UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA

JEAN CARLOS KULKAMP

VITOR OLIVIER

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ COMO BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

Tubarão

2020

JEAN CARLOS KULKAMP
VITOR OLIVIER

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ COMO BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.

Tubarão

2020

JEAN CARLOS KULKAMP
VITOR OLIVIER

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ COMO BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 08 de Dezembro de 2020.

Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Bruno William Wisintainer, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Guilherme Locatelli, Me. Eng.
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedicamos primeiramente a Deus que ilumina todos os nossos passos, aos nossos pais, que sempre acreditaram em nossos potenciais de crescimento, e a todos os envolvidos que apoiaram esse grande sonho.

AGRADECIMENTOS

Nossos primordiais agradecimentos são para Deus, que sempre nos torna seres melhores. Aos nossos pais, por sempre nos apoiarem, nos momentos bons e ruins, de sofrimento e alegria, mas que no final a alegria se torna um sentimento majoritário, sem eles nada disso seria possível. Agradecemos aos colegas de curso, que dentre as diversas opiniões diferentes, nunca deixaram de nos apoiar sobre a tão desejada graduação em Engenharia Elétrica. Agradecemos aos professores pelos ensinamentos a nós concebidos. Agradecemos ao coordenador do curso de Engenharia Elétrica Francisco Duarte de Oliveira por sempre batalhar e trazer os melhores recursos para o curso. Agradecemos ao professor Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, por aceitar nos orientar e ajudar em todos os momentos desse projeto.

“Cada sonho que você deixa para trás, é um pedaço do seu futuro que deixa de existir. ” (STEVE JOBS).

RESUMO

A biomassa é uma fonte crescente de energia ao redor do mundo. Pode ser produzida a partir de muitos tipos de matéria orgânica e o produto pode ser usado para fornecer uma alternativa mais limpa às fontes tradicionais de energia elétrica. O presente estudo tem como objetivo conhecer e apresentar o potencial energético da casca de arroz como alternativa na geração de energia elétrica na região Amurel no estado de Santa Catarina, sendo que essa região possui uma área de grande representatividade no cenário estadual, com cerca de 11,92% do plantio total de Santa Catarina.

Uma das principais vantagens da biomassa é que ela é considerada uma fonte renovável com possibilidade de controle de despacho da energia elétrica, ou seja, a produção de energia pode acontecer de acordo com a necessidade do sistema ou do interesse econômico do empreendedor.

A produção de energia elétrica através da biomassa produz uma quantidade menor de carbono quando comparado aos combustíveis fósseis. Os níveis de gás metano, encontrado nos combustíveis fósseis possuem um poder 20 vezes maior que o dióxido de carbono para o efeito estufa. Podendo ser reduzidos através do uso da biomassa, uma vez que esses gases são produzidos por matéria orgânica se deixados em decomposição (HAYLEY, 2018).

A região Amurel de Santa Catarina é rica na produção de arroz, sendo a casca de arroz um ótimo aliado para a geração de energia elétrica. No início de 2019, foi iniciada uma colheita de arroz no estado de Santa Catarina, havendo uma safra de 1,1 milhões de toneladas em 143 mil hectares plantados, quase que equivalentes em tamanho aos municípios, Armazém, Braço do Norte, Capivari de Baixo, Grão Pará, Gravatal, Imbituba e Rio Fortuna, sendo todos esses municípios pertencentes a região Amurel (ENGEPLUS, 2019).

Com base nesses dados, esta pesquisa mostra as etapas do dimensionamento de um ciclo de potência a vapor, utilizando a quantidade de casca de arroz que a região Amurel produz e seu potencial energético, demonstrando a capacidade de geração de energia elétrica e analisando a quantidade de residências que podem ser abastecidas por essa energia.

Palavras-chave: Amurel. Biomassa. Casca de arroz. Energia elétrica. Potencial energético.

ABSTRACT

Biomass is a growing source of energy around the world. It can be produced from many types of organic metter and the product can be used to provide a cleaner alternative to traditional sources of electricity. The present study aims to know and present the energy potential of rice husk as an alternative for electricity generation in the Amurel region in the state of Santa Catarina, by also having an area of great representativeness in the scenario state with an amount of 11,92% of the total planting in Santa Catarina.

One of the main advantages of biomass is that it is seen as a renewable source with the possibility of controlling electricity dispatch, that is energy production can happen according to the needs of the system or the economic interest of the entrepreneur.

The production of electric energy through biomass produces a smaller amount of carbon when compared to fossil fuels. The levels of methane gas found in fossil fuels have a power 20 times greater than carbon dioxide for the greenhouse effect. They can be reduced through the use of biomass, since these gases are produced by organic matter if left to decompose (HAYLEY, 2018).

The Amurel region of Santa Catarina is rich in rice production, the rice husk being a great ally for the generation of electricity. In early 2019, a rice harvest began in the state of Santa Catarina, with a crop of 1.1 million tons in 143 thousand hectares planted, almost equivalent in size to the municipalities, Armazém, Braço do Norte, Capivari de Baixo , Grão Pará, Gravatal, Imbituba and Rio Fortuna, all of which belong to the Amurel region (ENGEPLUS, 2019).

Based on these data this research will show the steps of the sizing of a steam power cycle, using the amount of rice husk that the Amurel region produces and its energy potential, will demonstrate the ability to generate electricity and will analyze the amount of homes that can be supplied by this energy.

Keywords: Amurel. Biomass. Electricity. Energy potential. Rice husk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética brasileira: energia renovável e não-renovável. 16
Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2018 (BEN, 2019)..... 17
Figura 3 - Potência de biomassa instalada no Brasil (MW) (baseado em Aneel, 2016). 18
Figura 4 - Disponibilidade de resíduos nas diferentes regiões do Brasil em 2014..... 20
Figura 5 - Áreas atendidas e não atendidas pela CELESC em Santa Catarina em 2019..... 26
Figura 6 - Mapa da região Amurel de Santa Catarina 27
Figura 7 - Matriz elétrica brasileira – potência instalada em operação (03/2019). 29
Figura 8 - Ciclo energético resumido de geração de energia elétrica por combustão. 30
Figura 9 - Processo de conversão de energia da casca do arroz 31
Figura 10 - Versão simplificada do ciclo de Rankine 32
Figura 11- Microrregiões que cultivam arroz em Santa Catarina 34
Figura 12 - Microrregião de Tubarão 35
Figura 13 - Dados sobre o plantio de arroz no município de Garopaba (2020) 35
Figura 14 - Casca de arroz..... 37
Figura 15 - Turbina de condensação WXC 5000 39
Figura 16 - Esquema para cálculo térmico utilizando o ciclo de Rankine 40
Figura 17 - Orçamento parcial de uma usina de 4 MW (WÓRTICE)..... 49
Figura 18 - Localização para a construção da usina..... 51
Figura 19 - Localização da subestação da CERGAL 51
Figura 20 - Linha de transmissão próxima ao local escolhido para implantação da usina..... 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Geração de energia elétrica das principais fontes do Brasil 25
Tabela 2 - Quantidade de residências atendidas por consumo em kWh 47
Tabela 3 - Retorno de investimento..... 50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMUREL – Associação de Municípios da Região de Laguna

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APG – Área plantada em Garopaba

APMT – Área plantada na microrregião de Tubarão

APRA – Área plantada na região Amurel

BEM – Balanço Energético Nacional

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

CELESC – Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

CEPA – Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola

CERGAL – Cooperativa de Eletrificação Anita Garibaldi

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FEMP – Programa Federal de Gestão de Energia

IBP – Instituto Brasileiro de Pellets, Biomassa e Briquete

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCI – Poder Calorífico Inferior

PG – Produção em Garopaba

PMT – Produção microrregião de Tubarão

PRA – Produção na região Amurel

SGCIE – Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia

GJ – Gigajoule

GW – Gigawatt

GWh – Gigawatt-hora

h – Entalpia

ha – Hectares

hg – Entalpia no estado gasoso

hl – Entalpia no estado líquido

kcal – Quilocalorias

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

kPa – Quilopascal

kV – Quilovolt

kW – Quilowatt

kWh – Quilowatt-hora

km^2 – Quilômetros quadrados

M – Vazão mássica

MJ – Megajoule

MPa – Megapascal

MW – Megawatts

m^2 – Metros quadrados

m^3 – Metros cúbicos

rpm – Rotação por minuto

s – Entropia

sl – Entropia no estado líquido

sg – Entropia no estado gasoso

t – Toneladas

TWh – Terawatt-hora

V – Volume específico

SUMÁRIO

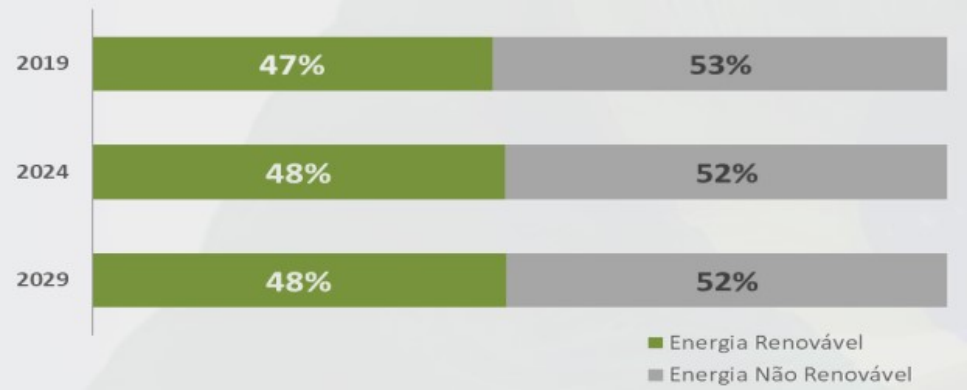
1 INTRODUÇÃO.....16
1.1 JUSTIFICATIVA 18
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA 19
1.3 OBJETIVOS 20
1.3.1 Objetivo Geral 20
1.3.2 Objetivos Específicos.....20
1.4 DELIMITAÇÕES 21
1.5 METODOLOGIA 21
1.5.1 MÉTODO.....21
1.5.1.1 TIPO DE PESQUISA.....22
1.5.1.2 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA ANÁLISE E COLETA DE DADOS 22
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO 22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 24
2.1 ENERGIA ELÉTRICA.....24
2.1.1 Energia elétrica no Brasil 24
2.1.1.1 Geração de energia elétrica no Brasil 25
2.1.2 Energia elétrica em Santa Catarina 25
2.2 REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA 26
2.3 ENERGIA RENOVÁVEL.....27
2.3.1 Biomassa.....28
2.3.1.1 Energia elétrica através da biomassa no Brasil 29
2.3.1.2 Processo de geração de energia elétrica através da biomassa 29
2.3.1.2.1 Processo de geração de energia elétrica através da casca do arroz.....31
2.3.1.2.2 Ciclo de Rankine.....32
3 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....34
3.1 PRODUÇÃO DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA.....34
3.2 QUANTIDADE DE CASCA DE ARROZ OBTIDA ATRAVÉZ DO DESCASQUE ..36
4 POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA 38
4.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO PARA UMA USINA TERMELÉTRICA UTILIZANDO O CICLO DE RANKINE 39

4.1.1 Cálculos para o ciclo térmico 39
4.2 QUANTIDADE DE RESIDÊNCIAS DE BAIXO PADRÃO QUE PODEM SER ATENDIDAS PELA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA CASCA DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL 47
4.2.1 Quantidade de residências atendidas no município de Tubarão 48
4.3 ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA 48
***4.3.1 Payback* 49**
4.3.2 Local para implantação da usina termelétrica 50
5 CONCLUSÃO 53
REFERÊNCIAS 55
ANEXOS 62
ANEXO A – PROPRIEDADES DA ÁGUA SATURADA (LÍQUIDO E VAPOR), ENTRADA DE PRESSÕES 63
ANEXO B – PROPRIEDADES DO VAPOR SOBREAQUECIDO 64

1 INTRODUÇÃO

A necessidade para novos meios de geração de energia elétrica no mundo se torna notável. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) o consumo médio de energia elétrica no Brasil irá crescer cerca de 2,5% ao ano até 2029, sendo que as energias renováveis mostram um crescimento médio anual de 2,9%. Com esse avanço das gerações de energia elétrica por meio de fontes alternativas, em 2029 a matriz energética brasileira irá ter 48% de participação de fontes renováveis para geração de energia elétrica.

Figura 1 - Matriz energética brasileira: energia renovável e não-renovável.

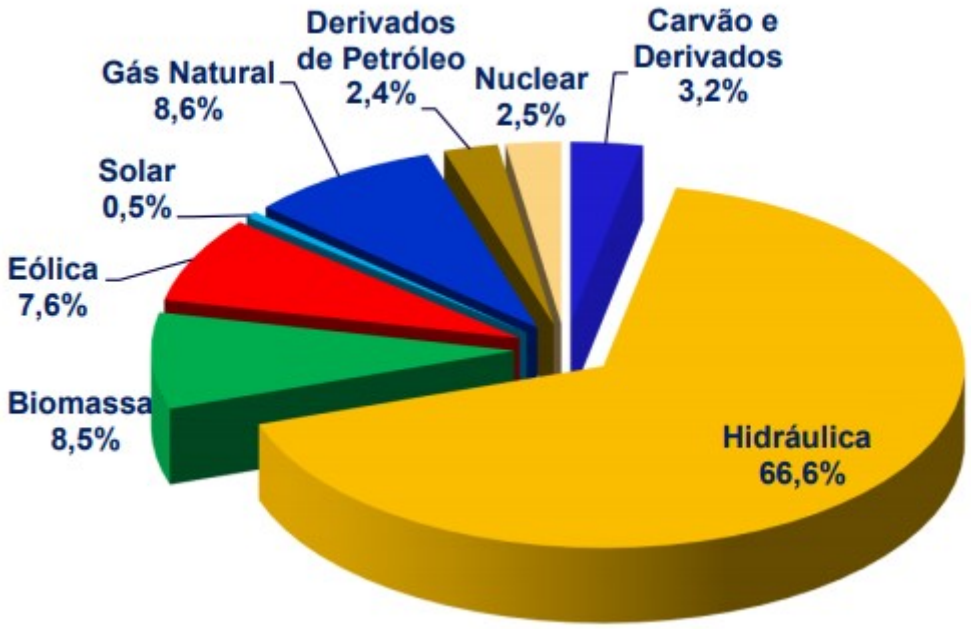


Fonte: mme.gov.br (2020, online).

Ainda sobre o crescimento das fontes de energias renováveis no Brasil, a biomassa tem um lugar de destaque nesse cenário. Sendo biomassa toda a matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, utilizada na produção de energia. Ela é obtida através da decomposição de uma variedade de recursos renováveis, como plantas, madeira, resíduos agrícolas, restos de alimentos, excrementos e até do lixo (LANA, 2019).

Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2019), o Brasil teve um acréscimo de 2,8% de energias renováveis na matriz energética nacional comparando os anos de 2017 e 2018.

Figura 2 - Oferta interna de energia elétrica no Brasil em 2018 (BEN, 2019).



Fonte: epe.gov.br (2020, online).

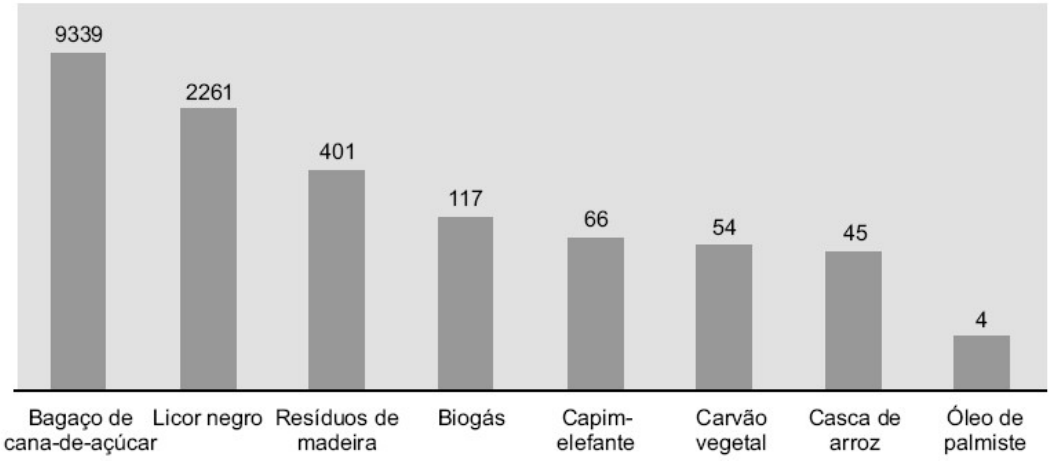
Historicamente, o uso da biomassa para fins energéticos é tão antigo quanto a própria civilização. Até o século XVIII, os povos usavam a lenha como principal fonte de energia. Logo, nos séculos XIX e XX com a progressiva inserção dos combustíveis fósseis, a biomassa foi afastada a um plano secundário na matriz energética global, caindo no rol das fontes de geração de energia alternativas (GALDINO et al., 2000).

Apesar de pouca emissão de gases poluentes, essa fonte de energia possui algumas desvantagens, podendo acarretar sérios problemas ao meio ambiente.

> Apesar de suas vantagens, a produção de biomassa pode comprometer a conservação das florestas e originar novas áreas desmatadas. Existe ainda a dificuldade logística de armazenar os seus resíduos sólidos (LANA, 2019).

Hoje no cenário nacional, o bagaço de cana é a biomassa mais utilizada. Porém outros resíduos têm importância nesse aumento de oferta de biomassa no Brasil, tais como licor negro (lixívia), resíduos de madeira, biogás, capim-elefante, carvão vegetal, casca de arroz e óleo de palmiste.

Figura 3 - Potência de biomassa instalada no Brasil (MW) (baseado em Aneel, 2016).



Fonte: GARCILASSO et al., 2017, p. 238.

O arroz tem uma vasta área de plantações, principalmente na região sul do país. Segundo a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) os 31 municípios localizados ao redor de Araranguá, Criciúma e Tubarão são responsáveis por 65% do total de área cultivada com arroz irrigado em Santa Catarina, contando com 2.535 famílias que cultivam arroz, sendo essas mais da metade do total de produtores de arroz irrigado do Estado, tendo um montante de 5.030. Ao redor de Araranguá, Criciúma e Tubarão, concentram-se 48 das 66 empresas beneficiadoras de arroz de Santa Catarina.

A casca do arroz é um dos principais resíduos de biomassa produzidos em Santa Catarina, sendo que essa matéria-prima possui um grande potencial energético. A geração de energia elétrica a partir da casca do arroz pode ser vantajosa para muitos por ser um resíduo produzido em grande quantidade, sendo a queima dessa matéria-prima extremamente proveitosa para o meio ambiente, diminuindo assim o descarte dele em locais impróprios (WOHLENBERG et al., 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

A energia elétrica é uma necessidade na sociedade moderna, sendo que dela derivam as principais atividades existentes no mundo, desde um simples toque para acender uma lâmpada até o funcionamento de indústrias que produzem bens essenciais para o cotidiano.

O aumento no consumo de energia se dá devido ao avanço tecnológico, sendo que são diretamente proporcionais. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2019) em

2018 a oferta de energia elétrica foi de 636,4 TWh. Verificou-se um aumento de 10,7 TWh (1,7%) na oferta de energia elétrica no mercado brasileiro em relação ao ano anterior.

Entretanto, há necessidade de implantar fontes de energia que sejam menos impactantes ao meio ambiente, para que tanto a sociedade quanto as gerações futuras possam ter acesso ao meio ambiente equilibrado, garantindo a preservação do ecossistema.

A biomassa é uma fonte de energia limpa, quando utilizada corretamente, ou seja, havendo um uso correto da matéria-prima, possui uma baixa taxa de emissão de poluentes, podendo assim afirmar que essa fonte de energia é uma fonte alternativa, sendo esse um dos grandes desafios no meio sustentável.

A alternativa da biomassa possui relevância para gerações atuais e futuras, sendo que ela ocupa uma porcentagem considerável no cenário nacional, aproximadamente 13.549 MW, ou 8,3% de potência instalada segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2020).

Desse modo, este trabalho mostra a análise do potencial de geração de energia elétrica na região Amurel do Estado de Santa Catarina, utilizando a casca de arroz como biomassa.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente, o mercado de energia elétrica está muito aquecido, tendo diferentes formas de geração de energia elétrica. Visando isso, a sociedade moderna é dependente de energia elétrica, pois a tecnologia vem avançando em várias áreas, trazendo comodidades e facilidades para todos. A implantação de novos meios de geração de energia elétrica está se tornando uma alternativa para um mundo mais sustentável, não é de hoje que essas fontes renováveis estão tendo um lugar de destaque na matriz energética mundial, tais como biomassa, eólica, solar etc.

A biomassa é considerada uma fonte de energia renovável porque o suprimento não acaba, ou seja, ela é desenvolvida a partir de materiais orgânicos para também gerar eletricidade ou outras formas de energia. Ao contrário dos combustíveis fósseis que levam milhões de anos para se formar, a biomassa cresce rapidamente através da fotossíntese, dejetos de animais, resíduos sólidos, entre outros. O processo de geração de energia por biomassa no Brasil existe em todos os estados, conforme mostrado na figura 4.

Figura 4 - Disponibilidade de resíduos nas diferentes regiões do Brasil em 2014.

Fonte: biomassabr.com (2020, online).

Hoje, as hidrelétricas e os combustíveis fósseis dominam o cenário de geração de energia elétrica, porém a demanda de energia tende a crescer ainda mais, havendo a necessidade de que as fontes alternativas tenham uma demanda ainda maior. A problemática da pesquisa nesse contexto é estudar o potencial da casca do arroz para geração de energia elétrica, tornando-a uma alternativa usual como biomassa na região Amurel no estado de Santa Catarina.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar técnica e economicamente o potencial energético da casca de arroz como biomassa para geração de energia elétrica na Região Amurel do estado de Santa Catarina.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analisar o processo produtivo do descasque até a obtenção da casca de arroz;

- Estimar a quantidade de resíduo que é acumulada neste processo;
- Levantar dados energéticos sobre o resíduo acumulado;
- Avaliar o potencial energético da casca do arroz como biomassa e estimar a quantidade de energia elétrica gerada através da queima de casca de arroz em usinas de pequeno porte para a região Amurel de Santa Catarina.

1.4 DELIMITAÇÕES

O tema desenvolvido nessa pesquisa aborda a análise do potencial de geração de energia elétrica na região Amurel no Estado de Santa Catarina, utilizando a casca de arroz como biomassa, abordando principalmente as vantagens desse tipo de geração de energia elétrica, a importância do descarte correto desse resíduo e a utilização do mesmo como fonte de energia renovável para uma melhor preservação ambiental.

1.5 METODOLOGIA

Foi apresentada a seguir a metodologia utilizada na pesquisa visando chegar aos objetivos propostos. A pesquisa, segundo Gil (2002, p. 19) "é um procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos".

Para Leonel e Motta (2007, p. 98) a pesquisa "é um processo de investigação que se interessa em descobrir as relações existentes entre os aspectos que envolvem os fatos, fenômenos, situações ou coisas".

1.5.1 MÉTODO

Os métodos de procedimentos utilizados na pesquisa foram o método dedutivo, fundamenta-se segundo Leonel e Motta (2007, p. 66) "parte de uma proposição universal ou geral para atingir uma conclusão específica ou particular". O método pressupõe a existência de verdades gerais já afirmadas e que sirvam de alicerce para a elaboração de novos conhecimentos.

Neste trabalho, foram analisados os dados a respeito da casca de arroz e seu potencial energético como biomassa para geração de energia elétrica na Região Amurel no estado de Santa Catarina.

1.5.1.1 TIPO DE PESQUISA

Quanto ao nível de profundidade, foi utilizada a pesquisa exploratória, para Leonel e Motta (2007, p. 100), "o objetivo da pesquisa exploratória é proporcionar maior familiaridade com o objeto de estudo", uma vez que procura aprimorar ideias, buscando maiores informações sobre a temática em foco.

Sendo que o método de pesquisa escolhido foi o estudo de caso, por permitir a investigação empírica do tema, relacionando as práticas do descasque de arroz com as recomendações da literatura e com a legislação.

1.5.1.2 INSTRUMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS NA ANÁLISE E COLETA DE DADOS

Esta pesquisa bibliográfica teve como caminho alguns instrumentos de importante utilidade para o desenvolvimento da coleta de dados, tais como, leitura de livros, teses, dissertações, artigos científicos, realizada em fontes primárias de autores nacionais e também em meios eletrônicos, da área de Engenharia Elétrica.

Deve-se destacar que a pesquisa bibliográfica para Leonel e Motta (2007, p. 112) "é aquela que se desenvolve tentando explicar um problema a partir das teorias publicadas em diversos tipos de fontes: livros, manuais, enciclopédias, anais, meios eletrônicos etc.".

São muitas as formas de desenvolvimento da pesquisa bibliográfica. Gil (2002, p. 59) afirma que "qualquer tentativa de apresentar um modelo para o desenvolvimento de uma pesquisa bibliográfica deverá ser entendida como arbitrária. Tanto é que os modelos apresentados pelos diversos autores diferem significativamente entre si".

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos. Iniciado o primeiro capítulo, denominado introdução, apresenta-se o projeto de pesquisa que contém a contextualização e problemática, nele também se encontram os objetivos gerais e específicos e a metodologia utilizada na pesquisa.

O segundo capítulo, denominado revisão bibliográfica, apresenta uma breve contextualização sobre energia elétrica, iniciando a abordagem do tema no Brasil e aprofundando-se no estado de Santa Catarina. Há uma contextualização da região Amurel e

em seguida inicia-se uma revisão sobre energia renovável, biomassa, processo de geração de energia elétrica através da casca do arroz e finalizando com o ciclo termodinâmico de Rankine.

No terceiro capítulo, denominado levantamento e análise de dados, mostra a coleta de dados sobre a produção de arroz na região Amurel e quanto do resíduo, casca de arroz, será proveitoso para produção de energia elétrica como biomassa.

O quarto capítulo, denominado potencial energético da casca do arroz na região Amurel de Santa Catarina, aborda o cálculo através do ciclo de Rankine utilizando a quantidade de casca de arroz levantada no capítulo anterior, demonstrando o abastecimento dessa energia gerada em quantidades de residências e o tempo do retorno financeiro com a implantação de uma usina termelétrica (*payback*).

O quinto e último capítulo, denominado conclusão, aborda o resultado da pesquisa servindo como base para pesquisas futuras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENERGIA ELÉTRICA

A eletricidade é definida basicamente como o fluxo de carga elétrica. No século XVII, houve o primeiro contato com a energia elétrica. Otto Von Guericke iniciou estudos sobre a eletrificação por atrito, sendo que em 1672, ele inventa uma máquina geradora de cargas elétricas onde uma esfera de enxofre gira constantemente atritando-se em terra seca. Meio século depois, Stephen Gray faz a primeira distinção entre condutores e isolantes elétricos (REIS, 2016).

Como o próprio título da seção já menciona, eletricidade é uma forma de energia, sendo essa um fluxo livre de elétrons. A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizada que existe. É um recurso vital em qualquer parte do mundo, podendo ser facilmente transportada com segurança e eficiência por longas distâncias. A eletricidade está por todos os lados, alimentando diversos tipos de tecnologias. É difícil escapar disso, mesmo tentando escapar da eletricidade, ela ainda está presente na natureza, exemplo disso são os raios em uma tempestade, sendo esse um fenômeno natural.

2.1.1 Energia elétrica no Brasil

Historicamente, o governo teve seu interesse voltado à energia elétrica no ano de 1879, quando D. Pedro II concedeu a liberdade a Thomas Alva Edison para implantar no Brasil aparelhos e processos de sua invenção, diretamente ligados a utilização da eletricidade na iluminação pública (JANNUZZI, 2007).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que denomina as regras para que toda a rede de fornecimento de energia funcione, foi criada em 1997, para proporcionar o melhor desenvolvimento do mercado de energia elétrica, havendo equilíbrio entre o setor elétrico brasileiro e em benefício da sociedade. Esse órgão possui importância no mercado de energia elétrica brasileiro, pois exerce várias funções em benefício ao país. Dentre as principais funções estão, fiscalizar os setores públicos e privados de fornecimento de energia elétrica, licitar e assinar contratos para concessão do serviço público de energia, regulamentar os direitos e deveres do consumidor e das empresas no fornecimento de energia, definir valores de tarifas de contas de energia (ANEEL, 2016).

No Brasil, a tensão não é padronizada, em algumas regiões pode ser usada como 110/127 Volts e em outras como 220/240 Volts. Segundo Fescina (2015) pelo fato da rede elétrica ter sido implementada por empresas diferentes e sem um padrão comum de instalação, existe mais de um tipo de tensão no Brasil. Essa instalação foi feita no início do século 20, as companhias contratadas para o serviço eram estrangeiras e não tinham um modelo a seguir, sendo assim as tensões foram determinadas por dois fatores, o local de origem da empresa e uma análise de custo que levava em conta a quantidade de pessoas e o dinheiro que seria gasto no material e na instalação.

2.1.1.1 Geração de energia elétrica no Brasil

As fontes de energia elétrica no Brasil foram evoluindo e aumentando sua oferta ao longo dos anos. A geração de energia elétrica nacional vem crescendo consideravelmente todos os anos, juntamente com a demanda interna do país.

Tabela 1- Geração de energia elétrica das principais fontes do Brasil

FONTE	2018 (GWh)	2019 (GWh)	CRESCIMENTO DE 2019 EM RELAÇÃO A 2018
Hidrelétrica	388.971	397.877	2.3%
Gás Natural	54.622	60.448	10,7%
Eólica	48.475	55.986	15,5%
Biomassa	52.267	52.543	0,5%
Nuclear	15.674	16.129	2,9%
Carvão Vapor	14.204	15.327	7,9%
Derivados do Petróleo	9.293	6.926	-25,5%
Fotovoltaica	3.461	6.655	92,2%

Fonte: epe.gov.br- Adaptado de EPE/Ministério de Minas e Energia (2020, online).

Segundo a ANEEL, o Brasil fechou o ano de 2019 com 7,2 GW de capacidade instalada, ultrapassando a meta nacional de 5,7 GW. Isso significa que o país fechou o ano com potência instalada de 170 GW, sendo mais de 75% a partir de fontes renováveis.

2.1.2 Energia elétrica em Santa Catarina

O aumento no número de habitantes está crescendo cada vez mais, sendo assim, a demanda por energia elétrica aumenta proporcionalmente. Em Santa Catarina, a maior empresa de distribuição e comercialização de energia elétrica é a CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.). De acordo com a CELESC (2019) a concessionária leva energia para mais de 3,0 milhões de unidades consumidoras localizadas em 286 municípios catarinenses

(92% do território do estado) e em Rio Negro, no Paraná. A empresa é responsável pelo suprimento de energia elétrica em Santa Catarina, para o atendimento de quatro concessionárias e 16 permissionárias, que são aquelas contratadas para execução de obras de transmissão ou distribuição de energia elétrica apenas para o consumo privativo.

Figura 5 - Áreas atendidas e não atendidas pela CELESC em Santa Catarina em 2019.

Fonte: celesc.com.br (2020, online).

Em Santa Catarina, as áreas atendidas possuem consumidores do mercado livre, que compram energia diretamente dos geradores ou comercializadores, e do mercado cativo, que compram energia das concessionárias de distribuição onde os mesmos estão ligados. Segundo a CELESC (2019) os municípios atendidos pela concessionária no estado de Santa Catarina tiveram um consumo acima de 25.000 GWh no ano de 2019, somando os consumidores do mercado livre e do cativo, 4,3% a mais que o ano de 2018.

Os municípios que não são atendidos pela CELESC, fazem parte da cobertura de cooperativas de energia elétrica.

2.2 REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

A Associação de Municípios da Região de Laguna (Amurel) está localizada no Sul de Santa Catarina. Os municípios que fazem parte da Amurel são Armazém, Braço do Norte, Capivari de Baixo, Grão Pará, Gravatal, Imaruí, Imbituba, Jaguaruna, Laguna, Orleans, Pedras Grandes, Pescaria Brava, Rio Fortuna, Sangão, Santa Rosa de Lima, São Ludgero, São Martinho, Treze de Maio e Tubarão.

Figura 6 - Mapa da região Amurel de Santa Catarina

Fonte: fepese.org.br (2020, online).

Atualmente a região Amurel conta com uma área de 4.137,74 km², sendo Imaruí a maior cidade dessa região. A região conta com uma população de quase 370 mil habitantes, totalizando mais de 5% da população de Santa Catarina. Tubarão é o município mais populoso nessa região, contando com mais de 105 mil habitantes e Santa Rosa de Lima o menos populoso, com mais de 2 mil habitantes.

2.3 ENERGIA RENOVÁVEL

Da mesma maneira que a sustentabilidade, as energias renováveis se tornam cada vez mais demandadas no mundo. Segundo Suçuarana (2015) energia renovável é aquela obtida a partir de fontes naturais capazes de serem renovadas, por isso estão sempre disponíveis para utilização e não se esgotam. Este conceito se opõe ao da energia não renovável, gerada por combustíveis fósseis, os quais existem na natureza em quantidades limitadas, como o petróleo, gás natural e carvão mineral.

Destacam-se entre as energias renováveis a energia solar, proveniente da luz do sol e utilizada como energia térmica ou elétrica, e a energia eólica. A energia hidrelétrica e a

energia obtida a partir da lenha são exemplos de energias renováveis, já que utilizam recursos que são naturalmente reabastecidos, mas isso não significa que estas fontes de energia sejam limpas.

As energias renováveis estão crescendo, mudando o seu patamar no cenário mundial. As energias renováveis estão substituindo cada vez mais os combustíveis fósseis no setor de energia, oferecendo menores emissões de gases. As fontes de energia denominadas como renováveis não são benéficas para o meio ambiente. Apesar desse tipo de energia parecer um meio perfeito para a solução dos problemas relacionados ao meio ambiente e a geração de energia, a biomassa, por exemplo, pode gerar grandes impactos para o meio ambiente, mudanças climáticas e outras questões caso tenha uma finalidade incorreta de seus resíduos.

2.3.1 Biomassa

A biomassa é muitas vezes descrita de maneira equivocada como um combustível limpo e renovável, sendo uma alternativa mais correta que o carvão e outros combustíveis fósseis na produção de eletricidade. Segundo Shin (2018) a ciência recente mostra que muitas formas de biomassa, especialmente de florestas produzem maiores emissões de carbono do que os combustíveis fósseis, tendo também consequências negativas para a biodiversidade.

A biomassa é utilizada desde os tempos da caverna, com fogueiras para se aquecer do frio ou para preparar alimentos. Esse combustível é proveniente de materiais orgânicos, uma fonte de energia renovável e sustentável usada para criar eletricidade ou outras formas de energia que pode ser energia utilizável por meios diretos e indiretos. Segundo Escobar et al. (2017, p. 236) a bioenergia corresponde à energia derivada da biomassa. O termo biomassa inclui toda matéria de origem vegetal existente na natureza ou gerada pelo homem e/ou animais, resíduos urbanos, rurais (agrícolas e de pecuária), agroindustriais, óleos vegetais, bem como combustíveis produzidos a partir de culturas agrícolas ou resíduos. A biomassa pode ser queimada para criar calor ou eletricidade, sendo considerada um meio direto, ou processada em biocombustível, sendo esse um meio indireto.

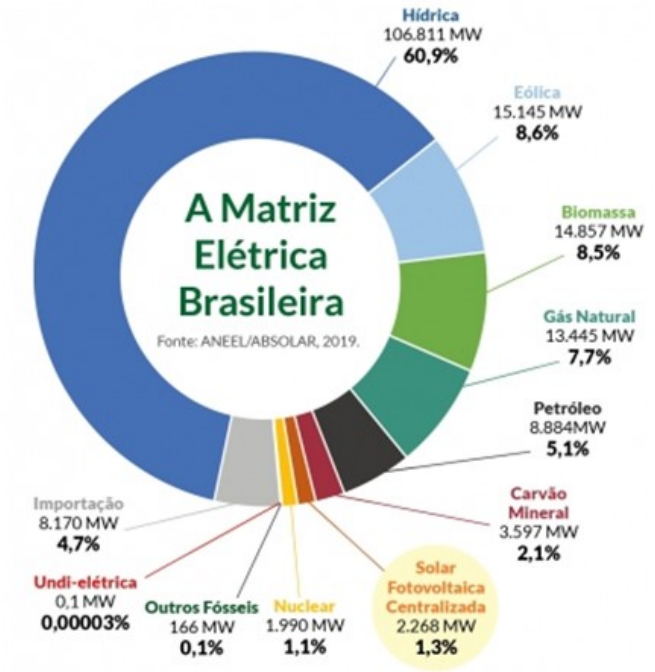
Apesar de o mundo estar visando fontes alternativas de energia como prioridade, ainda falta um passo grande até esse ponto se transformar em algo considerável. A biomassa tomou seu lugar na matriz energética mundial, porém é preciso que isso se torne algo realmente maior no cenário mundial. As energias renováveis apresentam inúmeras vantagens ambientais, sociais, econômicas e estratégicas, incluindo a geração de empregos.

2.3.1.1 Energia elétrica através da biomassa no Brasil

Atualmente, o Brasil possui a maioria da sua fonte energética proveniente de energias renováveis. Segundo o secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia do atual governo, Reive Barros (2020) o Brasil tem 83% de sua matriz elétrica originada de fontes renováveis. A participação é liderada pelas hidrelétricas com 63,8%, seguida da eólica com 9,3%, biomassa e biogás com 8,9% e solar com 1,4%.

A matriz energética brasileira possui diversificadas fontes de energia elétrica, conforme mostra a figura 6. Segundo Tolmasquim (2012) um dos fundamentos da sustentabilidade econômica de um país é a sua capacidade de prover logística e energia para o desenvolvimento de sua produção, com segurança e em condições competitivas e ambientalmente sustentáveis.

Figura 7 - Matriz elétrica brasileira – potência instalada em operação (03/2019).



Fonte: Absolar – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (2020, online)

2.3.1.2 Processo de geração de energia elétrica através da biomassa

O termo biomassa abrange uma grande variedade de materiais, incluindo madeira de várias fontes, resíduos agrícolas e animais.

A biomassa pode ser convertida em energia elétrica através de vários métodos. O mais comum é a combustão direta de material de biomassa, como resíduos agrícolas ou derivados da madeira.

A geração de energia elétrica através da biomassa é feita através da combustão destes resíduos, porém essa queima produz emissões que devem ser cuidadosamente monitoradas e controladas para preservação do meio ambiente.

Segundo o Programa Federal de Gestão de Energia (FEMP), um sistema simples de geração elétrica através da biomassa é composto por alguns pontos importantes, sendo que para um ciclo a vapor são necessários equipamentos de armazenamento e manuseio do resíduo, forno, caldeira, bombas, turbina a vapor, gerador, condensador, torre de resfriamento, controle de emissões e sistemas automatizados.

Figura 8 - Ciclo energético resumido de geração de energia elétrica por combustão.

Fonte: senado.leg.br (2020, online)

Em um sistema de combustão direta, o resíduo da biomassa é o combustível da caldeira, produzindo vapor para operar uma turbina e um gerador, transformando energia mecânica em energia elétrica. Segundo Strobel (2008) as máquinas térmicas a vapor utilizam a energia fornecida por um combustível pelo processo de combustão para um fluido de trabalho, como a água, para gerar vapor e converter a alta energia deste fluido em trabalho mecânico e/ou em calor para processos secundários de aquecimento.

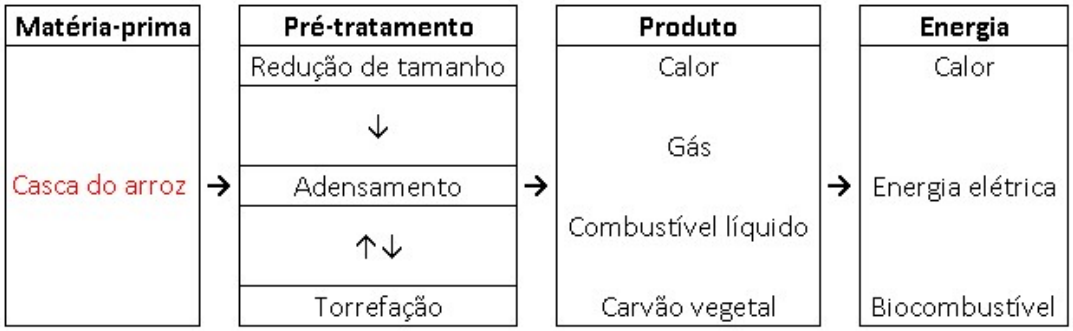
A geração de energia elétrica por combustão utiliza o ciclo de Rankine. Esse ciclo utiliza a queima de resíduos para produzir calor dentro de uma caldeira, convertendo água em vapor, sendo que o mesmo se expande através de uma turbina, produzindo energia mecânica no gerador para depois ser convertido em energia elétrica.

2.3.1.2.1 Processo de geração de energia elétrica através da casca do arroz

Utilizar a casca do arroz para geração de energia pode gerar economia, redução de gases de efeito estufa que afetam diretamente o meio ambiente e sustentabilidade ambiental. Esse resíduo possui uma boa eficiência para geração de energia elétrica. Segundo o Gabbiye et al. (2019, p. 625) a casca de arroz contém cerca de 30 a 50% de carbono orgânico e possui um alto valor energético de 13 a 16 MJ a cada kg. Pode ser usado para gerar combustível, calor ou eletricidade por meio de processos térmicos, químicos ou bioprocessos.

A casca de arroz é coletada após a moagem, possuindo um teor de umidade de aproximadamente 14 a 15%. Isso se ajusta ao requisito para pré-tratamento ou processamento adicional. Processos térmicos incluindo combustão, gaseificação e pirólise, sendo esse último uma reação de decomposição térmica que ocorre por meio da exposição a altas temperaturas, são aplicados no processamento da casca de arroz. Os produtos energéticos da casca de arroz são calor, eletricidade e biocombustível, sendo esse último sólido ou líquido. O calor gerado a partir disso poderia ser usado para aquecimento de caldeiras industriais, secagem e geração de eletricidade (*RICE KNOWLEDGE BANK*, 2019).

Figura 9 - Processo de conversão de energia da casca do arroz



Fonte: GABBIYE et al., 2019, p. 625.

A casca do arroz, quando comparada com carvão ou madeira, sofre algumas desvantagens na hora da queima. Segundo Jenkinset al. (1998) o conteúdo de matéria volátil na casca de arroz é maior que o da madeira e muito maior que o do carvão, enquanto o carbono fixo, que não é eliminado no aquecimento, é muito menor que no carvão. O teor de cinzas na casca de arroz é muito maior do que na madeira e no carvão, o que causa barreiras para a conversão de energia, pois seu alto teor de cinzas, álcalis e potássio causa aglomeração, incrustações e derretimento nos componentes de combustores ou caldeiras.

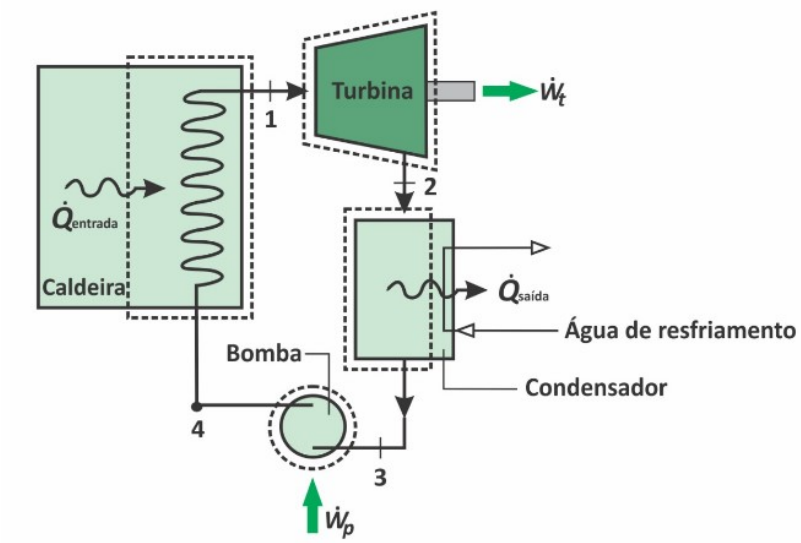
2.3.1.2.2 Ciclo de Rankine

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no ciclo Rankine a geração de potência ocorre com o uso de um fluido de trabalho, que atua com mudança de fase da matéria, sendo comumente a água. A operação deste ciclo ocorre com o bombeamento da água no estado líquido à caldeira de geração de vapor. Na caldeira, o combustível fornece calor ao fluido, gerando vapor superaquecido (alta pressão e alta temperatura). Este vapor é direcionado à turbina a vapor, ocorrendo um processo de conversão da energia térmica em energia eletromecânica.

O ciclo termodinâmico de Rankine é utilizado em diversas usinas e processos de geração de energia elétrica, tais como biomassa, carvão, combustível líquido, entre outros.

Em uma versão simplificada, este ciclo possui quatro estágios, com a caldeira, turbina, condensador e bomba, conforme mostra a figura 10.

Figura 10 - Versão simplificada do ciclo de Rankine



Fonte: MORAN et al., 2006, p. 446.

O ciclo verificado na figura 10 possui taxa de trabalho ($\dot{W}_t$ e $\dot{W}_p$) e fluxo de calor ($\dot{Q}_{entrada}$e $\dot{Q}_{saída}$). Sendo assim, existe um fluxo de calor que é transferido na caldeira para o fluido de trabalho, na turbina a energia térmica do vapor é transformada em trabalho, o fluido é condensado no condensador, e a bomba precisa de uma determinada potência para conseguir pressurizar o fluido.

O fluido de trabalho possui uma quantidade de energia diferente de acordo com sua temperatura e pressão, sendo essa energia chamada de entalpia, ou seja, ocorre uma

transferência ou recebimento de energia em cada estágio, impactando na mudança do valor da entalpia do fluido de trabalho.

Segundo Strobel (2008), apesar do fluido de trabalho poder ser considerado qualquer fluido que consiga alcançar uma situação de vapor superaquecido na saída da caldeira, a água é um fluido com grandes qualidades, visto possuir um alto calor específico, um alto calor latente de vaporização, ampla disponibilidade (baixo custo) e pouca quantidade de resíduos sólidos de evaporação, gerando baixo índice de incrustações na caldeira e nas tubulações. O vapor de água é um dos meios mais importantes de transporte de energia e o mais utilizado em indústrias e unidades de geração de eletricidade.

3 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

3.1 PRODUÇÃO DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

A região Amurel de Santa Catarina se destaca na produção de arroz, onde a mesma possui uma cultura muito forte no cultivo desse cereal.

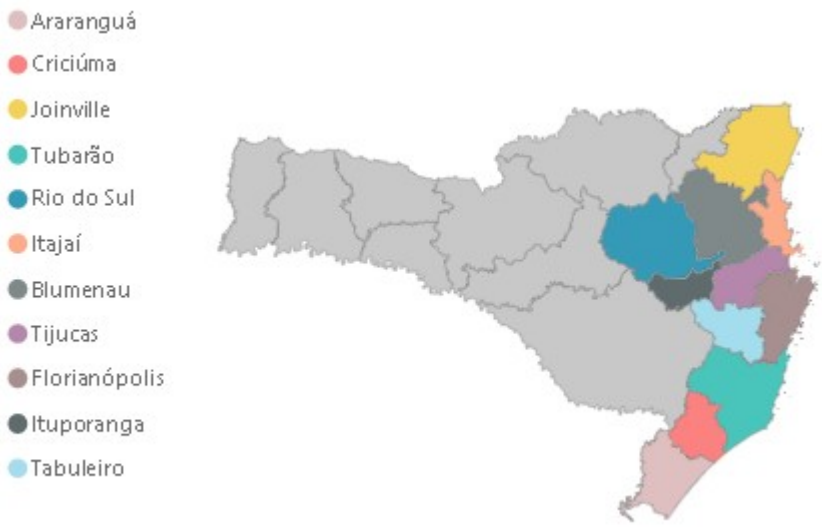
Os dados de plantio e colheita do arroz nessa região são fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), mais especificamente pelo Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola (CEPA).

Esse centro agrícola é especializado em informação e planejamento para o desenvolvimento agrícola, pesqueiro e florestal de Santa Catarina, localizado junto à Secretaria de Agricultura e Desenvolvimento Rural. Foi criado e incorporado à EPAGRI em 22 de junho de 2005 (CEPA, 2020).

Existem diferentes tipos de plantios que são monitorados pelo CEPA, que são grãos, cereais, tubérculos, frutas, fumo, entre outros. Esse centro disponibiliza dados como, acompanhamento de safras, produções municipais e regionais e boletins agropecuários online publicados mensalmente.

Santa Catarina conta com uma grande área de plantação e cultivo de arroz. Segundo o CEPA, o estado totaliza na safra 2019/2020 uma área plantada de 149.458,00 ha (hectares) e uma produção de 1.254.139,12 t (toneladas) de arroz.

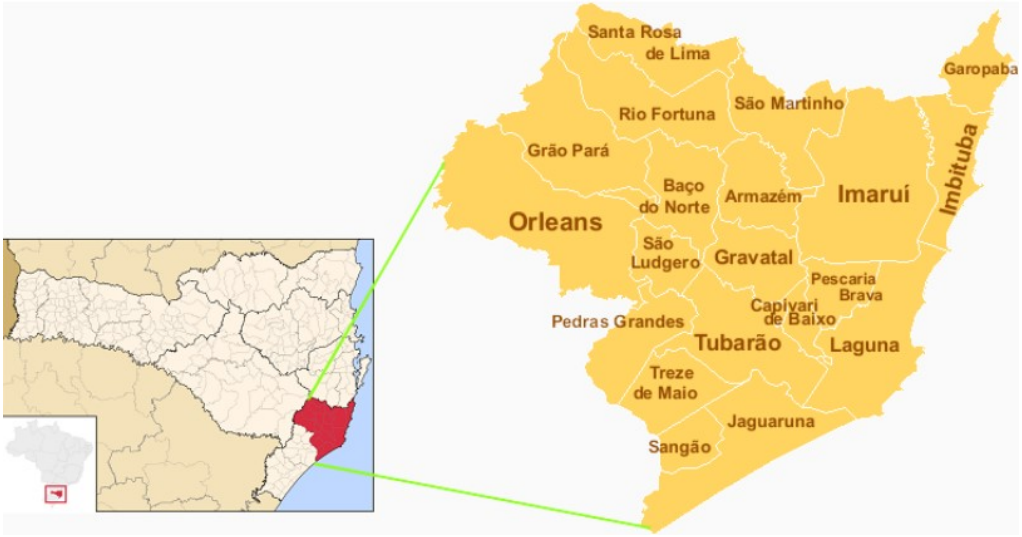
Figura 11- Microrregiões que cultivam arroz em Santa Catarina



Fonte: infoagro.sc.gov.br (2020, online)

A região que mais se aproxima da Amurel no site do CEPA é a microrregião de Tubarão, onde abrange todos os municípios da Amurel mais Garopaba, totalizando uma área plantada de 18.940,00 ha, sendo esta área um pouco maior que o município de Imbituba e uma produção de 150.239,13 t.

Figura 12 - Microrregião de Tubarão



Fonte: geografia.blogspot.com (2020, online)

Como o trabalho consiste em levantar dados apenas da região Amurel, foi diminuído a área e a produção do município de Garopaba. Esse município possui uma área atual plantada de 140 ha, e uma produção de 700 t, como mostra a figura 13.

Figura 13 - Dados sobre o plantio de arroz no município de Garopaba (2020)

UGT / Município / Cultura	Area Atual Plant (ha).	Qtde Atual Prod (t).	Rend Medio Atual (kg/ha).
UGT 8 - Litoral Sul Catarinense	140,00	700,00	5.000,00
Garopaba	140,00	700,00	5.000,00
Arroz	140,00	700,00	5.000,00
Total	140,00	700,00	5.000,00

Fonte: infoagro.sc.gov.br (2020, online)

A área plantada na região Amurel é:

$$APRA = APMT\ (ha) - APG\ (ha) \quad (1)$$

$$APRA \ = 18.940{,}00\ (ha) - 140\ (ha) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{APRA \ = 18.800{,}00\ (ha)\ ou\ 188.000.000{,}00\ m^2} \tag{3}$$

A produção na região Amurel é:

$$PRA = PMT\ (t) - \ PG\ (t) \tag{4}$$

$$PRA = 150.239{,}13\ (t) - 700\ (t) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{PRA = 149.539{,}13\ (t)\ ou\ 149.539.130{,}00\ kg} \tag{6}$$

A região Amurel soma aproximadamente 12% da produção de arroz no estado de Santa Catarina, sendo o município de Tubarão o maior produtor, totalizando uma área plantada de 5.201,00 ha e uma produção de 37.826,87 t.

3.2 QUANTIDADE DE CASCA DE ARROZ OBTIDA ATRAVÉZ DO DESCASQUE

Existem alguns processos até o que arroz seja separado da casca. Antes de o cereal chegar ao descasque, ele passa por uma pré-limpeza e pela secagem. Segundo o Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia (SGCIE) a pré-limpeza é onde o arroz passa por um conjunto de peneiras para separação de impurezas mais grosseiras, e a secagem tem por objetivo a obtenção de um valor de umidade seguro, pois só nestas condições se consegue uma armazenagem controlada, na qual se pretende manter a integridade do produto.

Figura 14 - Casca de arroz

Fonte: mfrural.com.br (2020, online)

De acordo com o Instituto Brasileiro de Pellets, Biomassa e Briquete (IBP) a casca de arroz soma 22% do peso total do arroz quando colhido.

$$Total_{Casca} = 149.539{,}13\ (t) - 78\% \tag{7}$$

$$\boldsymbol{Total_{Casca} = 32.898{,}61\ (t)} \tag{8}$$

Sendo assim, a região Amurel na safra 2019/2020 totaliza um valor de 32.898,61 t de casca de arroz.

4 POTENCIAL ENERGÉTICO DA CASCA DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL DE SANTA CATARINA

A casca de arroz é um resíduo que não é totalmente utilizado para a geração de energia elétrica no Brasil. Caso ela fosse inteiramente aproveitada para esta finalidade, utilizando a geração termelétrica como meio de tecnologia, haveria uma representatividade mais considerável no cenário nacional em relação à geração de energia elétrica.

De acordo com a ANEEL (2018), existem 12 usinas termelétricas que utilizam a casca de arroz como biomassa para geração de energia elétrica, gerando um potencial instalado de 45,333 MW, totalizando 0,1% da produção energética nacional.

A escolha do ciclo termodinâmico de Rankine para a geração de energia elétrica através desse resíduo se deu pelo fato de que essa técnica é economicamente mais viável que outras formas de aproveitamento térmico de combustão (HOFFMANN, 1999).

O principal processo físico que a casca de arroz pode ser submetida para aproveitamento energético é a densificação, sendo importante por solucionar um dos principais problemas na utilização da casca de arroz, que é a sua baixa densidade específica (130 kg/m³), tornando economicamente viável seu uso e armazenamento. (MAYER et al., 2006).

De acordo com Mayer et al. (2007) a casca de arroz possui um Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 3.200 kcal/kg.

Poder Calorífico Inferior é a quantidade de calor (energia) liberada quando um material entra em combustão e os gases de descarga são resfriados até o ponto de ebulição da água, evitando assim que a água contida na combustão seja condensada (ANDRADE, 2015).

Para fazer a conversão de kcal para kJ, é preciso saber que 1 kcal é equivalente a 4,184 kJ.

$$3.200\ kcal * 4{,}184 \tag{9}$$

$$\mathbf{13.388{,}8}\ \boldsymbol{kJ} \tag{10}$$

Logo é necessário 1 kg de casca de arroz para gerar 13.388,8 kJ. Como a conversão de calor em trabalho ocorre de forma contínua, geralmente os ciclos de conversão são também chamados de ciclos de potência, onde esses ciclos referem-se à taxa de conversão de energia na unidade de tempo, sendo em joules/s ou watts (MOREIRA, 2010).

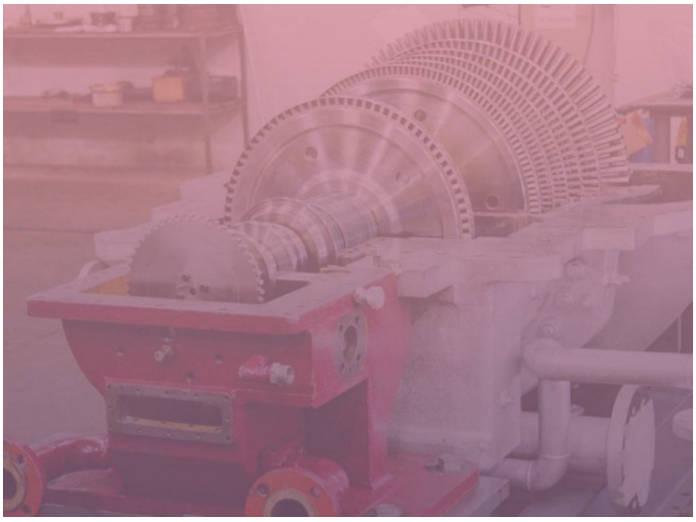
4.1 CÁLCULOS DE DIMENSIONAMENTO PARA UMA USINA TERMELÉTRICA UTILIZANDO O CICLO DE RANKINE

O ciclo de Rankine é muito utilizado para dimensionamentos de usinas que utilizam a combustão como geração de energia elétrica. Este ciclo é composto por princípios fundamentais, para que o vapor seja gerado na caldeira e depois transferido para a turbina.

Existem cálculos fundamentais para calcular o poder calorífico do resíduo utilizado como combustível para geração de energia elétrica. Os cálculos abaixo servem para demonstrar a quantidade de energia elétrica que a casca de arroz é capaz de gerar através da sua queima.

A turbina selecionada para a realização dos cálculos foi baseada na quantidade de casca de arroz que a região Amurel produziu na safra 2019/2020. Foi escolhida uma turbina da empresa WÓRTICE, modelo WXC 5000, com potência instalada de 4 a 5 MW, e pressão de admissão máxima, ou pressão absoluta no sistema, de 42 bar, temperatura máxima de admissão de 450 graus Celsius (ºC) e a rotação máxima de 9000 rpm.

Figura 15 - Turbina de condensação WXC 5000

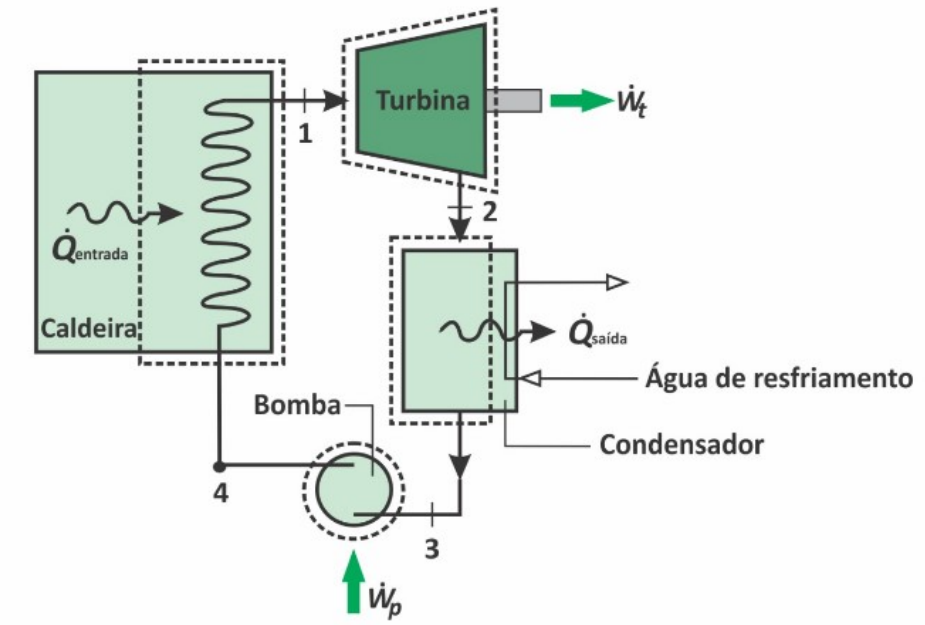


Fonte: wortice.com.br (2020, online)

4.1.1 Cálculos para o ciclo térmico

Para realizar o cálculo térmico, foi utilizado o esquema térmico da figura 10.

Figura 16 - Esquema para cálculo térmico utilizando o ciclo de Rankine



Fonte: MORAN et al., 2006, p. 446.

O esquema da figura 16 mostra diferentes passos do ciclo de Rankine. Existem 4 estados do fluído de trabalho. O número 1 está entre a saída da caldeira e a entrada da turbina, o número 2 entre a saída da turbina e a entrada do condensador, o número 3 está na saída do condensador para a bomba, e o número 4 da bomba para a alimentação da caldeira.

Os fluxos de energia em cada um dos elementos são determinados por $\dot{Q}_{entrada}$, $\dot{W}_t$, $\dot{Q}_{saída}$, $\dot{W}_p$. Explicando cada um dos fluxos, $\dot{Q}_{entrada}$ é a quantidade de calor fornecido para a caldeira, $\dot{W}_t$ é a quantidade de trabalho fornecido pela turbina, $\dot{Q}_{saída}$ é a quantidade de calor que vai ser retirada do condensador, e $\dot{W}_p$ é o trabalho que a bomba vai inserir no processo.

Para calcular cada um dos fluxos de energia, é preciso conhecer a entalpia e a entropia em cada estado no ciclo. A entalpia é a soma da parcela de energia que um fluido transporta, sendo proveniente de dois fenômenos, a energia interna, relacionada à temperatura do fluido, e a pressão ao qual o fluido está submetido, ou seja, quanto maior a pressão ou temperatura, maior a entalpia. Já a entropia serve como a medida da energia térmica de um sistema por unidade de temperatura que não está disponível para fazer um trabalho útil.

Para efeito de cálculos, foram utilizadas as tabelas A-5 e A-6, das propriedades da água saturada do líquido e do vapor, e das propriedades do vapor sobreaquecido, ambas em anexo. A pressão de entrada é de 42 bar, já determinado pelo fabricante da turbina. Fazendo uma conversão direta para a unidade Pascal, tem-se:

$$1\ bar = 0{,}1\ MPa \qquad 42\ bar = 4{,}2\ MPa \tag{11}$$

Para encontrar os valores da entalpia e entropia no ponto 1 da figura 16, foi necessário realizar o cálculo da interpolação, onde “x” é a variável a ser encontrada.

$$4\ MPa \qquad 3.330{,}3\ \frac{kJ}{kg} \tag{12}$$

$$4{,}2\ MPa \qquad x \tag{13}$$

$$4{,}5\ MPa \qquad 3.323{,}3\ \frac{kJ}{kg} \tag{14}$$

Realizando os cálculos da interpolação para encontrar a entalpia, substituindo “x” por h1, então:

$$\frac{4 - 4{,}2}{3.330{,}3 - h1} = \frac{4 - 4{,}5}{3.330{,}3 - 3.323{,}3} \tag{15}$$

$$\frac{-0{,}2}{3.330{,}3 - h1} = \frac{-0{,}5}{7} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{h1 = 3.327{,}5\ \frac{kJ}{kg}} \tag{17}$$

Para a entropia é necessário o mesmo cálculo, porém com valores diferentes.

$$4\ MPa \qquad 6{,}9363\ \frac{kJ}{kg} \tag{18}$$

$$4{,}2\ MPa \qquad x \tag{19}$$

$$4{,}5\ MPa \qquad 6{,}8746\ \frac{kJ}{kg} \tag{20}$$

Substituindo “x” por s1, então:

$$\frac{4-4{,}2}{6{,}9363-s1}=\frac{4-4{,}5}{6{,}9363-6{,}8746} \tag{21}$$

$$\frac{-0{,}2}{6{,}9363-s1}=\frac{-0{,}5}{0{,}0617} \tag{22}$$

$$\boldsymbol{s1=6{,}911\ \frac{kJ}{kg.k}} \tag{23}$$

Em seguida, foi preciso analisar a tabela A-5 novamente e descobrir os valores da entalpia e entropia em seus estados líquido e gasoso no ponto 2, para uma saída com pressão de 10 kPa, então:

$$hl2=191{,}83\ \frac{kJ}{kg} \tag{24}$$

$$hg2=2.584{,}7\ \frac{kJ}{kg} \tag{25}$$

$$sl2=0{,}6493\ \frac{kJ}{kg.k} \tag{26}$$

$$sg2=8{,}1502\ \frac{kJ}{kg.k} \tag{27}$$

O processo na turbina é isentrópico, ou seja, ele ocorre sem alteração na entropia (s1 = s2), sendo assim:

$$x2=\frac{s2-sl2}{sg2-sl2} \tag{28}$$

$$x2=\frac{6{,}9116-0{,}6493}{8{,}1502-0{,}6493} \tag{29}$$

$$\boldsymbol{x2 = 0,83\ ou\ 83\%} \tag{30}$$

Há 83% de vapor, e 17% de líquido na mistura vapor/líquido. Para determinar a entalpia no ponto 2, portanto:

$$h2 = \big((1 - x2) * hl2\big) + (x2 * hg2) \tag{31}$$

$$h2 = \big((1 - 0{,}83) * 191{,}83\big) + (0{,}83 * 2584{,}7) \tag{32}$$

$$\boldsymbol{h2 = 2.189,579\ \frac{kJ}{kg}} \tag{33}$$

Como o condensador não tem a função de inserir pressão na bomba, a pressão nesse equipamento é a mesma (10 kPa), tanto na entrada quanto na saída.

Na saída do condensador, o estado do fluído é totalmente líquido, sendo assim é possível encontrar o valor da entalpia no ponto 3 utilizando também a tabela A-5, logo:

$$\boldsymbol{h3 = hl2 = 191,83\ \frac{kJ}{kg}} \tag{34}$$

Logo após descobrir a entalpia no ponto 3, é preciso descobrir a mesma no ponto 4. Mas antes é preciso saber a quantidade de trabalho que a bomba entregará para o sistema, determinada pela equação:

$$\frac{\dot{W}p}{M} = V * (P4 - P3) \tag{35}$$

$$\frac{\dot{W}p}{M} = 0{,}001010 * (4{,}2x10^6 - 10x10^3) \tag{36}$$

$$\boldsymbol{\frac{\dot{W}p}{M} = 4,232\ \frac{kJ}{kg}} \tag{37}$$

Encontrado o trabalho que a bomba entrega, é possível realizar o cálculo para encontrar a entalpia no ponto 4, então:

$$h4 = \frac{\dot{W}p}{M} + h3 \tag{38}$$

$$h4 = 4{,}231 + 191{,}83 \tag{39}$$

$$\boldsymbol{h4 = 196{,}062\ \frac{kJ}{kg}} \tag{40}$$

Obtido todos os valores de entalpia para os 4 estados do ciclo termodinâmico, é possível determinar o trabalho da bomba, o calor no condensador, o trabalho na turbina e o calor na caldeira.

A vazão mássica é calculada utilizando o valor encontrado com o trabalho da turbina, com a equação:

$$\frac{\dot{W}t}{\dot{m}} = h1 - h2 \tag{41}$$

A potência da turbina já é conhecida, sendo assim é possível descobrir a vazão mássica.

A potência instalada da turbina é:

$$\dot{W}t = 4\ MW\ ou\ 4\ \frac{MJ}{s} \tag{42}$$

Então:

$$\frac{4x10^3}{\dot{m}} = 3327{,}5 - 2.189{,}579 \tag{43}$$

$$\dot{m} = \boldsymbol{3{,}515\ \frac{Kg}{s}} \tag{44}$$

Após determinar a vazão mássica, é possível encontrar os outros valores do ciclo. O calor na caldeira é calculado por:

$$Qin = \dot{m} * (h1 - h4) \tag{45}$$

$$Qin = 3{,}515 * (3327{,}5 - 196{,}06) \tag{46}$$

$$\boldsymbol{Qin = 11.007{,}58\ \frac{Kj}{s}\ \ ou\ 11.007{,}58\ KW} \tag{47}$$

Determinada a quantidade de calor necessária, é possível encontrar a quantidade de casca de arroz utilizada para gerar a potência nominal.

Como foi demonstrado anteriormente, o poder calorífico do resíduo é de 3.200 Kcal/kg, mas foi utilizado o PCI em kJ/kg como base de cálculos, sendo que:

$$1\ \frac{Kcal}{kg} = 4{,}184\ \frac{kJ}{kg} \tag{48}$$

O valor de eficiência da caldeira utilizado para cálculos de termelétricas está estipulado em 95%, então:

$$Qin = Mcomb * PCI * n * 4{,}184 \tag{49}$$

$$11.007{,}58 = Mcomb * 3.200 * 0{,}95 * 4{,}184 \tag{50}$$

$$Mcomb = \frac{11.007{,}58}{3.200 * 0{,}95 * 4{,}184} \tag{51}$$

$$\boldsymbol{Mcomb = 0{,}865\ \frac{Kg}{s}} \tag{52}$$

A quantidade de toneladas por minutos é representada pela equação:

$$Total_{minuto} = \frac{Mcomb * 60\ (minutos)}{1000} \tag{53}$$

$$Total_{minuto} = \frac{0{,}865 * 60\ (minutos)}{1000} \tag{54}$$

$$\boldsymbol{Total_{minuto} = 0,0519\ \frac{t}{min}} \tag{55}$$

Para saber a quantidade necessária de toneladas por hora que se deve usar, é necessário multiplicar pela quantidade de segundos existentes em uma hora, então:

$$Total_{hora} = \frac{Mcomb * 60\ (segundos) * 60(minutos)}{1000} \tag{56}$$

$$Total_{hora} = \frac{0{,}865 * 60\ (segundos) * 60\ (minutos)}{1000} \tag{57}$$

$$\boldsymbol{Total_{hora} = 3,115\ \frac{t}{h}} \tag{58}$$

O cálculo para determinar a quantidade de casca de arroz que pode ser utilizada para a geração de potencial nominal na turbina em um ano pode ser representado por:

$$Total_{ano} = Mcomb * 60\ (segu) * 60\ (minutos) * 720\ \left(\frac{h}{mês}\right) * 12\ (meses) \tag{59}$$

$$Total_{ano} = 0{,}865 * 60\ (segundos) * 60\ (minutos) * 720\ \left(\frac{h}{mês}\right) * 12\ (meses) \tag{60}$$

$$\boldsymbol{Total_{ano} = 26.917,990\ \frac{t}{ano}} \tag{61}$$

Com uma turbina de potência instalada de 4 MW, seria possível realizar o uso de 26.917,990 t de casca de arroz para a geração de energia, sendo essa quantidade em torno de 81,82% do total de resíduo que a região Amurel produziu na safra 2019/2020.

4.2 QUANTIDADE DE RESIDÊNCIAS DE BAIXO PADRÃO QUE PODEM SER ATENDIDAS PELA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA CASCA DE ARROZ NA REGIÃO AMUREL

Atualmente, a quantidade de consumo de energia elétrica que determina a classe baixo padrão no Brasil está entre 30 e 220 kWh, sendo que existem alguns subsídios para estes consumidores. Segundo a Secretaria do Estado do Desenvolvimento Social (2019) o percentual do subsídio é calculado com base no consumo mensal de energia elétrica do domicílio, onde o consumo de até 30 kWh recebem 65% de desconto, de 31 a 100 kWh, o índice é de 40%, e entre 101 e 220 kWh, o desconto é de 10%.

Para saber quanto de energia elétrica a usina pode gerar, é necessário saber por quanto tempo ela pode trabalhar. Como a turbina selecionada está na unidade de medida em MW, então a sua conversão para MWh se dá pela potência, multiplicando o tempo que ela fica trabalhando. Logo, se ligada por uma hora, gera 4 MWh de energia.

Para demonstrar a quantidade de residências que podem ser abastecidas com a energia elétrica gerada pela casca de arroz, é mostrado 3 tipos de consumos diferentes, 30, 125 e 220 kWh.

Uma usina termelétrica, em condições favoráveis trabalha em torno de 720 horas por mês, então:

$$Energia_{mensal} = 720\ (horas) * 4\ (MW) \tag{62}$$

$$\boldsymbol{Energia_{mensal} = 2880\ \frac{MWh}{mês}\ ou\ 2.880.000\ \frac{kWh}{mês}} \tag{63}$$

Segundo a ANEEL, com a energia mensal mencionada na equação 63, é possível atender um número considerável de residências de baixa renda, conforme mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de residências atendidas por consumo em kWh

kWh/mês	Quantidade de residências
30	96.000
125	23.040
220	13.090

Fonte: aneel.gov.br (2020, online)

4.2.1 Quantidade de residências atendidas no município de Tubarão

Foi utilizado o município de Tubarão como referência, pois o mesmo é o mais populoso da região. Foram levantados dados da concessionária CELESC S.A., que é a principal distribuidora de energia elétrica do estado de Santa Catarina, onde a mesma não abrange todas as áreas do município, sendo algumas áreas atendidas por cooperativa municipal, sendo assim não são contabilizadas todas as residências pertencentes a Tubarão.

Até junho de 2020, eram contabilizadas 30.550 unidades consumidoras ativas atendidas pela CELESC S.A. no município de Tubarão.

O consumo no mês de junho atingiu 5.924,25 MWh, dividindo esse valor pelo número de unidades consumidoras citadas na tabela 2, a média de consumo por residência fica em torno de 193,92 kWh/mês.

Com a geração de energia elétrica mensal calculada na equação 65, é possível atender em torno de 14.851 residências no município de Tubarão, ou aproximadamente 48% das unidades consumidoras.

4.3 ANÁLISE ECONÔMICA E FINANCEIRA

A análise econômica e financeira é um ponto extremamente importante em qualquer tipo de negócio.

Existem vários fatores que se devem analisar quando relacionados à análise de gastos. Em relação a uma usina termelétrica, devem-se levar em consideração vários pontos, como geradores de vapor, turbinas, tubulações, cabos, gerador, subestação, entre outros.

Estima-se que para cada MW instalado, seja investido um valor de R$ 3.500.000,00 e um custo de manutenção de R$ 30,00 por MWh sem o preço do resíduo incluído (RABENSCHLAG et al., 2013).

No caso do presente estudo, uma usina de 4 MW totalizaria um custo de R$ 14.000.000,00 para finalizar a obra.

De acordo com um orçamento feito pela empresa WÓRTICE em outubro de 2020, uma usina de 4 MW teria o valor estimado de R$ 9.853.000,00, porém o custo mencionado não envolveria a construção de subestação, ligação na rede de alta, mão de obra completa, entre outros insumos que são necessários para finalizar a obra.

Figura 17 - Orçamento parcial de uma usina de 4 MW (WÓRTICE)

TABELA 09. RELAÇÃO DE PEÇAS E SERVIÇOS DO ESCOPO DESTA PROPOSTA		
ITEM	DESCRIÇÃO	VALOR (R$)
1.1	**Turbina a Vapor:** • Turbina a vapor multi-estágios, condensação, modelo DME 450 D (transformada) para 4,0 MW, para acionamento de gerador; • Painel elétrico da turbina e gerador; • Tanque base para turbina e redutor; • Serviço de montagem, start-up e comissionamento da turbina, redutor e gerador; • Serviço de montagem do condensador e torre de resfriamento; • Supervisão de montagem das interligações mecânica do condensador e torre de resfriamento; • Supervisão de montagem dos paneis elétricos e interligações elétricas; • Redutor de velocidade G1D 500 (reformado); • Gerador síncrono trifásico Toshiba, tipo GALT, A 10484 (reformado).	2.975.000,00
	Faturado Direto com o Fornecedor	
2.1	**Condensador:** • Condensador e sistema de geração de vácuo (bomba de vácuo).	662.000,00
2.2	**Torre de Resfriamento:** • Torre de resfriamento com bombas, válvula e painel de automação das bombas.	566.000,00
2.3	**Alimentação da Caldeira:** • Moega e Transportador.	175.000,00
2.4	**Caldeira:** • Montada e Automatizada.	5.275.000,00
2.5	**Interligação de Alta Pressão:** • Linha Caldeira - TG.	200.000,00
	Total (R$)	9.853.000,00

(nove milhões e oitocentos e cinquenta e três mil reais)

Fonte: WÓRTICE (2020, online)

4.3.1 Payback

A prática do *payback* é utilizada para saber quanto tempo um projeto leva para cobrir seu investimento original.

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a média entre dezembro de 2019 e outubro de 2020 para o valor do MWh para a venda no mercado livre de energia, custa em torno de 155,00 reais por MWh.

Segundo o Site MFRURAL (2020), o preço médio comercializado da casca de arroz é de R$30,00 por tonelada.

Então para saber qual o custo da casca de arroz por hora, pode-se demonstrar pelo seguinte cálculo:

$$30{,}00 * 3{,}155\ \frac{t}{hora} = \boldsymbol{R\$\ 93{,}45} \tag{64}$$

Tabela 3 - Retorno de investimento

CENÁRIOS	100% CAPACIDADE	75% CAPACIDADE	50% CAPACIDADE
Potência Média (MW)	4	3	2
Total de horas por ano	8760	8760	8760
Total de energia gerada por MWh	35.040	26.280	17.520
Preço médio da energia (R$/MWh)	R$ 155,00	R$ 155,00	R$ 155,00
Custo da casca de arroz (hora)	R$ 93,45	R$ 93,45	R$ 93,45
Custo de manutenção por MWh	R$ 30,00	R$ 30,00	R$ 30,00
Valor líquido por MWh	R$ 31,55	R$ 31,55	R$ 31,55
Receita anual (R$)	R$ 1.105.512,00	R$ 829.134,00	R$ 552.756,00
Investimento	R$ 14.000.000,00		
Payback	12 anos e 8 meses	16 anos e 11 meses	25 anos e 4 meses

Fonte: Autores – adaptado (2020)

Em um cenário ideal, sem manutenções preventivas e/ou corretivas, ou quaisquer interrupções, o *payback* para a capacidade da usina com 100% de geração energia elétrica seriam 12 anos e 8 meses. Para 75% da capacidade de geração de energia elétrica da usina, seriam 16 anos e 11 meses, e para 50% seriam 25 anos e 4 meses.

4.3.2 Local para implantação da usina termelétrica

A análise para encontrar o melhor lugar para a construção da usina, primeiramente envolveu alguns fatores, tais como infraestrutura, logística e localidade centralizada entre as cidades da região Amurel. O município que melhor atendeu esses requisitos foi o de Tubarão.

A usina ficaria em um lugar de fácil acesso, já que estaria nas proximidades da BR-101, facilitando assim o acesso e o transporte do resíduo para a geração de energia elétrica.

Figura 18 - Localização para a construção da usina

Fonte: google.com.br (2020)

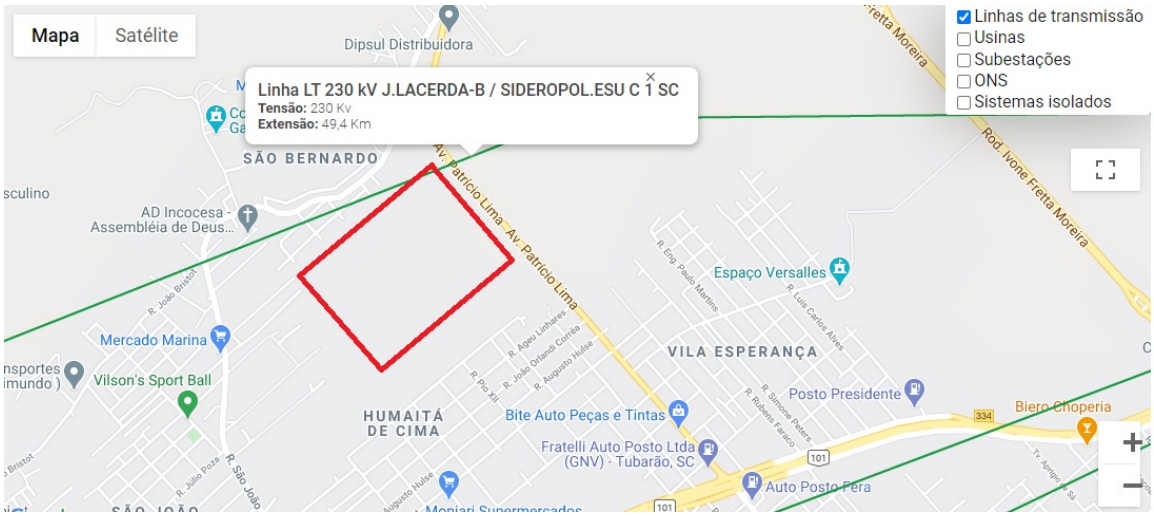
Como mostra a figura 18, o local escolhido fica próximo a subestação da CELESC, no bairro Vila Esperança, em Tubarão. A CERGAL, que é uma cooperativa de distribuição de energia elétrica que presta serviços no município de Tubarão, está com sua subestação construída próxima a subestação da CELESC e ao local escolhido para a implantação da usina.

Figura 19 - Localização da subestação da CERGAL

Fonte: google.com.br (2020)

Outro ponto positivo seriam as torres de transmissão que já existem nas proximidades do local escolhido, com a tensão de 230 kV, sendo denominadas de linhas de extra alta tensão, conhecidas também como rede básica de transmissão. Essas linhas normalmente alimentam subestações para que a eletricidade possa ser reduzida a uma tensão bem menor do que a gerada pela usina e posteriormente entregue aos consumidores finais.

Figura 20 - Linha de transmissão próxima ao local escolhido para implantação da usina



Fonte: google.com.br (2020)

5 CONCLUSÃO

Há algum tempo, não havia preocupação sobre combustíveis fósseis em relação a abastecimento de resíduos para geração de energia, visto que os combustíveis demoram milhares de anos para se recompor. As ideias e as perspectivas foram mudando de tempos em tempos, sempre em busca de novas fontes alternativas de energia, sem afetar em grande escala o meio ambiente, desta forma a casca de arroz é uma alternativa para substituição parcial dos combustíveis fósseis.

A geração de energia a partir da casca de arroz pode ser um meio para a utilização desse resíduo. Os resultados do estudo concluem que existe um potencial considerável para produzir eletricidade a partir da casca de arroz na região Amurel.

O lugar escolhido levou em consideração principalmente logística e infraestrutura. Com base nisso foi escolhido o município de Tubarão para comportar uma usina termelétrica com base na casca disponível após o descasque do arroz. Estima-se que uma usina de geração termelétrica com capacidade instalada de 4 MW atenderia a quantidade de resíduo que a região produz.

No contexto da região estudada, é possível gerar 2.880.000 kWh/mês com a casca proveniente do arroz plantado. Esta quantidade de eletricidade é suficiente para atender 48% das residências atendidas pela concessionária CELESC S.A no município de Tubarão, ou ainda, 96 mil residências com um consumo de 30 kWh/mês, 23.040 residências consumindo 125 kWh/mês ou 13.090 residências consumindo 220 kWh/mês.

Acredita-se que explorar o potencial de energia renovável e utilizar resíduos agrícolas é algo benéfico tanto para geração de energia quanto para o meio ambiente. A casca do arroz mostrou-se uma opção bastante viável por sua abundância na região, somado ao fato de proporcionar um descarte ideal para o resíduo.

Através da conclusão do estudo do potencial energético da casca de arroz como biomassa para geração de energia elétrica na região Amurel de Santa Catarina, surgem alguns temas relacionados para futuras pesquisas. Sendo estes:

- Estudo do potencial energético da casca de arroz como biomassa para geração de energia elétrica em outras microrregiões ou no estado de Santa Catarina;
- Utilizar outros tipos de resíduos agrícolas para estudo de geração de energia elétrica;

- Estudo da sazonalidade da casca de arroz, utilizando o resíduo como geração de energia;
- Estudo dos custos operacionais de uma usina termelétrica que utiliza a casca de arroz como principal fonte de energia.

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Parte II – Fontes renováveis. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 24/03/2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. ATLAS DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 24/03/2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Relatório síntese / Ano base 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relatório%20Síntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em: 31/03/2020.

BIROLLO ALBERTON, GIULLIA. Potencial de geração de energia renovável através do aproveitamento de resíduos sólidos e efluentes líquidos de arrozeiras no estado de Santa Catarina: metano e gás de síntese. Santa Catarina. Santa Catarina, UFSC, 2019.

MELO ROQUETTE, THADEU. Análise do potencial de geração de energia elétrica no Brasil utilizando a casca de arroz como combustível em um Ciclo Rankine orgânico. Rio de Janeiro, UFRJ, 2017.

SCIENCING. The Advantages & Disadvantages of Biomass Energy. Disponível em: <https://sciencing.com/advantages-disadvantages-biomass-energy-8224681.html>. Acesso em: 02/04/2020.

EPAGRI, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Boletim Agropecuário / nº 70. Disponível em: <http://docweb.epagri.sc.gov.br/website_cepa/Boletim_agropecuario/boletim_agropecuario_n70.pdf >. Acesso em: 02/04/2020.

ENGEPLUS. Segundo maior produtor nacional, Santa Catarina inicia a colheita de arroz. Disponível em: <http://www.engeplus.com.br/noticia/geral/2019/segundo-maior-produtor-nacional-santa-catarina-inicia-a-colheita-de-arroz>. Acesso em: 02/04/2020.

MME, Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia2029. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/78404/0/Apresenta%C3%A7%C3%A3o+PDE+2029+-+REIVE+BARROS/e6df4e97-f42f-9214-e24f-e122b4e0863d>. Acesso em: 02/04/2020.

TODAMATERIA. Biomassa. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/biomassa/>. Acesso em: 02/04/2020.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. O Contexto das Energias Renováveis no Brasil. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf>. Acesso em: 03/04/2020.

GIL, Antonio Carlos. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2002.

LEONEL, V.; MOTTA, A. D. M. Ciência e pesquisa: livro didático. Palhoça: Unisul Virtual, 2007.

MOREIRA, JOSÉ ROBERTO SIMÕES. ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. RIO DE JANEIRO, LTC, P. 90; 235-252, 2017.

REIS, LINEU BELICO DOS. ENERGIA ELÉTRICA E SUSTENTABILIDADE ASPECTOS TECNOLÓGICOS, SOCIOAMBIENTAIS E LEGAIS. SÃO PAULO, MANOLE, P. 03, 2014.

EPAGRI, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Evento em Turvo vai abrir oficialmente colheita do arroz em SC. Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/02/07/evento-em-turvo-vai-abrir-oficialmente-colheita-do-arroz-em-sc/ >. Acesso em: 03/04/2020.

MUNDO CIÊNCIA. História da Eletricidade. Disponível em: <https://www.mundociencia.com.br/fisica/historia-da-eletricidade/>. Acesso em: 09/04/2020.

INFO ESCOLA. DIFERENÇA ENTRE SUSTENTÁVEL, RENOVÁVEL E LIMPA. Disponível em: <https://www.infoescola.com/ecologia/diferenca-entre-energia-sustentavel-renovavel-e-limpa/>. Acesso em: 09/04/2020.

NRDC, Natural Resources Defense Council. RENEWABLE ENERGY: THE CLEAN FACTS. Disponível em: <https://www.nrdc.org/stories/renewable-energy-clean-facts>. Acesso em: 10/04/2020.

GOV.BR, Governo do Brasil. Fontes de energia renováveis representam 83%da matriz energética brasileira. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 11/04/2020.

TOLMASQUIM, MAURICIO TIOMNO. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142012000100017&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 11/04/2020.

CENARIOSSOLAR. Energia solar fotovoltaica: democrática e estratégica ao Brasil. Disponível em: <https://cenariossolar.editorabrasilenergia.com.br/energia-solar-fotovoltaica-democratica-e-estrategica-ao-brasil/>. Acesso em: 11/04/2020.

JANNUZZI, ANTONIO CEZAR. REGULAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA SOB O FOCO DO CONSUMIDOR. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/2712/1/Dissert_Antonio%20Jannuzzi.pdf>. Acesso em: 15/04/2020.

SUPER INTERESSANTE. Por que temos duas tensões no Brasil?. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/por-que-temos-duas-tensoes-no-brasil/>. Acesso em: 15/04/2020.

CELESC, Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A..PERFIL CORPORATIVO. Disponível em: <http://ri.celesc.com.br/a-celesc/perfil-corporativo/>. Acesso em: 17/04/2020.

CELESC, Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A..DADOS DE CONSUMO. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/home/mercado-de-energia/dados-de-consumo>. Acesso em: 17/04/2020.

WBDG, WholeBuilding Design Guide. Biomass for ElectricityGeneration. Disponível em: <https://www.wbdg.org/resources/biomass-electricity-generation>. Acesso em: 26/04/2020.

SENADO FEDERAL. Energias alternativas esperam incentivo financeiro. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/emdiscussao/edicoes/o-desafio-da-energia/propostas/eenrgias-alternativas-esperam-incentivo-financeiro>. Acesso em: 26/04/2020.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>. Acesso em: 26/04/2020.

HABTU, NIGGUS GABBIYE; AYELE, DELELE WORKU; FANTA, SOLOMON WORKNEH; ADMASU, BIMREW TAMRAT; BITEW, MEKUANINT AGEGNEHU. ADVANCES OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. BAHIR DAR, ETHIOPIA, ICAST, P. 625, 2019.

RICE KNOWLEDGE BANK. Using Rice husk for energyproduction. Disponível em: <http://www.knowledgebank.irri.org/step-by-step-production/postharvest/rice-by-products/rice-husk/using-rice-husk-for-energy-production>. Acesso em: 29/04/2020.

B.M. JENKINS; L.L. BAXTER; T.R. MILES JR; T.R. MILES. Combustion properties of biomass. Disponível em: <https://www.et.byu.edu/~tom/classes/733/ReadingMaterial/Jenkins-Baxter.pdf>. Acesso em: 29/04/2020.

AMUREL, Associação de Municípios da Região de Laguna. Mapas. Disponível em: <https://www.amurel.org.br/cms/pagina/ver/codMapaItem/45287>. Acesso em: 14/05/2020.

MORAN; MICHAEL J., SHAPIRO; HOWARD N., BOETTNER; DAISIE D., BAILEY; MARGARET B.. FUNDAMENTALS OF ENGINEERING THERMODYNAMICS. 5TH EDITION, JOHN WILEY & SONS, INC., NEW YORK, P. 446, 2006.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. CAPACIDADE INSTALADA NO SIN – 2020/2024. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 15/05/2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasil alcança 170 mil megawatts de capacidade instalada em 2019. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-alcanca-170-mil-megawatts-de-capacidade-instalada-em-2019/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 15/05/2020.

CEPA, Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola. QUEM SOMOS. Disponível em: <https://cepa.epagri.sc.gov.br/index.php/institucional/quem-somos/>. Acesso em: 04/09/2020.

CEPA, Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola. PRODUÇÃO VEGETAL. Disponível em: <https://www.infoagro.sc.gov.br/index.php/safra/producao-vegetal>. Acesso em: 04/09/2020.

SGCIE, Sistema de Gestão dos Consumos Intensivos de Energia. DESCASQUE, BRANQUEAMENTO E OUTROS TRATAMENTOS DO ARROZ. Disponível em: <https://www.sgcie.pt/wp-content/uploads/2019/10/10612-DESCASQUE-BRANQUEAMENTO-E-OUTROS-TRATAMENTOS-DO-ARROZ_Caderno.pdf>. Acesso em: 06/09/2020.

MFRURAL. AMIDO DE CASCA DE ARROZ. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/99167/amido-de-casca-de-arroz>. Acesso em: 06/09/2020.

IBP, Instituto Brasileiro de Pellets, Biomassa e Briquete. BIOMASSA DE ORIGEM AGRÍCOLA. Disponível em: <http://abibbrasil.wixsite.com/institutobrpellets/biomassa-agorindustrial >. Acesso em: 06/09/2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. INFORMAÇÕES GERENCIAIS. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+-+1%C2%BA+trimestre+2018/01298785-3069-c0e7-d9c8-a2cca07cddd9?version=1.2>. Acesso em: 13/09/2020.

HOFFMANN, R. Método avaliativo da geração regionalizada de energia, em potências inferiores a 1MWe, a partir da gestão dos resíduos de biomassa – O caso da casca de arroz, 1999. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11967?locale=pt_BR>. Acesso em: 13/09/2020.

MAYER, Flávio Dias; HOFFMANN, Ronaldo; RUPPENTHAL, Janis E. Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. 2006. Disponível em:<https://simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/124.pdf>Acesso em: 13/09/2020.

UFPR, Universidade Federal do Paraná. MÁQUINAS TÉRMICAS AT-101. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT101-Aula01.pdf>. Acesso em: 13/09/2020.

SISEA, Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos. APLICAÇÕES DA TERMODINÂMICA NOTAS DE AULA DE PME3240 – TERMODINÂMICA I (PARTE II). Disponível em: <http://www.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2017/06/APOSTILA-TERMO-PARTE-2.pdf>. Acesso em: 05/10/2020.

WÓRTICE. Turbinas a Vapor de Condensação. Disponível em: <https://www.wortice.com.br/turbinas-a-vapor-de-condensacao>. Acesso em: 06/10/2020.

MINISTÉRIO DA CIDADANIA, Secretaria Especial do Desenvolvimento Social. Famílias de baixa renda podem solicitar abatimento na conta de luz. Disponível em: <http://mds.gov.br/area-de-imprensa/noticias/2019/maio/familias-de-baixa-renda-podem-solicitar-abatimento-na-conta-de-luz>. Acesso em: 13/10/2020.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Tarifa Social de Energia Elétrica - TSEE. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/tarifa-social-baixa-renda>. Acesso em: 15/10/2020.

PINTO; FREDERICO ABBADIE, RABENSCHLAG; DENIS RASQUIN. VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. Disponível em: <https://www.inovarse.org/filebrowser/download/15472>. Acesso em: 19/10/2020.

CCEE, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Preços em formato XLS. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_csv?_adf.ctrl-state=5l2mlygx0_114&_afrLoop=5481854535806#!%40%40%3F_afrLoop%3D5481854535806%26_adf.ctrl-state%3D5l2mlygx0_118 >. Acesso em: 19/10/2020.

USP, Universidade de São Paulo. O Sistema Elétrico. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>. Acesso em: 26/10/2020.

MFRURAL. CASCA DE ARROZ. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/detalhe/169510/casca-de-arroz>. Acesso em: 29/10/2020.

FEPESE. Programa Catarinense de Desenvolvimento Regional e Setorial. Disponível em: <http://portaldeeconomiasc.fepese.org.br/arquivos/links/estudos_regionais/2004%2005%20-%20DTR%20-%20AMUREL%20-%202004%20-%20Completo%20-%20RV%2004.pdf>. Acesso em: 14/12/2020.

ANEXOS

ANEXO A – Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entrada de pressões

Tabela A-5 - Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entrada de pressões

		Specific volume m^3/kg		Internal energy kJ/kg			Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/(kg · K)		
Press. kPa P	Sat. temp. °C T_{sat}	Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g	Sat. liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. vapor u_g	Sat. liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. vapor h_g	Sat. liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. vapor s_g
0.6113	0.01	0.001 000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	9.1562
1.0	6.98	0.001 000	129.21	29.30	2355.7	2385.0	29.30	2484.9	2514.2	0.1059	8.8697	8.9756
1.5	13.03	0.001 001	87.98	54.71	2338.6	2393.3	54.71	2470.6	2525.3	0.1957	8.6322	8.8279
2.0	17.50	0.001 001	67.00	73.48	2326.0	2399.5	73.48	2460.0	2533.5	0.2607	8.4629	8.7237
2.5	21.08	0.001 002	54.25	88.48	2315.9	2404.4	88.49	2451.6	2540.0	0.3120	8.3311	8.6432
3.0	24.08	0.001 003	45.67	101.04	2307.5	2408.5	101.05	2444.5	2545.5	0.3545	8.2231	8.5776
4.0	28.96	0.001 004	34.80	121.45	2293.7	2415.2	121.46	2432.9	2554.4	0.4226	8.0520	8.4746
5.0	32.88	0.001 005	28.19	137.81	2282.7	2420.5	137.82	2423.7	2561.5	0.4764	7.9187	8.3951
7.5	40.29	0.001 008	19.24	168.78	2261.7	2430.5	168.79	2406.0	2574.8	0.5764	7.6750	8.2515
10	45.81	0.001 010	14.67	191.82	2246.1	2437.9	191.83	2392.8	2584.7	0.6493	7.5009	8.1502
15	53.97	0.001 014	10.02	225.92	2222.8	2448.7	225.94	2373.1	2599.1	0.7549	7.2536	8.0085
20	60.06	0.001 017	7.649	251.38	2205.4	2456.7	251.40	2358.3	2609.7	0.8320	7.0766	7.9085
25	64.97	0.001 020	6.204	271.90	2191.2	2463.1	271.93	2346.3	2618.2	0.8931	6.9383	7.8314
30	69.10	0.001 022	5.229	289.20	2179.2	2468.4	289.23	2336.1	2625.3	0.9439	6.8247	7.7686
40	75.87	0.001 027	3.993	317.53	2159.5	2477.0	317.58	2319.2	2636.8	1.0259	6.6441	7.6700
50	81.33	0.001 030	3.240	340.44	2143.4	2483.9	340.49	2305.4	2645.9	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.78	0.001 037	2.217	384.31	2112.4	2496.7	384.39	2278.6	2663.0	1.2130	6.2434	7.4564

ANEXO B – Propriedades do vapor sobreaquecido

Tabela A-6 – Propriedades do vapor sobreaquecido **(continuação)**

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)	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/(kg · K)
	P = 4.0 MPa (250.40°C)				P = 4.5 MPa (257.49°C)				P = 5.0 MPa (263.99°C)			
Sat.	0.049 78	2602.3	2801.4	6.0701	0.044 06	2600.1	2798.3	6.0198	0.039 44	2597.1	2794.3	5.9734
275	0.054 57	2667.9	2886.2	6.2285	0.047 30	2650.3	2863.2	6.1401	0.041 41	2631.3	2838.3	6.0544
300	0.058 84	2725.3	2960.7	6.3615	0.051 35	2712.0	2943.1	6.2828	0.045 32	2698.0	2924.5	6.2084
350	0.066 45	2826.7	3092.5	6.5821	0.058 40	2817.8	3080.6	6.5131	0.051 94	2808.7	3068.4	6.4493
400	0.073 41	2919.9	3213.6	6.7690	0.064 75	2913.3	3204.7	6.7047	0.057 81	2906.6	3195.7	6.6459
450	0.080 02	3010.2	3330.3	6.9363	0.070 74	3005.0	3323.3	6.8746	0.063 30	2999.7	3316.2	6.8186
500	0.086 43	3099.5	3445.3	7.0901	0.076 51	3095.3	3439.6	7.0301	0.068 57	3091.0	3433.8	6.9759
600	0.098 85	3279.1	3674.4	7.3688	0.087 65	3276.0	3670.5	7.3110	0.078 69	3273.0	3666.5	7.2589
700	0.110 95	3462.1	3905.9	7.6198	0.098 47	3459.9	3903.0	7.5631	0.088 49	3457.6	3900.1	7.5122
800	0.122 87	3650.0	4141.5	7.8502	0.109 11	3648.3	4139.3	7.7942	0.098 11	3646.6	4137.1	7.7440
900	0.134 69	3843.6	4382.3	8.0647	0.119 65	3842.2	4380.6	8.0091	0.107 62	3840.7	4378.8	7.9593
1000	0.146 45	4042.9	4628.7	8.2662	0.130 13	4041.6	4627.2	8.2108	0.117 07	4040.4	4625.7	8.1612
1100	0.158 17	4248.0	4880.6	8.4567	0.140 56	4246.8	4879.3	8.4015	0.126 48	4245.6	4878.0	8.3520
1200	0.169 87	4458.6	5138.1	8.6376	0.150 98	4457.5	5136.9	8.5825	0.135 87	4456.3	5135.7	8.5331
1300	0.181 56	4674.3	5400.5	8.8100	0.161 39	4673.1	5399.4	8.7549	0.145 26	4672.0	5398.2	8.7055