe o sistema.

Tabela 5.3 - Dados de operação da planta, após cálculos

Ponto	Fluxo	T[°C]	P[kPa]	\dot{m} [kg/h]	e[kJ/kg]	\dot{E} [kJ/h]
1	Água	41,5	8	24387,2	1,749	42653,69
2	Água	41,8	4500	24387,2	6,317	15,40E+04
3	Vapor	257,5	4500	24387,2	1007,848	24,58E+06
4	Água	41,50	8	24387,2	98,567	24,03E+05
5	Biomassa	25	101,3	6250	28883,46	18,05E+07
6	Ar	25	101,3	25861,68	17,3	44,74E+04
7	Gases	206,61	101,3	31096,33	145,69	45,30E+5

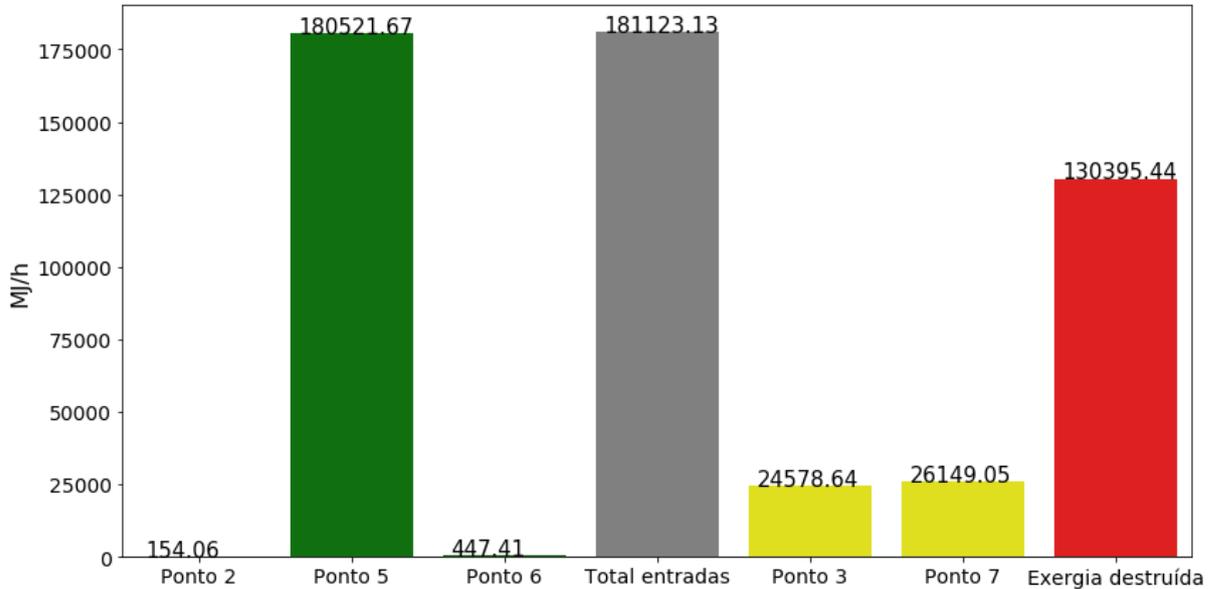
Fonte: Compilação do autor.

5.2 ANÁLISE EXERGÉTICA

Para esta análise contamos com os gráficos de barras para ilustrar o os fluxos de exergia ao longo do sistema, mostrados em MJ/h para cada um dos equipamentos a fim de mostrar os valores de exergia que entram em cada um dos equipamentos, os valores de exergia que saem do sistema e também a exergia destruída em cada um dos equipamentos. Para uma melhor visualização os dados são diferenciados por cores em que a cor verde mostra a exergia que entra em cada equipamento, a cor cinza mostra o total das entradas, em amarelo mostra cada uma das saídas de exergia dos equipamentos e em vermelho a exergia destruída.

Na caldeira conforme ilustra a Figura 5.1 a água chega pressurizada vinda da bomba através do ponto 2, conforme mostrado pela Figura 4.1, entra exergia também por meio do combustível que é a casca de arroz, que é a maior fonte de entrada de exergia do equipamento, para realizar a combustão também entra ar na temperatura e pressão ambiente para a queima do combustível, totalizando 181123 MJ/h de entrada de exergia na caldeira. As saídas de exergia por sua vez são o produto no ponto 3, que é o vapor de água que então é direcionado para a turbina e os gases de exaustão que saem no ponto 7, além disso tem-se uma parcela desta exergia que é destruída totalizando 130395 MJ/h.

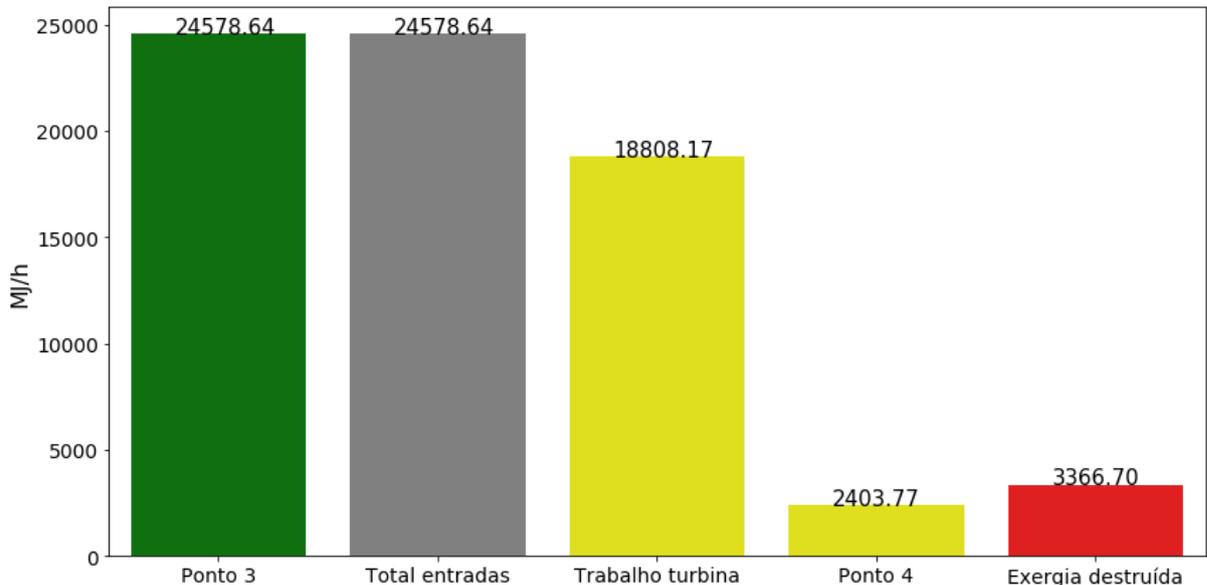
Figura 5.1 - Fluxo de Exergia na Caldeira



Fonte: Compilação do autor.

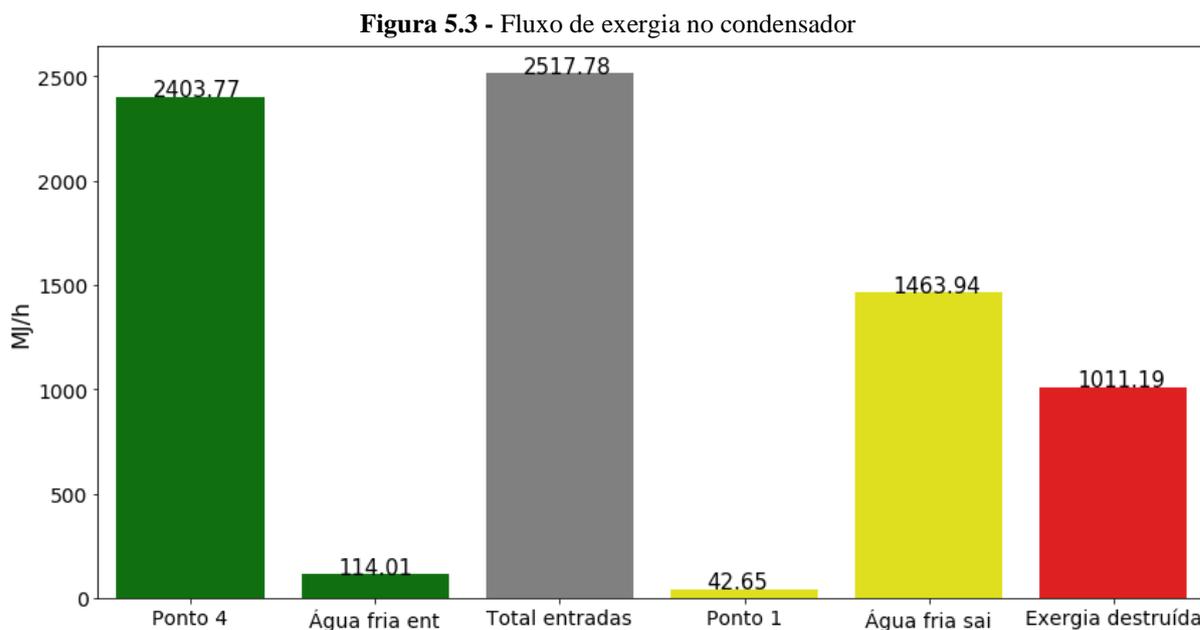
A figura Figura 5.2 exibe o fluxo de exergia através da turbina, em que toda a exergia que entra neste equipamento é proveniente do ponto 3, mostrado na Figura 2.6 que é o vapor superaquecido de água, vapor este que se transforma em trabalho a uma taxa de 188808 MJ/h, que por sua vez é a eletricidade gerada pelo sistema termodinâmico, depois de extrair a energia deste vapor, tem-se a saída de exergia pelo ponto 4, conforme exibido na Figura 2.6 e também uma parcela de exergia é destruída na turbina totalizando 3366 MJ/h

Figura 5.2 - Fluxo de exergia na turbina



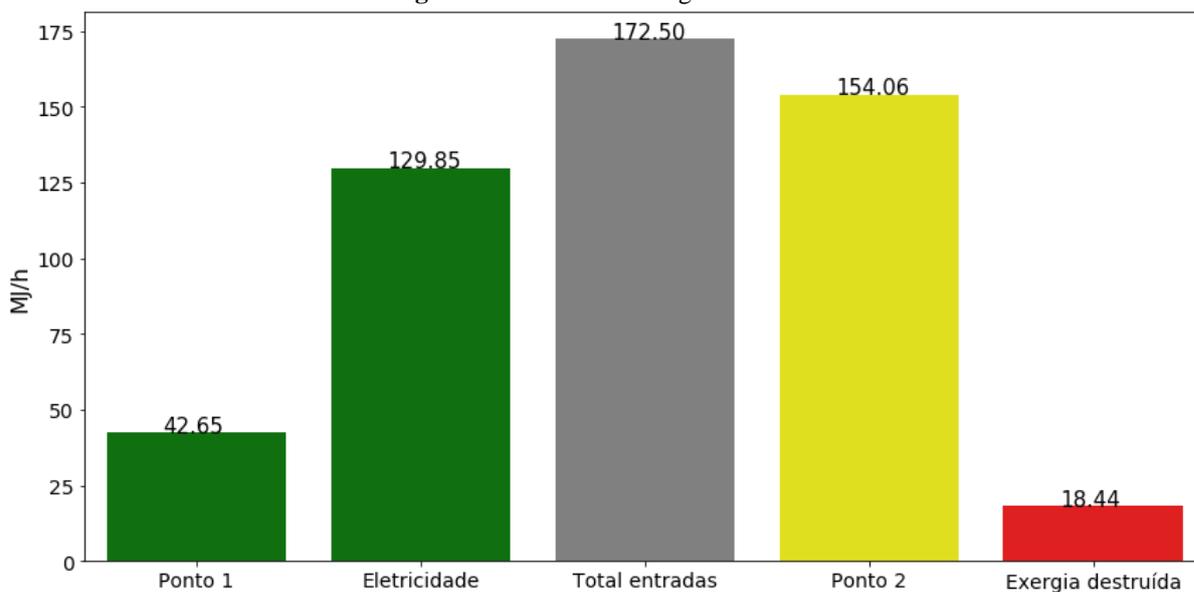
Fonte: Compilação do autor.

No condensador conforme mostra a Figura 5.3, entra exergia no ponto 4 que é exibido na Figura 4.2 e uma parte pequena de exergia por parte da água fria responsável pela troca de calor no condensador, totalizando as entradas em 2517 MJ/h. A água do sistema é resfriada e tem-se como produto deste equipamento a água que sai morna e com uma exergia maior de 1463 MJ/h.



Fonte: Compilação do autor.

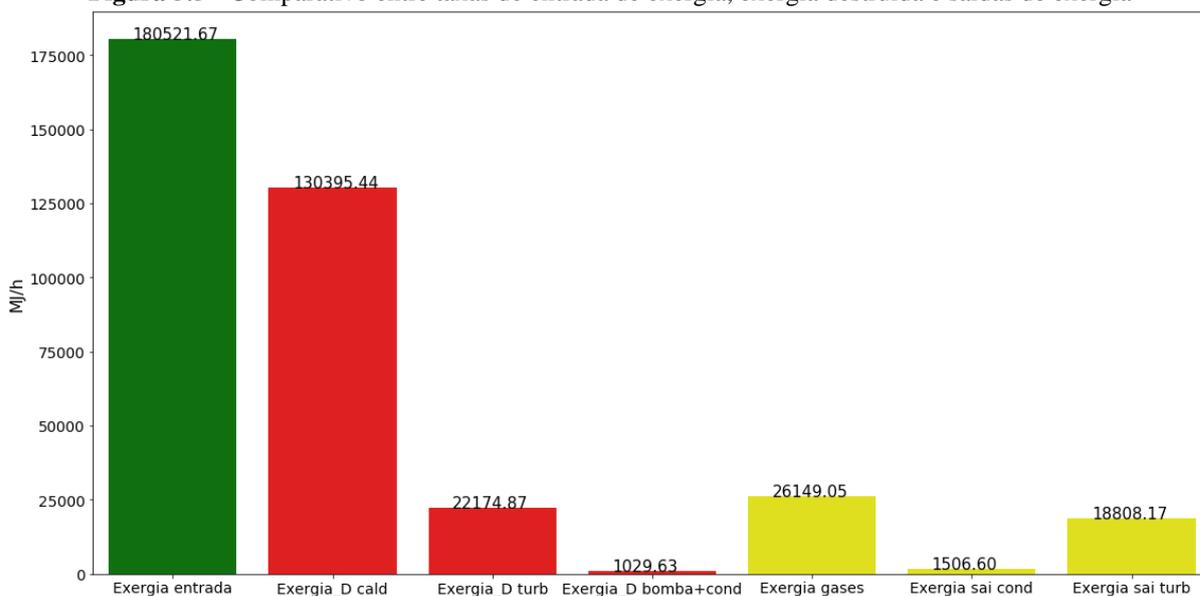
Por fim na bomba entra exergia no ponto 1, conforme ilustra a Figura 2.6 e através da eletricidade que move a bomba para que ocorra a pressurização da água. Por sua vez é um dos equipamentos em que menos destrói exergia, pois esta já recebe uma energia de qualidade proveniente da eletricidade que a alimenta.

Figura 5.4 - Fluxo de exergia na bomba

Fonte: Compilação do autor.

Até o momento foi comparado a exergia cada equipamento de maneira separada, porém agora pode-se relacionar os dados dos equipamentos conforme mostra a Figura 5.5, em que o total de entrada de exergia no ciclo termodinâmico Rankine é por meio da casca de arroz que é o combustível. Conforme os resultados o equipamento que mais destrói exergia é a caldeira, que se justifica porque ocorrem diversas irreversibilidades no sistema que não é ideal e uma parte da energia não está disponível para a geração de trabalho, e também no processo de transferência de calor na caldeira é onde ocorre a maior geração de entropia do sistema, como é possível constatar em diagrama T-s (ÇENGEL, 2013). Em segundo lugar a turbina é o equipamento que mais destrói exergia na conversão de trabalho.

Outro dado significativo é o valor da exergia dos gases de exaustão, oriundos da combustão. Esta informação sugere que sejam feitas melhorias no ciclo termodinâmico, como por exemplo usar estes gases já pré aquecidos para alimentar a caldeira, aumentando assim a eficiência da caldeira.

Figura 5.5 - Comparativo entre taxas de entrada de exergia, exergia destruída e saídas de exergia

Fonte: Compilação do autor.

A Tabela 5.4 exibe os resultados dos cálculos da eficiência exergética para cada um dos equipamentos do sistema, nela é possível medir qual dos equipamentos possui maior capacidade de aproveitar a exergia do combustível em produto, segundo o cálculo da Equação 4.10, e também com o auxílio das relações exemplificadas na Figura 4.3 para cada equipamento.

Tabela 5.4 - Eficiência Exegética e taxa de destruição de exergia dos equipamentos

Equipamento	ϵ_k [%]	γ_D [%]
Caldeira	15,78	84,15
Turbina	84,82	2,17
Condensador	57,17	0,65
Bomba	85,80	0,01

Fonte: Compilação do autor.

O equipamento que possui uma melhor eficiência exergética de 85,80% é a bomba que pressurizado fluido de trabalho, devido a água entrar no estado de líquido saturado e sair com uma exergia bem mais elevada. O segundo equipamento com melhor eficiência exergética é a turbina com um valor de 84,82%, oque significa que o equipamento consegue converter bem a exergia em trabalho, dado muito importante, pois o objetivo da termoelétrica é a geração de energia elétrica, logo é primordial um funcionamento eficiente por parte deste equipamento. O equipamento com pior desempenho quando analisado em termos de eficiência exergética é a

caldeira que tem um valor de 15,78%, isto está relacionado porque a caldeira tem uma alta taxa de destruição de exergia e também porque a exergia dos gases de combustão sai com valor bem elevado, como já citado anteriormente, logo faz seus valores em termos exergéticos serem ruins. Os demais equipamentos possuem valores da taxa de destruição de exergia menores, quando comparados a caldeira, em segundo lugar fica a turbina com uma taxa de destruição de exergia de 2,17%, seguida do condensador com 0,65% e da bomba que possui a menor taxa de destruição de exergia do sistema com 0,01%.

Estão exibidos também na Tabela 5.4 os valores para a razão de destruição de exergia (y_D) para cada equipamento do sistema. Esta razão mostra uma comparação entre a taxa de destruição de exergia do equipamento em relação ao total de exergia do combustível que foi fornecido ao equipamento. A soma das taxas de destruição de exergia não pode chegar ou ultrapassar o valor de 100%, pois uma parcela da exergia dos combustíveis dos equipamentos é convertida em calor, trabalho ou algum outro produto.

O cálculo das eficiências por primeira e segunda lei auxiliam a entender quão eficiente é o sistema termodinâmico. Com a eficiência de primeira lei é apenas levado em consideração a energia do sistema é convertida em trabalho. Já na eficiência de segunda lei mostra quão perto o sistema está de operar como uma máquina de Carnot, uma vez que análise a parcela útil de energia sendo dada pela divisão da exergia do produto sobre a exergia do combustível. Tem-se que os valores da exergia de combustível do sistema ($\dot{E}_{F,sistema}$) corresponde a 180.521,67 MJ/h e a exergia de produto do sistema ($\dot{E}_{P,sistema}$) corresponde a 18.808,17 MJ/h, que são os valores utilizados para o cálculo da eficiência de segunda Lei (ϵ_{sis}) mostrada na tabela abaixo.

Tabela 5.5 - Eficiência térmica e eficiência exergética do sistema

Variável	Valor [%]
Eficiência de primeira Lei (η_{term})	29,54
Eficiência de segunda Lei (ϵ_{sis})	10,42

Fonte: Compilação do autor.

Na Tabela 5.5 são exibidos os valores de eficiência tanto para primeira lei quando para a segunda, sendo que a eficiência por segunda Lei possui um valor de 10,42%, que por sua vez usa como base a exergia e fica com um valor menor quando comparado com a eficiência de primeira lei.

Para melhor exibir os resultados da exergia do combustível, produto e destruição de exergia, estão descritos na Tabela 5.6 estes valores, juntamente com a eficiência exergetica para cada equipamento e também a taxa de destruição de exergia para cada equipamento. Em que se nota que a destruição de exergia na caldeira é de 13,04E+07 kJ/h.

Tabela 5.6 - Valores de exergia de combustível e produto, eficiência exergetica, exergia destruída e razão de destruição de exergia para cada equipamento

Equipamento	\dot{E}_F [kJ/h]	\dot{E}_P [kJ/h]	ϵ_E [%]	\dot{E}_D [kJ/h]	γ_D [%]
Caldeira	15,48E+07	24,42E+06	15,78	13,04E+07	84,15
Turbina	22,17E+06	18,80E+06	84,82	33,66E+05	2,17
Condensador	23,61E+05	13,50E+05	57,17	10,11E+05	0,65
Bomba	12,97E+04	11,14E+04	85,80	18,44E+03	0,01

Fonte: Compilação do autor.

Através da tabela acima, consegue se constatar que a maior taxa de entrada de combustível é a caldeira, com 15,48E+07 kJ/h, como é esperado, pois a entrada da biomassa para combustão ocorre na caldeira e a biomassa tem um alto poder exergetico. Também se observa que a maior geração de produto é na saída da caldeira, que é o gás superaquecido, seguido da maior geração de produto que é a saída de trabalho da turbina com 18,80E+06 kJ/h.

5.3 ANÁLISE ECONÔMICA

Para uma compreensão econômica dos custos utiliza-se um *payback* simplificado, que consiste em analisar o balanço de caixa conforme mostrado pela Tabela 5.7. Para realizar os cálculos do *payback* utilizam-se como base as Equações 4.14 a 4.16, em que se considera o capital de investimento total que é a soma dos custos de cada equipamento mostrados na Tabela 5.2, que totalizam R\$ 28.903.109,00 considerando a inflação até junho de 2019. Também se considera uma vida útil do empreendimento de 20 anos e despreza-se o valor dos equipamentos ao final deste período. O valor que entra em caixa é proveniente pela venda da energia líquida gerada pela planta termoeletrica, que é o valor já descontado da energia que é utilizada na bomba, este valor de venda da energia é de 179,87 R\$/MWh. O valor que sai do caixa é devido aos custos de operação e manutenção, conforme hipótese o custo de manutenção e operação é de 9% ao ano em relação ao capital de investimento total. Com este cálculo se obtém que o tempo para que se pagasse o investimento é de 8,53 anos, ou seja, através deste cálculo dá

indícios que o empreendimento é viável de ser implantado. Este cálculo não leva em consideração custos da biomassa.

Tabela 5.7 - Balanço de caixa, baseado no valor de mercado do MWh

Entradas	[R\$/h]	Saídas	[R\$/h]
$\dot{C}_{MWH,venda}$	933,2415	$\dot{Z}_{OM,total}$	405,3430
<i>Caixa</i>_{total,ent}	933,2415	<i>Caixa</i>_{total,sai}	405,3430

Fonte: Compilação do autor.

Vale ressaltar que este *payback* não ilustra tão bem a realidade, pois deveria ao menos considerar custos de aquisição da biomassa, além de considerar valores corrigidos pela inflação para a manutenção e operação do empreendimento. Poderia ter sido tomada uma outra abordagem no cálculo dos custos para manutenção e operação, que considerassem dados reais ao invés de uma estimativa de 9% ao ano em relação ao capital de investimento.

6. CONCLUSÃO

Com este estudo ficam visíveis os resultados sobre a aplicação da casca de arroz como combustível de uma planta termoelétrica, trazendo a conclusão que um sistema termodinâmico opera muito bem quando se utiliza a queima da casca de arroz para o fornecimento de calor para o ciclo Rankine simples analisado. A casca de arroz para a queima apesar que gere o dióxido de carbono (CO₂) ainda é vantajosa, pois quando fica em decomposição no ambiente gera gases prejudiciais como o metano (CH₄). Também apresenta vantagem quando comparada com outra biomassa em relação a sua umidade, pois apresenta uma umidade bem baixa de 12%, enquanto outras biomassas tem teores de umidade maiores. Além de tudo isso a casca de arroz apresenta outra vantagem, pois é um produto que não compete com alimentação humana, por se tratar de um resíduo agroindustrial.

A planta termoelétrica do presente estudo movida a biomassa que é o resíduo agroindustrial da casca de arroz apresentou para a Arroeira Pelotas a capacidade de geração de 5 MW para a produção de energia elétrica. Foram realizados os estudos para a análise termodinâmica de primeira lei que pode ser obtida de forma simples e rápida utilizando-se de uma ferramenta computacional, mostrando que a linguagem de programação Python é um facilitador para se realizar todos os cálculos necessários do estudo.

Foi mostrado através da análise exérgica os resultados dos valores de exérgia em cada ponto, balanços de exérgia para cada equipamento, além do cálculo da eficiência exérgica para cada equipamento e também a obtenção de uma eficiência pela segunda lei da termodinâmica.

Através de correlações foram estimados os valores dos custos dos equipamentos para uma análise de custos mediante um *payback*, que obtve um resultado positivo quando analisado a vida útil de 20 anos no empreendimento, o *payback* resultou em 8,53 anos, mostrando que sim deve ser levado em consideração o uso desta biomassa para a geração de energia elétrica.

Foi alcançado os objetivos específicos quanto a disponibilidade da casca de arroz, mostrando que sim tem um excedente de casca que pode ser utilizado em uma termoelétrica. Os modelos termodinâmicos respeitam tanto a primeira quando a segunda Lei da termodinâmica, mostrando coerência dos resultados. Também com a análise exérgica pode-se atestar com os cálculos realizados que possui sim uma aplicação deste empreendimento.

Deixei para trabalhos futuros explorarem a análise exergoeconômica que se baseia numa análise exérgica e se aprofundar mais no âmbito dos cálculos do custo, além de considerar a

hipótese de ser efetuada a compra da biomassa para aplicação na termoelétrica. Outra abordagem deste trabalho pode ser detalhar melhor a caldeira e analisar os trocadores de calor que existem dentro de caldeiras reais, considerando suas eficiências e o que isso acarretaria na diminuição da destruição de exergia por parte da caldeira que apresentou um valor bem alto.

Ainda pode-se utilizar estes dados do trabalho e além da geração de energia elétrica da planta, também considerar a geração de vapor em um ciclo de cogeração. Também pode-se analisar a viabilidade das cinzas que saem do processo de combustão serem utilizadas para outras aplicações como na indústria do cimento.

Pode-se incrementar também a busca pelos custos, pesquisando os custos reais dos equipamentos, juntamente com a busca por mais dados experimentais para a operação da planta e listar as maiores deficiências que plantas reais enfrentam a fim de tentar minimizar perdas e otimizar o processo de geração de energia elétrica por meio da queima da casca de arroz, por meio de uma análise exergética.

REFERÊNCIAS

AGEITEC-EMBRAPA. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Colheita**. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fx8sgduq02wyiv80u5vcsv0gbyn9w.html>>. Acesso em: 1 nov. 2021a.

AGEITEC-EMBRAPA. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Cultivar**. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/arroz/arvore/CONT000fojvokoc02wyiv80bhgp5povqj3b.html>>. Acesso em: 1 nov. 2021b.

ARMESTO, L. et al. **Combustion behaviour of rice husk in a bubbling guided bed Biomass and Bioenergy**. [s.l: s.n.].

Arrozeira Pelotas. Disponível em: <<http://www.arrozeirapelotas.com.br/index>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

Arrozeira Pelotas | A Arrozeira. Disponível em: <<http://www.arrozeirapelotas.com.br/arrozeira>>. Acesso em: 1 nov. 2021.

BARBOSA, D. R. USINAS TERMOELÉTRICAS – UTE MURICY I. 2010.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BCB - Calculadora do cidadão. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>>. Acesso em: 9 dez. 2021.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design and Optimization**. 1995.

BORGES, L. E. **Python para Desenvolvedores**. 2ª edição ed. São Paulo- SP: Novatec Editora, 2014.

BRAGANTINI, C. **Alguns Aspectos do Armazenamento de Sementes e Grãos de Feijão** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Arroz e Feijão Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2005.

Casca de arroz - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/1992001/casca-de-arroz>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

CASTRO, G. DE S. et al. **OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES APLICADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA TERMELÉTRICA**. 2008.

ÇENGEL, Y. ; B. M. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHAND, N.; FAHIM, M. Tribology of Natural Fiber Polymer Composites. **Tribology of Natural Fiber Polymer Composites**, 2020.

CIENTEC. **Aproveitamento energético da casca de arroz, relatório final do projeto de pesquisa CIENTEC-FINEP. Fundação de Ciência e Tecnologia, Porto Alegre. 1986. 170 p.**, 1986.

Conab - Outras Publicações - Calendário Agrícola (plantio e colheita). Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/outras-publicacoes>>. Acesso em: 17 out. 2021.

Conab - Série Histórica das Safras. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras?start=10>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

CoolProp. Disponível em: <<http://www.coolprop.org/>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

Copel. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F20CFDA2B13CFECCF032573FD00697DC2>>. Acesso em: 8 nov. 2021.

DE CAMPOS, G. S. **AValiação DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE SANTO ANTÔNIO DA PATRULHA.** [s.l: s.n.].

EPE. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 5 ago. 2021.

Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste-ETENE. 2021.

FONTES DE ENERGIA. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia#BIOMASSA>>. Acesso em: 6 ago. 2021.

FONTOURA, L. P. **Potencial econômico e aplicações da casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul.** [s.l: s.n.].

GALANTE, R. M. **Análise termodinâmica de uma planta termoelétrica a biomassa assistida por energia solar.** Florianópolis: [s.n.].

GALANTE, R. M. **Análise e Otimização Termoeconômica de Sistemas de Geração de Energia por Incineração de Resíduos com Filtro Biológico de Emissões.** [s.l: s.n.].

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. B. T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** [s.l.] John Wiley & Sons, 2007.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. DO. **Geração termoelétrica: planejamento, projeto e operação.** [s.l.] Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MAYER, F. D. **MICRO CENTRAL TERMOELÉTRICA-AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ECONÔMICOS E AMBIENTAIS PARA O SETOR ARROZEIRO DO RIO GRANDE DO SUL** Dissertação de Mestrado. [s.l: s.n.].

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica Para Engenharia**. 7a ed. ed. [s.l.] LTC Editora, 2013.

OLIVEIRA FILHO, R. D. R. **ANÁLISE EXERGOECONÔMICA DE UM SISTEMA TERMO-ELÉTRICO DE GERAÇÃO DE ENERGIA**. 2020.

Revista Globo Rural. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Arroz/noticia/2014/12/brasil-deve-produzir-12-milhoes-de-toneladas-de-arroz-em-20142015.html>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

SANTOS, R. D. D. DOS. **O Uso da Biomassa da Cana-De-Açúcar para Cogeração e Produção de Energia Elétrica: Análise Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica – Estudo de Caso**. [s.l: s.n.].

SIDDIQUE, R.; CACHIM, P. Waste and supplementary cementitious materials in concrete: Characterisation, properties and applications. **Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete: Characterisation, Properties and Applications**, p. 1–621, 1 jan. 2018.

SIGA, 2021, da ANEEL. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoibjI6OGYyYjYtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

USDA. Disponível em: <<https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/5q47rn72z?locale=en#release-items>>. Acesso em: 4 ago. 2021.

WALTER, J. P.; ROSSATO, M. V. **DESTINO DO RESÍDUO CASCA DE ARROZ NA MICRORREGIÃO DE RESTINGA SECA-RS: UM ENFOQUE À RESPONSABILIDADE SÓCIO AMBIENTAL**. 2010.