



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE

Everton Pereira da Silva

**Desenvolvimento de combustível compactado derivado de biomassa e resíduos sólidos urbanos – estudo do efeito da composição da biomassa e da adição de glicerol como aglutinante**

Araranguá

2023

Everton Pereira da Silva

.

**Desenvolvimento de combustível compactado derivado de biomassa e resíduos sólidos urbanos – estudo do efeito da composição da biomassa e da adição de glicerol como aglutinante**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Energia e Sustentabilidade da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em  
Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Profa. Dra. Elaine Virmond

Coorientadora: Profa. Dra. Elise Sommer Watzko

Araranguá

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Silva, Everton Pereira da  
Desenvolvimento de combustível compactado derivado de  
biomassa e resíduos sólidos urbanos - estudo do efeito da  
composição da biomassa e da adição de glicerol como  
aglutinante / Everton Pereira da Silva ; orientadora,  
Elaine Virmond, coorientadora, Elise Sommer Watzko, 2024.  
107 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em  
Energia e Sustentabilidade, Araranguá, 2024.

Inclui referências.

1. Energia e Sustentabilidade. 2. Energia e  
Sustentabilidade. 3. Resíduos sólidos urbanos. 4. Recuperação  
energética. 5. Combustível derivado de resíduos. I. Virmond,  
Elaine. II. Watzko, Elise Sommer. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Energia e Sustentabilidade. IV. Título.

Everton Pereira da Silva

**Desenvolvimento de combustível compactado derivado de biomassa e resíduos sólidos urbanos – estudo do efeito da composição da biomassa e da adição de glicerol como aglutinante**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 31 de outubro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

**Profa. Elaine Virmond, Dra.**

**Universidade Federal de Santa Catarina**

**Profa. Maria Ángeles Lobo Recio, Dra.**

**Universidade Federal de Santa Catarina**

**Prof. Rennio Félix de Sena, Dr.**

**Universidade Federal da Paraíba**

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

---

**Coordenação do Programa de Pós-Graduação**

---

**Profa. Elaine Virmond, Dra.**

**Orientadora**

**Araranguá**

**2023**

Dedico este trabalho ao meu pai Jair (*in memoriam*),  
à minha mãe Neusa pelo incentivo aos estudos, à minha  
filha Tairine pela compreensão e à minha irmã Andressa  
pelas palavras de incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por oportunizar ter saúde e entusiasmo para realizar este trabalho. Minha família foi fundamental em todo o processo, e tenho um agradecimento especial a ela pela compreensão, participação e paciência. Citarei algumas pessoas fundamentais para minha vida e toda formação: minha filha, Tairine Nunes da Silva, pela compreensão e paciência, pois muitas vezes deixei de estar em sua presença por estar em função dos trabalhos da pesquisa: minha irmã, Andressa Pereira da Silva pela cooperação: minha mãe, Neusa Pereira da Silva e meu pai Jair da Silva (in memoriam), por sempre estarem ao meu lado nos desafios que a vida me proporcionou, por terem sido entusiastas em minha formação, pelos incentivos aos estudos, e por terem me ensinado que o estudo sempre foi o melhor caminho.

Quero agradecer também aos meus colegas do NUDAPE, Arthur, Joana, Márcia e Adilson pela cooperação nos estudos, e em especial, às minhas orientadora e co-orientadora, Elaine Virmond e Elise Sommer Watzko, respectivamente.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo financiamento do projeto de pesquisa (FAPESC/2021TR1505) que viabilizou a realização deste trabalho, e à UFSC, na figura do Programa de Pós-Graduação em Energia e Sustentabilidade – PPGES, pela formação.

## RESUMO

A importância da destinação adequada de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) vem sendo discutida há anos, e a necessidade de novas fontes de energia também, com destaque para a biomassa, que é um biocombustível. A proposta deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de glicerol como aglutinante na conformação de combustível derivado de RSU (papel/papelão, plásticos com alta maleabilidade e baixa densidade, e poliestireno expandido - EPS) e biomassa da rizicultura (casca e palha de arroz) e florestal (serragem de pinus e de eucalipto) no formato compactado (CDR). Análises físico-químicas dos resíduos foram realizadas para determinar a composição imediata (teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo) e elementar (teores de C, H, N, S e O); o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI); a concentração de cloro e de elementos-traço. Quatro composições (1, 2, 3 e 4) de CDR sem e com adição de glicerol como aglutinante (5,0% em relação à massa total de sólidos) foram testadas (S1, S2, S3 e S4; C1, C2, C3 e C4, respectivamente), com fração de rejeitos de RSU equivalente a 20% em massa de sólidos em cada composição: S1 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 12% casca de arroz e 68% palha de arroz); S2 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 40% serragem de pinus e 40% serragem de eucalipto); S3 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 80% serragem de pinus); S4 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 80% serragem de eucalipto); e C1 (14,97% papel/papelão, 3,50% plástico mole, 0,57% EPS, 11,43% casca de arroz e 64,76% palha de arroz); C2 (14,97% papel/papelão, 3,50% plástico mole, 0,57% EPS, 38,10% serragem de pinus e 38,10% serragem de eucalipto); C3 (14,97% papel/papelão, 3,50% plástico mole, 0,57% EPS, 76,19% serragem de pinus); C4 (14,97% papel/papelão, 3,50% plástico mole, 0,57% EPS, 76,19% serragem de eucalipto). A compactação das amostras de CDR ocorreu na temperatura de 100 °C e pressão aproximada de 46,9 MPa em escala de bancada. Os aspectos qualitativos dos CDR foram avaliados, incluindo: densidade energética, estabilidade dos compactados na exposição à umidade; resistência mecânica; resistência ao intemperismo. Todas as composições foram aprovadas no teste de resistência mecânica, apresentando perdas de massa inferiores a 10%, porém, as composições com biomassa da rizicultura (S1 e C1) apresentaram resultados significativamente diferentes, 3,29% e 0,65%, respectivamente, o que sugere que a adição do glicerol na amostra C1 interferiu positivamente na resistência mecânica dessa composição. A análise das propriedades físico-químicas das frações de materiais empregados e das composições de CDR estudadas demonstraram aumentos do poder calorífico dos combustíveis de aproximadamente 4% e 11% com a adição de 20% em massa de RSU à biomassa florestal e da rizicultura, respectivamente, baixa concentração de cloro, sendo que a maior concentração encontrada foi para a palha de arroz (0,69%, b.s.) e na composição S1 (0,49%, b.s.). As especificações da normatização brasileira para a aplicação de RSU para fins energéticos (ABNT NBR 16849/2020) em termos de teor de cloro e PCI foram atendidas. A caracterização do CDR compactado demonstrou a existência de limitações referentes à resistência ao intemperismo, mas o glicerol pode ser uma boa alternativa para melhorar a compactação de resíduos da rizicultura e, conseqüentemente, aumentar sua resistência física. Isso foi verificado apenas para as amostras de CDR contendo essa biomassa, o que indica a necessidade de continuidade do estudo da aplicação do glicerol como aglutinante. Este trabalho demonstrou que o CDR compactado é uma alternativa promissora para o aproveitamento de resíduos urbanos e agroflorestais, auxiliando nas questões sociais, econômicas e ambientais relacionadas aos impactos da destinação de RSU, e ofertando um combustível renovável para os setores energético e industrial.

**Palavras-chave:** Combustível derivado de rejeito; Recuperação energética; Combustível renovável.

## ABSTRACT

The importance of properly disposing of Municipal Solid Waste (MSW) has been discussed for years, as has the need for new sources of energy, especially biomass, which is a biofuel. The purpose of this work was to evaluate the effect of applying glycerol as a binder in the formation of fuel derived from MSW (paper/cardboard, plastics with high malleability and low density, and expanded polystyrene - EPS) and biomass from rice farming (rice husks and straw) and forestry (pine and eucalyptus sawdust) in compacted form (CDR). Physico-chemical analyses of the waste were carried out to determine the proximate composition (moisture, ash, volatile matter and fixed carbon contents) and elemental composition (C, H, N, S and O contents); the higher heating value (HHV) and lower heating value (LHV); the concentration of chlorine and trace elements. Four compositions (1, 2, 3 and 4) of CDR without and with the addition of glycerol as a binder (5.0% in relation to the total mass of solids) were tested (S1, S2, S3 and S4; C1, C2, C3 and C4, respectively), with a fraction of MSW waste equivalent to 20% by mass of solids in each composition: S1 (15.72% paper/cardboard, 3.68% soft plastic, 0.60% Styrofoam, 12% rice husk and 68% rice straw); S2 (15.72% paper/cardboard, 3.68% soft plastic, 0.60% EPS, 40% pine sawdust and 40% eucalyptus sawdust); S3 (15.72% paper/paperboard, 3.68% soft plastic, 0.60% EPS, 80% pine sawdust); S4 (15.72% paper/paperboard, 3.68% soft plastic EPS, 80% eucalyptus sawdust); and C1 (14.97% paper/cardboard, 3.50% soft plastic, 0.57% EPS, 11.43% rice husk and 64.76% rice straw); C2 (14.97% paper/cardboard, 3.50% soft plastic, 0.57% EPS, 38.10% pine sawdust and 38.10% eucalyptus sawdust); C3 (14.97% paper/cardboard, 3.50% soft plastic, 0.57% EPS, 76.19% pine sawdust); C4 (14.97% paper/cardboard, 3.50% soft plastic, 0.57% EPS, 76.19% eucalyptus sawdust). The CDR samples were compacted at a temperature of 100 °C and an approximate pressure of 46.9 MPa on a bench scale. The qualitative aspects of the CDR were evaluated, including: energy density, stability of the compacted materials when exposed to humidity; mechanical strength; resistance to weathering. All the compositions passed the mechanical strength test, showing mass losses of less than 10%, but the compositions with rice biomass (S1 and C1) showed significantly different results, 3.29% and 0.65% respectively, suggesting that the addition of glycerol to the C1 sample had a positive effect on the mechanical strength of this composition. Analysis of the physicochemical properties of the material fractions used and the CDR compositions studied showed increases in the calorific value of the fuels of approximately 4% and 11% with the addition of 20% by mass of MSW to the forestry and rhiziculture biomass, respectively, low chlorine concentration, with the highest concentration found was for rice straw (0.69%, b.s.) and in composition S1 (0.49%, b.s.). The specifications of the Brazilian standards for the application of MSW for energy purposes (ABNT NBR 16849/2020) in terms of chlorine content and PCI were met. The characterization of the compacted CDR showed that there were limitations in terms of resistance to weathering, but glycerol could be a good alternative for improving the compaction of rice waste and, consequently, increasing its physical resistance. This was only found for CDR samples containing this biomass, which indicates the need to continue studying the application of glycerol as a binder. This work has shown that compacted CDR is a promising alternative for using urban and agroforestry waste, helping with social, economic and environmental issues related to the impacts of disposing of MSW, and offering a renewable fuel for the energy and industrial sectors.

Keywords: Refuse-derived fuel; Energy recovery; Renewable fuel.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Coleta de RSU no Brasil e regiões: comparativo 2021 e 2022 .....	23
Figura 2: Decreto nº 11.403, de 13 de abril de 2022.....	25
Figura 3: Produção de grãos de arroz na safra 2022/2023 na microrregião de Araranguá.....	26
Figura 4: Ranking das microrregiões, área plantada (ha) de grãos de arroz.....	27
Figura 5: Reação de transesterificação .....	36
Figura 6: Fluxograma da produção de biodiesel pela rota de transesterificação .....	37
Figura 7: Fluxograma das composições do CDR compactado avaliadas .....	49
Figura 8: Fluxograma das etapas de desenvolvimento deste trabalho.....	50
Figura 9: Método de amostragem de rejeitos da triagem de RSU.....	51
Figura 10: Amostras de biomassas conforme recebidas, rizicultura à esquerda (palha e casca de arroz) e madeira à direita (pinus e eucalipto) .....	52
Figura 11: Propriedades físicas e químicas do glicerol.....	52
Figura 12: Materiais utilizados na preparação dos compactados .....	56
Figura 13: Prensa hidráulica utilizada no preparo das amostras de CDR compactado .....	58
Figura 14: Amostra na estufa, compartimento da prensa e controle de temperatura.....	58
Figura 15: Mapeamento do perfil de temperatura no interior da estufa .....	59
Figura 16: Perfil de temperatura da estufa empregada no pré-aquecimento das amostras de CDR antes da compactação.....	59
Figura 17: Medições no paquímetro e pesagem na balança para cálculo de densidade .....	62
Figura 18: Decomposição dos CDR mergulhados em água para teste de umidade .....	75
Figura 19: Resultados das médias de perda de massa e desvio-padrão das amostras de CDR compactado.....	77
Figura 20: Amostras de CDR compactado que apresentaram trincas C3 (pinus com adição de glicerol) .....	78
Figura 21: Resultados das médias de densidade e desvio-padrão das amostras de CDR compactado ..	80
Figura 22: Teste de intemperismo após 5, 10 e 14 dias de exposição, respectivamente .....	82

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Trabalhos consultados referentes a combustíveis derivados de resíduos com adição de aglutinantes .....	43
Tabela 2: Composições de CDR estudadas, valores percentuais em massa.....	49
Tabela 3: Metodologias da análise elementar dos componentes das amostras de CDR.....	54
Tabela 4: Resultados da análise elementar de alguns tipos de plásticos em percentual em massa.....	54
Tabela 5: Poder Calorífico Inferior de materiais plásticos.....	55
Tabela 6: Propriedades dos sólidos originais e das composições de CDR sem adição de glicerol estudadas: resultados das análises imediata, elementar, poder calorífico e elementos-traço .....	64
Tabela 7: Limites de cloro para classificação de RSU para fins energéticos no Brasil .....	71
Tabela 8: Limites para classificação de PCI do RSU para fins energéticos no Brasil segundo a norma NBR 16849/2020 .....	73
Tabela 9: Resultados PCI (ASTM D240/ NBR16849).....	74
Tabela 10: Resultados das medições de massas iniciais e pós-queda, e do cálculo da perda de massa e da resistência mecânica das amostras de CDR compactado. ....	76
Tabela 11: Resultados das medições de raio e altura, e do cálculo da densidade das amostras de CDR compactado.....	79
Tabela 12: Resultados de densidade (g/cm <sup>3</sup> ) (médias e desvio padrão) das amostras de CDR compactado.....	80
Tabela 13: Registro diário das condições climáticas e do aspecto das amostras durante o teste de intemperismo .....	81
Tabela 14: Comparação dos resultados dos parâmetros estudados para as amostras S e C.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB - Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis

ABRAF- Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CIDASC - Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina

CDR - Combustível Derivado de Resíduos

COPAGRO - Cooperativa Agropecuária de Tubarão/SC

COVID-19 - Infecção respiratória aguda causada pelo coronavírus

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPS - Poliestireno Expandido

FGV - Fundação Getúlio Vargas

FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IUPAC - União Internacional de Química Pura e Aplicada

ICP OES - Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado

LabSATC - Laboratório da Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

PCDD - Dibenzo-*p*-dioxinas policloradas

PCDF - Dibenzofuranos policlorados

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS - Poder Calorífico Superior

PE - Polietileno

PEBD - Polietileno de baixa densidade

PET - Polietileno tereftalato

PIB - Produto Interno Bruto

PLANARES - Plano Nacional de Resíduos Sólidos

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de vinila

SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

RSUE - Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TGA - Análise termogravimétrica (*Thermogravimetric analysis*)

VPA - Valor Patrimonial por Ação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
3.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	22
3.2	BIOMASSA DA RIZICULTURA.....	25
3.3	BIOMASSA FLORESTAL .....	28
3.3.1	<i>Resíduos de madeira de pinus.....</i>	<i>30</i>
3.3.2	<i>Resíduos de madeira de Eucalipto.....</i>	<i>30</i>
3.4	COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS COMPACTADOS .....	32
3.4.1	<i>Temperatura.....</i>	<i>33</i>
3.4.2	<i>Pressão.....</i>	<i>33</i>
3.4.3	<i>Teor de umidade .....</i>	<i>34</i>
3.4.4	<i>Granulometria das partículas.....</i>	<i>34</i>
3.4.5	<i>Utilização de aglutinantes .....</i>	<i>34</i>
3.4.5.1	<i>Glicerol.....</i>	<i>36</i>
3.5	CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS .....	38
3.6	OBTENÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE BIOMASSAS FLORESTAIS E DA RIZICULTURA E DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS .....	41
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
4.1	OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS .....	50
4.1.1	<i>Rejeitos da triagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) .....</i>	<i>50</i>
4.1.2	<i>Biomassa.....</i>	<i>51</i>
4.1.3	<i>Glicerol.....</i>	<i>52</i>
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DAS AMOSTRAS DE CDR .....	53
4.2.1	<i>Análise imediata.....</i>	<i>53</i>
4.2.2	<i>Análise elementar.....</i>	<i>53</i>
4.2.3	<i>Determinação do poder calorífico.....</i>	<i>55</i>
4.2.4	<i>Análise de elementos-traço.....</i>	<i>56</i>
4.3	PREPARAÇÃO DO MATERIAL A SER COMPACTADO .....	56
4.4	PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE CDR COMPACTADO .....	57

4.4.1	<i>Caracterização das amostras de CDR produzidas</i> .....	60
4.4.1.1	Teste de absorção de água.....	60
4.4.1.2	Teste de resistência mecânica .....	60
4.4.1.3	Densidade .....	61
4.4.1.4	Teste de resistência a intemperismo e umidade .....	62
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>63</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SÓLIDOS .....	63
5.1.1	<i>Análise imediata</i> .....	67
5.1.2	<i>Análise elementar</i> .....	69
5.1.3	<i>Análise de elementos-traço</i> .....	71
5.1.4	<i>Poder calorífico</i> .....	73
5.2	CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CDR .....	74
5.2.1	<i>Absorção de umidade</i> .....	74
5.2.2	<i>Teste de resistência mecânica</i> .....	75
5.2.3	<i>Densidade do compactado</i> .....	78
5.2.4	<i>Teste de intemperismo</i> .....	81
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>84</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b> .....	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>86</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Resíduo é tudo o que é gerado pela sociedade em atividades produtivas, domésticas e de lazer e descartado. Recentemente esse conceito começou a ser ampliado para um consumo consciente, ressaltando-se a necessidade de se respeitar a hierarquia do gerenciamento de resíduos, que prevê, nesta ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Isso implica numa exploração mais sustentável do meio ambiente, com a promoção da economia circular (ABNT, 2020).

A Lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, determinou que todas as administrações públicas municipais, independentemente do seu porte e localização, devem construir aterros sanitários e encerrar as atividades dos lixões e aterros controlados, substituindo-os por aterros sanitários ou industriais, onde só poderão ser depositados resíduos sem qualquer possibilidade de reciclagem e reaproveitamento, obrigando também a compostagem dos resíduos orgânicos.

Segundo os dados apurados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2022), a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) nos domicílios brasileiros registrou, em 2022, 81,8 milhões t/ano, e média de 1,043 kg/hab.dia.

A região brasileira com maior geração de resíduos nesse ano foi a Sudeste, com cerca de 111 mil t/dia (aproximadamente 50% da geração do país) e uma média de 450 kg/hab.ano, enquanto a região Centro-Oeste representou pouco mais de 7% do total gerado, com cerca de 6 milhões de t/ano, a menor dentre as regiões brasileiras. Em termos de geração diária por habitante, as regiões demonstram variações, com a região Sudeste apresentando uma geração média de 1,234 kg/hab.dia, a maior do país e, na outra ponta, a região Sul com uma média de 0,776 kg/hab.dia (ABRELPE, 2022).

No âmbito agroindustrial, o Brasil dispõe de um quantitativo muito grande de resíduos florestais e também da rizicultura que podem ser aproveitados e transformados em energia limpa. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), informação de extrema relevância nos tempos atuais é a de que a produtividade do eucalipto atingiu seu maior nível desde 2014, chegando a 38,9 m<sup>3</sup>/ha.ano em 2021. O pinus, por sua vez, totalizou 29,7 m<sup>3</sup>/ha.ano. Esses números superam as médias globais e demonstram, a partir do Brasil, que conhecimento e tecnologia são propulsores de uma agricultura moderna (IBÁ, 2022). O setor de árvores plantadas também contribui com a economia local. O cultivo de florestas para fins industriais ocorre em mais de 1.000 municípios em todo o Brasil, majoritariamente em regiões afastadas

dos grandes centros, e tem impulsionado o desenvolvimento regional. O IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) dos municípios com atuação do setor é mais alto do que a média dos estados. As empresas do setor são responsáveis pela geração de 74,6% da energia elétrica que utilizam e 88% da energia gerada pelo setor vem de fontes renováveis, como biomassa e licor negro, trazendo à prática o conceito da economia circular (IBÁ, 2022).

Conforme dados da Companhia Integrada de Desenvolvimento Agrícola de Santa Catarina (CIDASC) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), a produção catarinense de arroz é a segunda maior do país, chegando a 1,25 milhões de toneladas nas safras 2019/2020 e 2021/2022, o que representa 11% do total nacional. A produtividade média nessas safras foi de 8,4 t/ha, com um incremento de aproximadamente 9% em relação ao período agrícola anterior. O arroz irrigado é produzido em 93 municípios catarinense, concentrados no Litoral Sul (61,9%), Médio/Baixo Vale do Itajaí e Litoral Norte (25,2%), Alto Vale do Itajaí (9,04%) e Litoral Centro (3,9%). O grão ocupou o oitavo lugar no Valor Patrimonial por Ação (VPA) do Estado em 2020, com cerca de R\$1,25 bilhão (CIDASC, 2021; EPAGRI, 2023).

Enquanto a área plantada com arroz variou pouco nos últimos 10 anos, cerca de 5% entre o ano com maior área e o ano com menor, a produtividade do arroz irrigado catarinense, por hectare, cresceu mais de 23%. Praticamente com a mesma área plantada, a produção total aumentou em mais de 232 mil toneladas da safra 2012/2013 para a safra 2021/2022. Os dados são do Observatório Agro Catarinense (EPAGRI, 2023). Em 2022, o valor das exportações de arroz e derivados, de Santa Catarina, foi de aproximadamente US\$ 4,08 milhões, resultado da comercialização de 8,6 mil toneladas. Já o valor das importações, no acumulado do ano, chegou a US\$ 12,7 milhões e a 28 mil toneladas de arroz. A entrada do produto se dá principalmente do Uruguai e do Paraguai (EPAGRI, 2023).

A produção de resíduo sólido da rizicultura equivale a aproximadamente 1 tonelada de palha por tonelada de grão colhido, e para a casca de arroz os valores encontrados são da ordem de  $0,20-0,27 \text{ t}_{\text{casca}}/\text{t}_{\text{arroz}}$  (NOGUEIRA E LORA, 2002; KLEVESTON, 2011; PERS, 2018), sendo o valor de 20% o mais adotado.

Embora combustíveis compactados sejam atualmente produzidos principalmente a partir de biomassas, combustível derivado de RSU e biomassa compactado representam uma boa alternativa para o aproveitamento desses sólidos combustíveis (FAIZAL *et al.*, 2016; GARRIDO *et al.*, 2017). Estudos apontam que os péletes obtidos a partir dessas matérias-primas são altamente densos e com teor de umidade muito baixo (<10%), com alta eficiência de conversão (cerca de 75%). A geometria regular e o tamanho padrão permitem

armazenamento compacto, manuseio conveniente e alimentação automática em operações unitárias de grande escala (GUG *et al.*, 2015).

Um dos fatores limitantes na compactação é o teor de umidade dos sólidos, que podem necessitar de secagem ou mistura entre sólidos com diferentes teores de umidade. A secagem aumenta o consumo de energia que, por sua vez, aumenta o custo de produção do combustível compactado. Esse fator reforça a necessidade de combinação de RSU secos (como plásticos e papel) com madeira ou outras biomassas para formulação de péletes. Tumuluru *et al.* (2011) investigou o impacto de umidade, pressão e temperatura na densidade e resistência mecânica de péletes de biomassa, mas há poucos trabalhos relatando essa relação de otimização para péletes de composição mista de biomassa e RSU.

Efeitos das condições de processamento e da adição de plásticos nas propriedades do CDR, particularmente a relação da adição de plásticos e do teor de umidade na adesão das partículas; adição (ou não), tipo e concentração de aglutinante; tempo de residência do processo de compactação; e outros fatores devem ser estudados para encontrar as condições ideais do processo de adensamento e produzir péletes com a mais alta densidade energética possível, e com boa resistência mecânica (EMBRAPA, 2012).

O glicerol, um subproduto da transesterificação de triglicerídeos para a produção de biodiesel, é formado na proporção de 10% em relação ao total de biodiesel produzido. Esse subproduto pode ser transformado em produtos de maior valor, como produtos cosméticos e outros, mas, para isso, o glicerol precisa ser refinado, cujo custo é bastante alto. Como resultado do alto custo de purificação do glicerol, os usos alternativos do glicerol têm sido estudados. Um dos usos alternativos para a produção de combustíveis (ASAVATESANUPAP *et al.*, 2010). Kung-Hae *et al.* (2006), Bala-Litwiniak e Radomiak (2019) e Bala-Litwiniak (2020) estudaram a viabilidade da produção de combustível sólido a partir de serragem e glicerol bruto e a combustão desse combustível alternativo.

Dado que o mundo consome cada vez mais energia e isso impacta diretamente os ecossistemas terrestres, não há mais espaço para a economia linear, baseada em exploração, produção, consumo e descarte. Além de priorizar a bioeconomia sustentável, os recursos precisam ser usados de forma inteligente para minimizar a pressão sobre o capital natural e isso se dá por meio da economia circular. O uso de resíduos como matéria-prima para fabricação de novos produtos agrega valor, cria oportunidades por meio da inovação, reduz a pressão por novos recursos e estimula o empreendedorismo (IBÁ, 2021).

Nesse contexto, desenvolver combustível derivado de biomassa e RSU, visando reduzir a quantidade de resíduos destinada a aterro sanitário, oferecendo assim tratamento

alternativo para RSU com foco no aproveitamento de frações não recicláveis ou com processo de reciclagem ainda não disponível ou acessível atualmente (rejeitos), e à recuperação energética desses, é uma opção que precisa ser explorada. Esse tratamento alternativo poderá ser integrado a práticas atuais de tratamento de RSU por empresas de saneamento (aterros sanitários), possibilitando ampliar a gama de processos e produzir um combustível misto derivado de resíduo para uso pelo próprio produtor, que poderá gerar energia térmica e elétrica para suprir sua própria demanda ou externa, ou então ser comercializado, gerando receita adicional a partir do que antes era simplesmente aterrado. Oportuniza-se ainda oferta de novo combustível para o setor energético e industrial, com potencial impacto positivo por meio da substituição de combustíveis fósseis por combustível em parte renovável, com potenciais ganhos de eficiência energética e redução da emissão de poluentes.

## 2 OBJETIVOS

Preparar e estudar as propriedades de combustíveis compactados derivados de RSU e biomassa da rizicultura ou florestal com e sem adição de glicerol como aglutinante.

E os objetivos específicos definidos foram os seguintes:

- Caracterizar amostras de frações de rejeitos da etapa de triagem de RSU, de biomassas da rizicultura e florestal do sul de Santa Catarina quanto às propriedades físico-químicas e realizar análise comparativa.
- Preparar e caracterizar amostras de combustível compactado derivado de misturas de biomassas da rizicultura e florestal com frações de rejeitos da etapa de triagem de RSU em diferentes composições, com e sem adição de glicerol como aglutinante.
- Avaliar o efeito da aplicação de glicerol como aglutinante na conformação de combustível no formato compactado derivado de biomassa da rizicultura, florestal e rejeitos de RSU.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Uma das maiores preocupações da sociedade é a geração excessiva de resíduos sólidos e a sua destinação final. O crescimento acelerado da quantidade desses resíduos, o seu descarte inapropriado e a poluição causada pela disposição final mais comum geram muitas preocupações ambientais e econômicas.

Muitas ações vêm sendo realizadas para a redução da geração desses resíduos, como o reaproveitamento, a compostagem, a coleta seletiva, entre outras alternativas que visam à diminuição de impactos negativos ao meio ambiente.

A literatura científica tem apresentado evidências de que o descarte inapropriado de resíduos contribui gradativamente para o efeito estufa e o aquecimento global, ocasionando a degradação do solo, comprometendo os corpos d'água e mananciais, intensificando a ocorrência de enchentes, contribuindo para a poluição do ar e para a proliferação de vetores de importância sanitária (BESEN *et al.*, 2010).

O aumento da geração de RSU junto aos processos de urbanização das cidades cria um problema imenso e bastante discutido. Esses resíduos são provenientes de atividades domésticas; da varrição, limpeza de logradouros em vias públicas; além de outros serviços de limpeza urbana (DIAS, 2003).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 (BRASIL, 2010), a gestão integrada de resíduos sólidos é caracterizada como o conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para esses resíduos, considerando as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

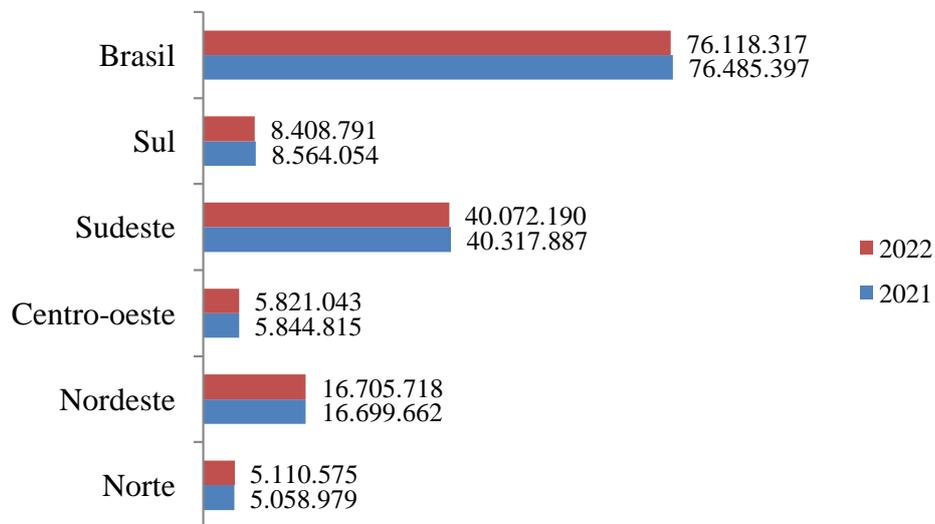
De acordo com Almeida (2008), os RSU apresentam-se com grande diversidade em sua composição. Suas características físicas, químicas e biológicas variam de acordo com a sua fonte ou atividades geradoras.

As práticas de saneamento no Brasil apresentam cenário dramático. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2023), a geração de RSU no Brasil no ano 2022 alcançou um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a 224 mil toneladas diárias. Com isso, cada brasileiro produziu, em média, 1,043 kg/dia. Com relação à coleta de RSU, em 2022, foram coletadas

76,1 milhões de toneladas, o que equivale a uma cobertura de coleta de 93% (ABRELPE, 2022).

Em 2022, o mundo viveu a retomada das atividades pós-pandemia da COVID-19, com diferentes dinâmicas em comparação ao ano de 2021. No setor de limpeza urbana e manejo de resíduos, a flexibilização das medidas de distanciamento e isolamento social e o fim das restrições que ainda perduravam em alguns setores, por exemplo, de comércio, alimentação, educação e entretenimento, impactaram diretamente a geração e descarte dos materiais (ABRELPE, 2022). Na Figura 1 pode-se verificar o comparativo da coleta de RSU em 2021 e 2022.

Figura 1: Coleta de RSU no Brasil e regiões: comparativo 2021 e 2022



Fonte: Adaptado de Abrelpe (2022)

A PNRS indica que a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos devem garantir a maior reintegração dos resíduos ao sistema produtivo, promovendo a ordem de prioridades de: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010). No entanto, no Brasil, atualmente, a maior parte dos RSU coletados (61%) é encaminhada para aterros sanitários, com 46,4 milhões de toneladas enviadas para destinação considerada ambientalmente adequada em 2022. Por outro lado, áreas de disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados, ainda seguem em operação em todas as regiões do país e receberam 39% do total de resíduos coletados, alcançando um total de 29,7 milhões de toneladas (ABRELPE, 2022).

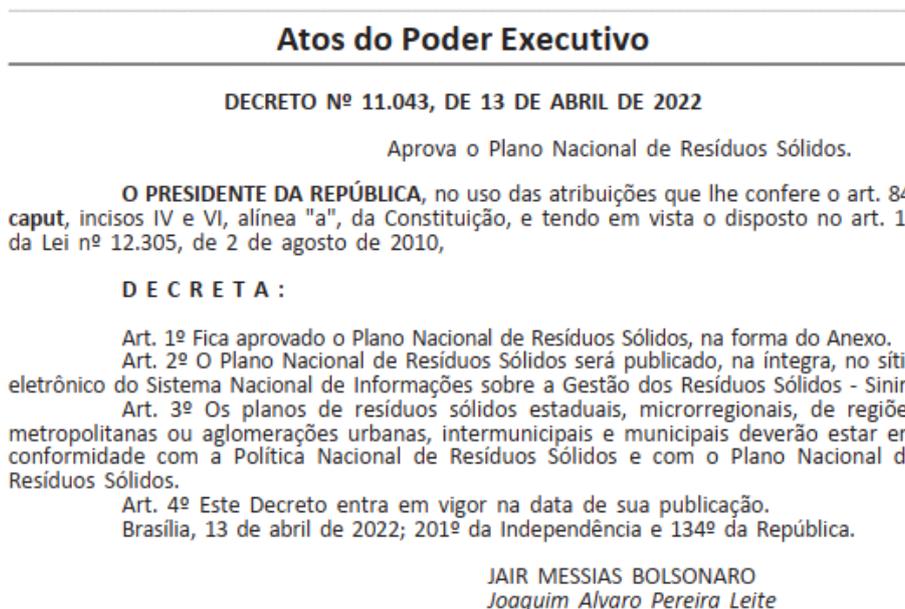
O Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – Resíduos Sólidos (SNIS-RS), em 2020, reuniu informações de 5.018 unidades de processamento de resíduos sólidos em operação nesse ano. Elas foram destino de 92,7 milhões de toneladas de massa de resíduos sólidos, sendo 67,6 milhões de toneladas para unidades de disposição no solo: aterro sanitário (49,4 milhões de toneladas), lixão (10,2 milhões de toneladas) e aterro controlado (8,0 milhões de toneladas) (SNIS, 2022).

Estratégias de conversão de resíduos em energia representam uma alternativa ao aterramento e apresentam muitas vantagens, como promover o desenvolvimento da economia circular, diminuir os problemas relacionados ao aterramento, aumentar a eficiência no uso de recursos e permitir a substituição parcial dos combustíveis fósseis por fontes baratas e renováveis. Os resíduos apresentam ampla disponibilidade e produção contínua, o que possibilita reduzir a dependência de combustíveis fósseis, além de promover a diversificação das fontes de energia (SEVER AKDAG *et al.*, 2016).

Tramitam atualmente na Câmara dos Deputados cinco propostas (PLs 2581/19, 5697/19, 3062/19, 513/20 e 924/22) para alteração da PNRS, todas tratando de recuperação energética de resíduos sólidos. Essas propõem incentivos fiscais para empresas de reciclagem ou limpeza urbana que possuam usina de geração de energia a partir de RSU. Os incentivos somente poderão ser concedidos às empresas localizadas em municípios que mantenham uma política pública de apoio às cooperativas e associações de coleta seletiva de resíduos sólidos (CÂMARA DOS DEPUTADOS, 2022).

Recentemente entrou em vigor o Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, que aprovou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Figura 2), tendo em vista o disposto no Art. 15 da Lei nº 12.305. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) traz diretrizes, estratégias, ações e metas para modernizar a gestão de resíduos sólidos no país, de forma a colocar em prática os objetivos previstos na PNRS (MMA, 2022).

Figura 2: Decreto nº 11.403, de 13 de abril de 2022



Fonte: Diário Oficial da União (2022)

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da mesma forma que as energias eólicas e solares se expandiram nos últimos anos, espera-se que a gestão e a exploração do potencial energético dos resíduos sólidos caminhem no mesmo sentido. Manter expansão das energias renováveis no Brasil é fundamental frente à previsão de mais de R\$ 565 bilhões em novas obras do setor que se projeta até 2030 (ANEEL, 2021).

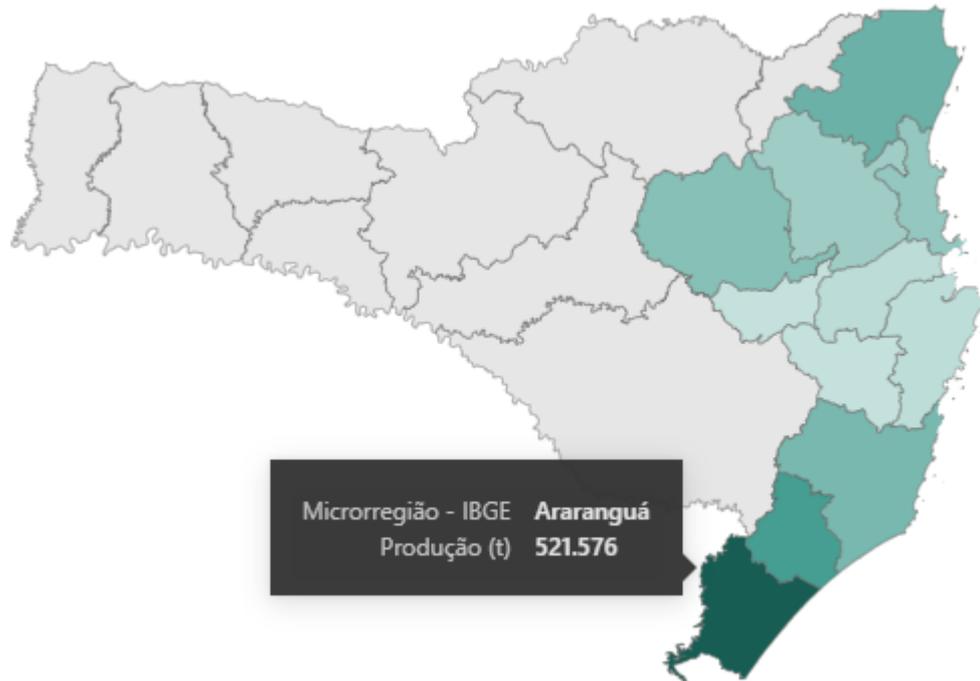
### 3.2 BIOMASSA DA RIZICULTURA

O arroz é responsável por cerca de 20% de todos os grãos demandados no mundo, perdendo apenas para o trigo. Uma região de destaque na produção de arroz é o sul do Brasil, dadas as condições, como clima subtropical que garante chuvas constantes durante o ano, tipo de solo e relevo extremamente favorável para plantio em área alagadas. Há duas maneiras de cultivar o arroz: arroz de terras altas, conhecido como arroz de sequeiro; arroz de várzea, que é cultivado em ambiente aquático, que é o predominante no Brasil.

A safra 2022/2023 de arroz irrigado em Santa Catarina teve um desempenho acima do esperado. Conforme dados levantados pelo Centro de Socioeconômica e Planejamento Agrícola (EPAGRI/CEPA), a quantidade total produzida chegou a 1,27 milhões de toneladas, a maior já registrada no Estado. O fator primordial para esse resultado foi a produtividade, que também foi recorde: a média ficou em 8,6 mil quilos por hectare (EPAGRI, 2023). Conforme dados do Observatório AgroCatarinense (2023) sobre a produção de grãos de arroz

na safra 2022/2023, o estado produziu 1.264,922 toneladas, sendo 521,576 toneladas na microrregião de Araranguá (Figura 3).

Figura 3: Produção de grãos de arroz na safra 2022/2023 na microrregião de Araranguá



Fonte: Observatório Agro Catarinense (2023)

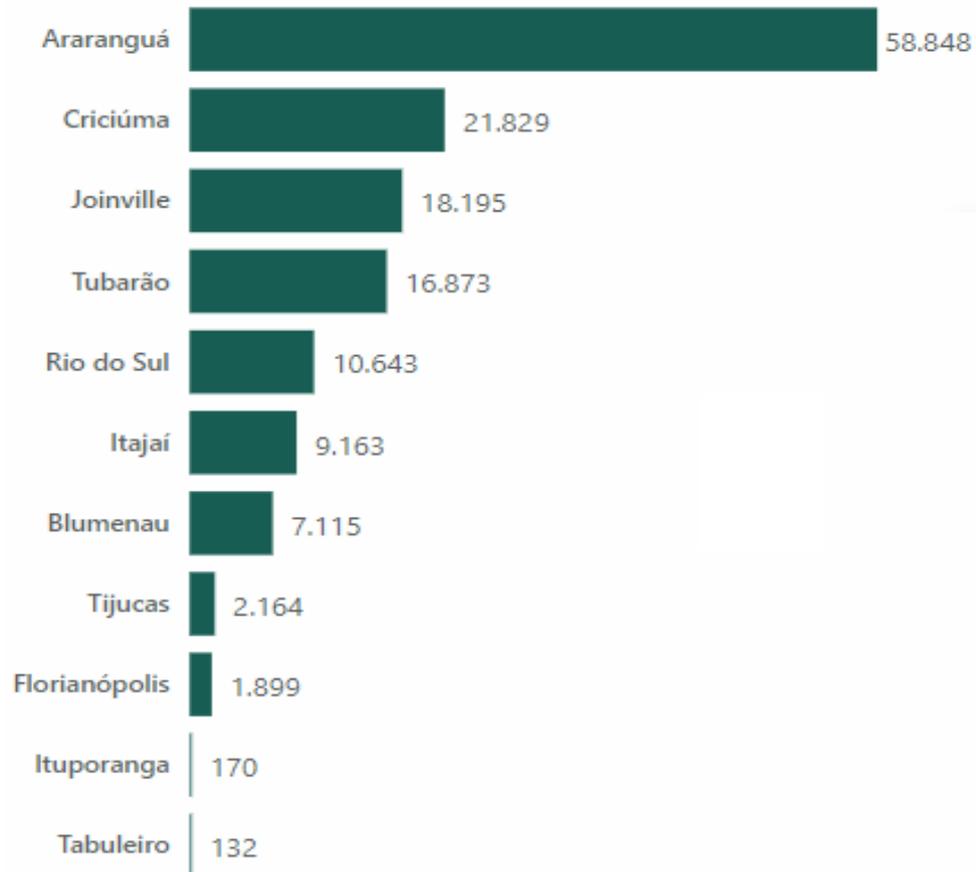
Os 147,031 hectares de arroz estão distribuídos por 11 regiões do Estado (Figura 4). A região de Araranguá, com 58.848 hectares cultivados, tem a maior concentração da cultura, representando 40,02% da área cultivada com o grão em Santa Catarina. Em seguida aparecem as regiões de Criciúma, Tubarão e Joinville, que juntas somam a mesma área de Araranguá. Rio do Sul, Itajaí, Blumenau, Tijucas, Florianópolis, Ituporanga e Tabuleiro completam, nesta ordem, o ranking das regiões arroeiras do estado (OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE, 2023).

O processo de beneficiamento do arroz gera uma série de resíduos, ou coprodutos, com alguns possuindo valor comercial. Assim, os principais resíduos desse processo são: a casca, palha, farelo e os grãos quebrados (quirera) (LORENZETT *et al.*, 2012).

A casca representa o maior volume entre os subgrupos obtidos durante o beneficiamento do arroz, chegando, em média, a 22% em volume. Sua utilização é bastante variada, sendo a principal a produção de energia em temperaturas de até 1000 °C. É usada em fornalhas, secadores e autoclaves da própria indústria arroeira. A casca do arroz,

normalmente, é composta de proteína (2,0-2,8%), gordura (0,3-0,8%), fibras (34,5-45,9%), cinzas (13,2-21,0%) e carboidratos (22,0- 34,0%) (LORENZETT *et al.*, 2012).

Figura 4: Ranking das microrregiões, área plantada (ha) de grãos de arroz



Fonte: Observatório Agro Catarinense (2023)

A palha de arroz é um material fibroso, obtido dos rejeitos da máquina de coleta do grão de arroz e de parte da planta que não é retirada do solo na colheita (MIYAKE, 2011). Autores afirmam que o resíduo da queima da casca possui alto valor de sílica (a casca do arroz possui até 15% em massa de sílica) (FERNANDES *et al.*, 2014).

Os resíduos de casca de arroz, se não forem devidamente descartados, causam grandes impactos ambientais, devido à sua lenta degradação. A partir disso surgiram algumas alternativas de descarte sustentável, como na utilização de biomassa destinados a adubos para hortas e pomares e para geração de energia (NUNES *et al.*, 2017)

Um dos fatores que limitam o uso de certos resíduos agrícolas como combustíveis é o alto teor de umidade, que pode exceder 50% em alguns casos. Esses resíduos requerem

secagem ou devem ser misturados com outras matérias-primas para viabilizar essa aplicação (TUMULURU *et al.* 2011; KAZIMIERZ *et al.*, 2020).

### 3.3 BIOMASSA FLORESTAL

A utilização de biomassa para geração de eletricidade ocorre há muito tempo. Nos últimos anos, o interesse em biomassa compactada na forma de péletes e briquetes cresceu muito, pois uma das dificuldades logísticas relacionadas à aplicação de biomassa como fonte de energia é a sua baixa densidade energética. Quando compactada, a densidade energética aumenta, diminuindo-se significativamente o volume para transporte e armazenamento (TRUGILHO, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2015).

O setor florestal representa 1,25% do PIB nacional e 6,9% do PIB industrial, com receita bruta de R\$ 97,4 bilhões de reais, gerando 3,75 milhões de empregos diretos e indiretos (BROTO, 2022). A indústria de base florestal representa expressiva participação no conjunto da economia nacional. A participação dos produtos madeireiros segue preponderante nesse setor, representando 95,6% do valor da produção no ano 2021. O conjunto dos produtos madeireiros com origem em áreas plantadas para fins comerciais registrou aumento de 23,7% no valor da produção, enquanto naqueles decorrentes da extração vegetal o aumento foi de 37,9%. Esses resultados ratificam a tendência de crescimento dos madeireiros oriundos da silvicultura e registram grande aumento de madeireiros da extração em 2021 (IBGE, 2022).

O Brasil possui 9 milhões de hectares plantados de eucalipto, pinus e demais espécies para a produção de painéis de madeira, pisos laminados, celulose, papel, produção energética e biomassa. As árvores plantadas são responsáveis por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país – os demais 9% vêm de florestas naturais legalmente manejadas. Em 2022, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), foram produzidas quase 25 milhões de toneladas da matéria-prima, um recorde histórico para o Brasil (IBÁ, 2023).

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis (ABIB Brasil), a cobertura florestal (florestas e outras vegetações naturais) de Santa Catarina é de aproximadamente 3 milhões de hectares, o que equivale a 37% do território do estado, e as florestas plantadas ocupam 5% desse território. Em Santa Catarina o setor ocupa pouco mais de 1 milhão de hectares de área com árvores cultivadas, 713 mil hectares com pinus e 316 mil com eucalipto, espécies florestais mais plantadas no Brasil. Outros 680 mil hectares estão protegidos e preservados por empresas que possuem florestas plantadas, o que

representa mais de 30% de toda a cobertura nativa no estado. A produção de madeira a partir de plantios florestais em Santa Catarina está em torno de 34 milhões de metros cúbicos por ano. Desse total, 21,7 milhões de m<sup>3</sup> são da madeira produzida em plantios de pinus e 12,3 milhões de m<sup>3</sup> são de madeira de eucalipto. A produção catarinense representou 11% do total produzido no país em 2021, com isso, o estado ocupa a quarta posição entre os maiores produtores nacionais (ABIB, 2023).

Percebe-se que o potencial brasileiro em termos de geração de energia a partir de biomassa florestal e agrícola é interessante porque o país tem características diferenciadas e produtividade superior comparado a outros países. A biomassa florestal para geração de energia pode ser obtida na colheita, em tratamentos silviculturais, no processamento da madeira ou de florestas energéticas (PINHEIRO; SAMPAIO, 2001; SPANHOL *et al.*, 2015).

O uso energético da madeira pode trazer grande contribuição à produção de energia, pois pode-se obter a partir dela combustíveis sólido, líquido e gasoso para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica (BRITO, 2007).

Os resíduos que se originam do processamento da madeira (folhas e galhos de árvores, móveis usados, artigos de madeira, moirões, estacas), e também bagaço de cana, palha de arroz, são resíduos lignocelulósicos, que são assim denominados porque contêm em sua composição lignina e celulose. Esses resíduos representam a fração mais expressiva da biomassa vegetal, sendo a maior fonte de compostos orgânicos da biosfera (CHRISOSTOMO, 2011). Esses se apresentam em formas e granulometrias das mais variadas, apresentando baixa densidade e alto teor de umidade (QUIRINO, 2003).

Segundo Acioli (1994), a indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos, resultando em serragens, maravalhas, costaneiras, aparas, pó de serra, etc. Os principais problemas relacionados à utilização de resíduos industriais e florestais para produção de energia estão relacionados, principalmente, à baixa densidade energética, às dimensões e volumes variados, à alta higroscopicidade e ao alto teor de umidade (SANTOS *et al.*, 2013). Uma das formas de solucionar esses problemas e melhorar as propriedades dos resíduos é a densificação da biomassa, ou seja, produção de materiais sólidos de tamanho médio com alta concentração de energia denominados briquetes ou péletes (CARVALHO *et al.*, 2013).

A lignina é um dos principais constituintes da madeira, sua função biológica é proteger o tecido vegetal contra a oxidação e a ação de microrganismos. Essa fração está presente em muitas espécies vegetais com teores que variam de 15% a 36%, e não possuem a mesma estrutura química em todas elas. Portanto, a lignina não deve ser considerada como uma

substância química única (de estrutura definida), mas sim, como uma classe de materiais correlatos, constituída de carbono, hidrogênio e oxigênio, o que faz dela uma importante fonte desses elementos (THERMOWOOD HANDBOOK, 2003).

### **3.3.1 Resíduos de madeira de pinus**

O pinus é muito utilizado no Brasil, não só pela indústria, mas também pela construção civil, há uma oferta muito grande, pois, cresce muito rápido em regiões tropicais. A sua madeira é usada, principalmente, pelas indústrias de madeira serrada e laminada, chapas, resina, celulose e papel. Nas décadas de 1970 e 1980, as plantações florestais desse gênero foram as principais fontes de matéria-prima para desenvolvimento da indústria florestal, abastecendo um mercado altamente diversificado.

Uma floresta de pinus tem grande importância no cenário nacional. Atualmente, são cerca de 2 milhões de hectares plantados, sendo 48% dessa área localizada na região sul do país, que possui 87% dos plantios nacionais, totalizando quase 2 milhões de hectares. Somente Santa Catarina possui 713 mil hectares de florestas plantadas com pinus (APRE, 2023). O gênero pinus é nativo do hemisfério norte e muito distribuído ao redor do mundo. O Brasil é o principal exportador mundial de celulose e referência global no cultivo do pinus. Devido às condições edafoclimáticas favoráveis, o prazo para o primeiro corte varia de 7 a 10 anos da data do plantio, tempo esse duas vezes e meia inferior quando comparado ao dos demais países produtores (BROTO, 2022). A presença do pinus na economia de Santa Catarina se destaca em todas as etapas. Da biomassa, serrados, celulose até portas e móveis. No conjunto, são 9.400 empresas ligadas ao setor de base florestal, que oferecem 103 mil empregos diretos, de acordo com dados da STCP Consultoria (APRE, 2023). Santa Catarina está em segundo lugar quando comparada com maiores plantios de pinus do país.

### **3.3.2 Resíduos de madeira de Eucalipto**

O cultivo de eucalipto na região sul do Brasil apresenta particularidades que o tornam diferenciado comparativamente ao praticado em outras regiões do território nacional. O rigor climático e a dificuldade de se trabalhar com clones, entre outros aspectos, atuam desfavoravelmente (EMBRAPA, 2021). Diversas unidades experimentais para as espécies de eucalipto foram implantadas há pouco mais de três décadas em várias localidades da região

sul pela Embrapa Florestas, a maioria delas mediante o estabelecimento de parcerias com empresas privadas. O uso da madeira para energia é um componente de vital importância no suprimento de energia primária, especialmente no uso doméstico e industrial (QUIRINO *et al.*, 2003). A grande maioria das espécies de eucalipto são nativas da Austrália, evoluíram num ambiente bastante quente e seco, por isso, se adaptam a vários tipos de clima. As folhas produzem óleos com cheiro bem característico, que tem função primária de afastar insetos e animais herbívoros. O eucalipto tem grande importância comercial na economia brasileira.

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE), a área estimada de florestas plantadas totalizou, em 2021, 9,5 milhões de hectares, dos quais 70,1% estão concentrados nas regiões sul e sudeste. Conforme as pesquisas, em 2021, estavam plantadas, no Brasil 7,3 milhões de hectares de eucalipto e 1,8 milhão de pinus. As áreas com cobertura de eucalipto corresponderam a 76,9% das florestas plantadas para fins comerciais, enquanto 45,4% das áreas de eucalipto concentraram-se no Sudeste, observou-se predominância de florestas de pinus, correspondentes a 83,9%, no Sul (IBGE, 2022).

O eucalipto se tornou uns dos cultivos mais valiosos atualmente, é uma árvore que cresce rápido, adaptável em vários climas e da qual se aproveita quase tudo, desde as folhas para extração dos óleos essenciais, a casca e o tronco como fonte de celulose, madeira, lenha e carvão. A transformação industrial da madeira em cavacos ou briquetes permite a utilização em estufas, caldeiras ou fornos com temperatura controlada. Os resíduos de galhadas podem ser convertidos em briquetes, gerando melhor aproveitamento das árvores colhidas. Agroindústrias, granjas e indústrias utilizam esses produtos para diversos fins. A casca do eucalipto é uns dos resíduos que também pode gerar etanol para combustível (EMBRAPA, 2019).

Atualmente já não é mais encontrado somente na Austrália, existem florestas, em pelo menos 90 países, depois da Austrália o país que mais há florestas de eucalipto no mundo é o Brasil, onde é considerada uma espécie exótica. A indústria madeireira tem a característica de gerar grandes volumes de resíduos no processo de beneficiamento de madeira. Essa geração ocorre nos processos normais ou mesmo antes da madeira ser introduzida no processo propriamente dito, por não atenderem às exigências do mercado consumidor, tornando-se resíduo, juntamente com as serragens, maravalhas, costaneiras, aparas, pó de serra etc. (PEREIRA JUNIOR, 2001).

### 3.4 COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS COMPACTADOS

Nos últimos anos o uso de péletes (do inglês *pellets*) e briquetes tornou-se comum na produção de biocombustíveis a partir de biomassa. Os briquetes são blocos de madeiras trituradas e compactadas, sua utilização é semelhante ao da lenha tradicional, péletes são pequenos com milímetros de diâmetro.

A briquetagem de biomassa é uma prática muito antiga e uma das diversas técnicas que em termos gerais são classificadas como tecnologia de compactação. O processo de briquetagem consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade. A matéria-prima pode ser proveniente de diversas fontes: resíduos florestais, industriais ou agrícolas e de plantações energéticas (BRASIL BIOMASSA, 2023). A briquetagem da biomassa é um processo de densificação capaz de produzir um material compacto com maior densidade energética (relação energia por unidade de volume) (TUMULURU *et al.*, 2011; REZAEI *et al.*, 2020; SONG *et al.*, 2021). Além disso, a densificação melhora o manuseio e reduz os custos de transporte, produzindo um combustível uniforme, limpo e estável (SING *et al.*, 2012; REZAEI *et al.*, 2020; SONG *et al.*, 2021). FAIZAL *et al.*, 2016; SRIVASTAVA *et al.*, 2014; AUPRAKUL *et al.* (2019).

É possível economizar energia com gerenciamento integrado de RSU, conservando aquela decorrente da redução do consumo, reutilizando ou usando materiais recicláveis no processo de produção, através da queima de resíduos (GONÇALVES, 2019). Os briquetes foram criados em função da demanda por um novo tipo de combustível compactado com alta densidade energética, para o transporte a maiores distâncias, otimização do armazenamento e principalmente para o uso em equipamentos de queima mais modernos (PROTÁSIO *et al.*, 2015).

Além das características físico-químicas, alguns fatores influenciam na produção dos compactados. As características e qualidade dos briquetes podem ser influenciadas por variáveis relacionadas à matéria-prima (granulometria, composição química da biomassa, teor de umidade etc.) e ao processo de produção (pressão, temperatura etc.) (FURTADO *et al.*, 2010). Os melhores resultados obtidos por Machado (2022) no desenvolvimento do combustível compactado foram na temperatura de conformação de 100 °C e com um percentual de 20% de RSU na mistura, tanto para a maior densidade, quanto para a maior resistência mecânica das peças. A adição de RSU promoveu, para algumas amostras, além de uma melhor resistência mecânica, um maior poder calorífico (17,3 MJ/kg), bem próximo ao

do carvão mineral típico da região sul de Santa Catarina (18,3 MJ/kg). Em contrapartida, Machado (2022) verificou que os compactados apresentaram baixa resistência à umidade, deteriorando-se após algum tempo de contato com a água, sendo esse um ponto cujo estudo foi recomendado para trabalhos futuros.

O teor de cinzas é crescente sempre que se aumenta o percentual de RSU adicionado à madeira na composição do briquete e, conseqüentemente, o inverso ocorre em relação ao teor de combustíveis (GONÇALVES *et al.* 2009). Os ligantes melhoram a característica de ligação da biomassa e produzem um produto mais durável.

A seguir discorre-se sobre alguns dos principais fatores que influenciam na produção de combustível compactado derivado de resíduos.

### **3.4.1 Temperatura**

A temperatura de compactação exerce uma função muito relevante nas propriedades finais do produto e no consumo energético durante a compactação. Os briquetes produzidos em 120 °C e 130 °C apresentam densidades em torno de 1,2-1,4 vezes maiores do que os obtidos em temperatura ambiente (GARRIDO *et al.*, 2017). Com o aquecimento, é possível obter produtos mais estáveis com menor dimensão, se comparados com materiais de mesma composição, porém compactados sem aquecimento (EMBRAPA, 2012).

O tamanho do grão associado à temperatura e ao tempo de agitação proporciona a interação entre os componentes. A temperatura e o tempo de preparo dos briquetes de biomassa impulsionam o poder de ligação da celulose e da hemicelulose presentes na casca de arroz (COSTA *et al.*, 2016). Altas pressões e temperaturas causam uma melhor conexão nos pontos de contato, resultando em produtos mais densos e duráveis (BARZARGAN *et al.*, 2014).

### **3.4.2 Pressão**

A pressão é de fundamental importância na necessidade ou não de aglutinante. O mecanismo de ligação durante a aglomeração é atribuído à formação de pontes sólidas, que durante a compactação, são desenvolvidas por reações químicas e sinterização, endurecimento do aglutinante, solidificação das substâncias fundidas ou cristalização dos materiais dissolvidos (TUMULURU *et al.*, 2011). A aplicação de pressão pelos equipamentos de compactação nas partículas da biomassa favorece diferentes mecanismos de ligação. Por meio

desses experimentos, verifica-se o efeito dos ligantes naturais existentes na matéria-prima (EMBRAPA, 2012). A briquetagem da biomassa é um processo de densificação capaz de produzir um material compacto com maior energia por unidade de volume (TUMULURU *et al.*, 2011; AUPRAKUL *et al.* 2019; SONG *et al.*, 2021). A densificação melhora o manuseio e reduz os custos de transporte, produzindo um combustível uniforme, limpo e estável (SING *et al.*, 2012; SONG *et al.*, 2021).

### **3.4.3 Teor de umidade**

Dependendo do tipo de matéria-prima e do processo de compactação existe uma faixa de teor de umidade na qual o material pode ser briquetado ou peletizado adequadamente. Umidade em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, mas a matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Diversos estudos recomendam que o valor ótimo de umidade do resíduo deve estar entre 5% e 10% (EMBRAPA, 2012). O uso de certos resíduos agrícolas com alto teor de umidade, em alguns casos podem limitar os compactados. Esses resíduos requerem secagem ou devem ser misturados com outras matérias-primas (TUMULURU *et al.* 2011; KAZIMIERZ *et al.*, 2020).

### **3.4.4 Granulometria das partículas**

As proporções das matérias-primas devem ser de granulometria variada para uma melhor acomodação das partículas e conseqüentemente uma compactação uniforme. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos briquetes (EMBRAPA, 2012). Matéria-prima de baixa dimensão resulta em briquetes mais densos, mas requer pressões e temperaturas muito elevadas para aglomerar as partículas sem adição de ligantes (ERIKSSON; PRIOR, 1990).

### **3.4.5 Utilização de aglutinantes**

Os aglutinantes (adesivos, colas ou ligantes) funcionam como adesivos entre as partículas e são utilizados quando o material a ser aglomerado não possui, após a compactação, resistência à compressão (EMBRAPA, 2012). Os aglutinantes também ajudam a reduzir o desgaste no equipamento de produção e aumentar a resistência à abrasão do

combustível. Dentro da produção de péletes, ligantes geralmente são permitidos, mas devem ser especificados no produto (MACHADO, 2022).

Os briquetes produzidos com aglutinantes são normalmente comprimidos a baixas pressões, de modo a evitar uma nova fragmentação das partículas. A resistência do combustível sólido pode ser melhorada pelo uso de material de ligação (ASAVATESANUPAP *et al.*, 2012)

A lignina, as proteínas, amido, gorduras e carboidratos solúveis são adesivos naturais da biomassa. A presença desses compostos justifica não utilizar aglomerantes artificiais para a briquetagem ou a peletização (EMBRAPA, 2012).

As biomassas da rizicultura e também florestal são compostas com seus aglutinantes naturais, lignina, amido, proteínas e carboidratos. Portanto a utilização ou não de um ligante e a porcentagem a ser adicionada para cada amostra será um fator protuberante a ser avaliado.

Quando a resistência e a durabilidade dos briquetes e péletes não estão de acordo com os padrões de qualidade ou com os requisitos de mercado, os ligantes são adicionados à mistura de alimentação na faixa de 0,5-5% (em massa) para aumentar a resistência mecânica ou para minimizar as variações de qualidade do compactado. (EMBRAPA, 2012). A adição de glicerol, uma opção de ligante, contribui para uma pequena redução da umidade dos péletes e provavelmente resultado das propriedades higroscópicas da glicerina (BALA-LITWINIAK e RADOMIAK, 2019).

No trabalho de Bala-Litwiniak e Radomiak (2019), quantidades maiores de glicerol residual nos péletes causaram significativa desintegração e esmagamento dos péletes durante sua produção, portanto, 7% em massa de glicerol foi o máximo recomendado.

O tipo e a quantidade de aglutinante necessário à produção de briquetes ou péletes com boa resistência mecânica depende, entre outros fatores, da qualidade do material a ser compactado e do próprio aglutinante. No entanto, os principais fatores para determinar o tipo e a quantidade de aglutinante são a superfície da matéria-prima a ser aglutinada e a quantidade de partículas finas ou grossas presentes (EMBRAPA, 2012).

Outro fator importante é a umidade do material antes da adição do aglutinante. A umidade ideal depende do material e do tipo de aglutinante utilizado, além de influenciar o valor da pressão a ser aplicada (EMBRAPA, 2012).

Quando a pressão é removida e o ligante resfria e endurece, estabelecendo pontes entre as partículas, tornando o produto resultante mais durável (KALIYAN; MOREY, 2009). Há algumas opções de aglutinantes possíveis de serem utilizados, os principais parâmetros para a escolha são o custo e o efeito na produção dos compactados.

### 3.4.5.1 Glicerol

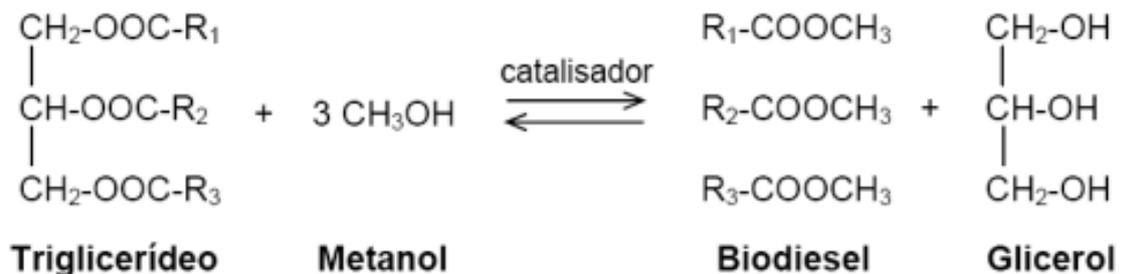
Glicerol é uma das mais versáteis e valiosas substâncias químicas. Comercialmente, o glicerol recebe, frequentemente, o nome de glicerina. Foi preparado pela primeira vez por Carl W. Scheele (químico sueco), em 1779, mediante o aquecimento do óleo de oliva com litargírio (PbO, usado no esmalte para cerâmicas) (BEATRIZ *et al.*, 2011).

O glicerol é um composto orgânico pertencente ao grupo dos álcoois (função orgânica que apresenta um grupo OH ligado a um carbono saturado). De acordo com a regra de nomenclatura estabelecida pela União Internacional da Química Pura e Aplicada (IUPAC), esse composto é chamado de propan-1,2,3-triol. (DIAS, 2021).

O glicerol é coproduto do processo de produção de biodiesel. Dessa forma, do volume total de biodiesel produzido, cerca de 10% correspondem ao glicerol, que é utilizado como única fonte de carbono na obtenção de produtos de maior valor agregado. O glicerol obtido na reação de transesterificação (necessária para a produção do biodiesel) de triglicerídeos e álcool contém certas impurezas, como água, sais, ésteres, álcool e óleo residual, que diminuem o valor agregado (BARROS, 2021).

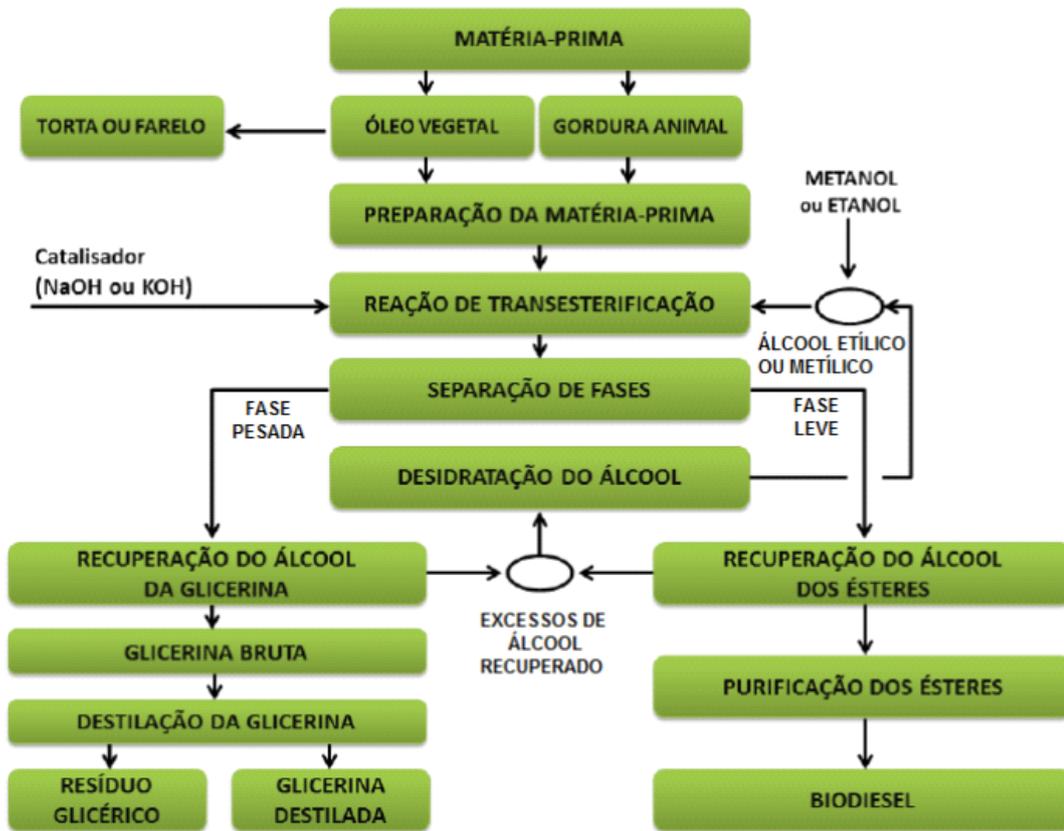
O biodiesel é produzido por uma reação de transesterificação entre óleo vegetal e metanol, catalisada por KOH ou NaOH. É uma reação de equilíbrio dinâmico, onde 1 mol de triglicerídeo reage com 3 mols de metanol (ou etanol). Para se obter rendimento satisfatório dos produtos, é adicionado grande excesso de álcool em relação ao triglicerídeo, deslocando o equilíbrio para o sentido da formação de biodiesel e glicerol de acordo com o Princípio de Le Chatelier (BEATRIZ *et al.*, 2011) e conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Reação de transesterificação



Fonte: Baseada em Geris *et al.* (2007)

Figura 6: Fluxograma da produção de biodiesel pela rota de transesterificação



Fonte: SILVA *et al.* (2017)

O glicerol resultante da fabricação do biodiesel (glicerol bruto) apresenta cerca de 20% de impurezas. As principais impurezas presentes no glicerol do biodiesel são catalisador, álcool, ácidos graxos, sais e água. Para cada quilograma de biodiesel produzido pela rota de transesterificação, aproximadamente 100 gramas de glicerol são gerados como subproduto da reação (YAZDANI; GONZALEZ, 2007; KNOTHE e RAZON; RAZBALA-LITWINIAK e; RADOMIAK, 2019).

O glicerol é incolor, viscoso, higroscópico (absorve umidade), oleoso, de sabor doce, solúvel em água e álcool, pouco solúvel em éter, acetato de etila e dioxano e insolúvel em hidrocarboneto (BARROS, 2021). A utilização de glicerol residual como combustível é uma alternativa de baixo custo e muita vantajosa, tanto pela proteção ambiental como a respeito de produção de energia. Após a queima de péletes contendo o glicerol residual, a quantidade de cinza restante foi ligeiramente menor do que na queima de péletes sem o resíduo. O valor poder calorífico do glicerol residual (22,6 MJ/kg) é ligeiramente superior ao da serragem de

madeira (17,52 MJ/kg), portanto, adições de 5% de glicerol aos péletes conferiram um pequeno aumento de poder calorífico (BALA-LITWINIAK e RADOMIAK, 2019).

Levando em consideração as propriedades do glicerol, como baixa toxicidade, boa biodegradabilidade e baixa pressão de vapor (alto ponto de ebulição), o glicerol recentemente demonstrou ser um excelente solvente sustentável. Por exemplo, uma vantagem do uso de glicerol como solvente é que as reações químicas podem ser realizadas em temperatura mais alta em comparação com solventes de baixo ponto de ebulição, portanto, seria de esperar a aceleração das reações ou o progresso de diferentes vias de reação (THANH *et al.*, 2012).

Conforme já discutido anteriormente, para garantir uma alta qualidade dos briquetes e péletes, como resistência à compressão e adesão de partículas, ou mesmo para melhorar essas propriedades, o uso de ligantes é necessário. De acordo com o trabalho de Bala-Litwiniak e Radomiak (2019), a adição de glicerol residual à serragem de madeira é uma solução custo-efetiva. Pequenas adições desse aglutinante à madeira, de até 4,5% em massa, aumentaram um pouco a taxa de consumo de péletes devido à redução da densidade do compactado, enquanto que para os péletes contendo 7% em massa de glicerol, menor consumo de combustível foi observado. Os parâmetros físico-químicos dos péletes de biomassa testados com adição de 5% de glicerol residual atenderam aos padrões europeus de qualidade. Entretanto, os péletes contendo 7% em massa de glicerol residual apresentaram maior suscetibilidade ao esmagamento e quebra. Por fim, devido à vantajosa relação entre tempo de combustão e densidade dos péletes, o percentual de glicerol residual mais recomendado em péletes de madeira seria 4,5% em massa.

A principal preocupação da combustão do glicerol é a produção de gases tóxicos, especialmente a acroleína (ASAVATESANUPAP *et al.*, 2010). Mas também nesse aspecto, de Bala-Litwiniak e Radomiak (2019) mostraram resultados que indicam que a combustão de péletes de serragem de madeira adicionados de até 7% em massa de glicerol residual causaram redução nas emissões de NO<sub>x</sub> e que o glicerol praticamente não teve efeito sobre a emissão de gases poluentes.

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS DERIVADOS DE RESÍDUOS

Para transformar um material disperso em um compacto homogêneo, uma caracterização do material sólido deve ser feita para se conhecer suas propriedades, para que haja uma melhor escolha da fração adequada e, conseqüentemente, da tecnologia de

conversão. Tais características compreendem propriedades físico-químicas específicas (CORTEZ *et al.*, 2008).

A análise elementar é um método de caracterização importante para determinar o teor de elementos majoritários que constituem os combustíveis e a qualidade do combustível em comparação ao carvão e à biomassa pura (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015, CHAITANYA *et al.*, 2017).

A análise elementar inclui a determinação do conteúdo de C, H, N, S e O pelo princípio da combustão de uma amostra de combustível em atmosfera de O<sub>2</sub> com subsequente análise dos gases resultantes (água, nitrogênio, dióxido de carbono e dióxido de enxofre) por cromatografia gasosa.

Pela análise elementar são determinados os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) dos materiais, dos quais os elementos de maior contribuição para o poder calorífico são o carbono e o hidrogênio. Nesse sentido, quanto maior a concentração desses elementos, mais energético será o material (GENTIL, 2008).

Outra preocupação em relação ao CDR é a presença de cloro, que proporciona a formação de dioxinas e de furanos (PCDD e PCDF), compostos quimicamente estáveis, formados em temperaturas em torno de 250 °C a 400 °C, e com reconhecido potencial carcinogênico e mutagênico em muito baixas concentrações (KYPRIANIDIS E SKVARIL, 2016; LIU *et al.*, 2020).

Os teores de cloro em resíduos sólidos urbanos são provenientes principalmente dos plásticos, compósitos combustíveis e resíduos alimentares (VICZEK *et al.*, 2020).

O principal agente de cloração na formação de PCDD e PCDF é o Cl<sub>2</sub>, sendo o HCl relativamente ineficaz. Cl<sub>2</sub> pode ser formado por meio de uma reação conhecida como reação Deacon, que pode ocorrer durante o processo de resfriamento de gás (KYPRIANIDIS ESKVARIL, 2016). O teor de cloro nos péletes, embora muito baixo, diminui acentuadamente com o aumento da participação do glicerol no combustível celulósico (BALA-LITWINIAK e RADOMIAK, 2019).

A análise imediata compreende a determinação do teor de umidade, correspondendo à quantidade de água livre presente na biomassa; do teor de material volátil, que expressa a capacidade de combustão do material; o teor de cinzas, porção remanescente de fração inorgânica após a calcinação; e teor de carbono fixo, material combustível resultante da devolatilização. De acordo com Protásio (2014), o entendimento da análise imediata de um combustível é fundamental para determinar o grau de combustão.

O teor de umidade está relacionado com o desempenho térmico do material, sendo que, quanto maior, menor será o poder calorífico líquido do combustível. Isso é devido ao fato de que a primeira etapa de um processo de queima é a secagem do material, ou seja, parte da energia é cedida para que ocorra a evaporação da água que difunde do interior da partícula através dos poros para o ambiente (ALEXANDRE, 2016). Garcia (2010), relata que elevados teores de umidade acarretam perdas de energia, baixa ignição e durabilidade, além de um reduzido prazo de estocagem da biomassa.

Os materiais voláteis estão relacionados com o comportamento do combustível na decomposição, pois determina a facilidade com que a biomassa queima, também interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e, conseqüentemente, a ignição. Dessa forma, o conteúdo de voláteis é uma mensuração da reatividade do combustível (GARCIA, 2010, OSHIRO, 2016).

Garcia (2010) e Dionízio (2017) afirmaram que as cinzas não são desejáveis nos processos industriais e, particularmente, no uso doméstico para o aquecimento residencial, uma vez que elevado valor de cinza da biomassa representa menor poder calorífico do combustível, assim, haverá uma maior quantidade de resíduos a ser removido e destinado ao final da combustão.

Para a biomassa florestal o teor de cinzas corresponde à proporção de constituintes minerais contidos na biomassa devido à incorporação no decorrer da vida do vegetal (PONTE, 2017).

O teor de carbono fixo também é definido como a quantidade de carbono presente na biomassa excetuando o carbono nos materiais voláteis (DIONIZIO, 2017).

Conforme Castro (2011), a lignina é o principal componente químico responsável pela presença de carbono fixo na biomassa, que favorece a liberação de energia durante o processo de queima direta.

Segundo Chaves *et al.* (2013), o teor de carbono fixo tem uma relação direta com o poder calorífico, isto é, quanto maior o teor de carbono fixo maior o conteúdo energético.

O Poder Calorífico Superior (PCS) não leva em consideração as perdas de energia com a evaporação da água presente no combustível (DIONIZIO, 2017). Ele quantifica a quantidade de calor liberada pela queima de modo que a água proveniente da combustão esteja em estado líquido, isto é, que o calor latente de vaporização da água de constituição seja recuperado (GARCIA, 2010).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) é a quantidade de energia líquida de um combustível, considerando a água no estado de vapor nos gases de combustão. Essa variável

está intrinsecamente relacionada aos teores de hidrogênio e de umidade do combustível. Elevados teores de água na biomassa causam baixo poder calorífico, perdas de energia, baixa ignição, baixa durabilidade e menor tempo de secagem (GARCIA, 2010).

Para Oliveira Júnior (2013), a densificação da matéria orgânica consiste na compressão desse material, com ou sem adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico, de forma a tornar a biomassa mais homogênea e compacta.

### 3.6 OBTENÇÃO DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE BIOMASSAS FLORESTAIS E DA RIZICULTURA E DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Realizou-se uma busca na literatura científica dos últimos 16 anos buscando-se informações sobre obtenção de combustível derivados de resíduos sólidos, péletes produzidos a partir de biomassas, com ou sem utilização de aglutinantes. As informações relevantes foram organizadas em uma tabela de revisão da literatura (tabela 1) e foram utilizadas na construção deste trabalho, como fundamentação teórica, para definições de parâmetros da metodologia e também para discussão dos resultados obtidos.

Tabela 1: Trabalhos consultados referentes a combustíveis derivados de resíduos com adição de aglutinantes

TRABALHO	ANO	PAÍS	OBJETIVO DO TRABALHO	BIOMASSA	AGLUTINANTE	GANHOS	IMPACTOS NEGATIVOS	RESULTADOS
<b>Tecnologias catalíticas para produção de biodiesel e utilização de glicerol</b>	2012	Vietnã	O objetivo principal é superar os problemas que envolvem a recuperação e o tratamento dos subprodutos que requerem um de processamento complexo.	Açucares (glicose)	Glicerol	As propriedades do glicerol, como baixa toxicidade, boa biodegradabilidade e baixa pressão de vapor (alto ponto de ebulição), recentemente demonstrou ser um excelente solvente sustentável.	Como desvantagem, a reatividade química dos grupos hidroxila do glicerol deve ser levada em consideração.	A esterificação do glicerol com isobutileno foi investigada para produzir um aditivo oxigenado que pode ser usado como um acelerador de ignição e intensificador de octanagem.
<b>Um estudo de viabilidade na produção de combustível sólido a partir de glicerol e resíduos agrícolas</b>	2010	Tailândia	Um dos principais objetivos do estudo é produzir combustível sólido a partir do glicerol e resíduos agrícolas, a fim de encontrar uma alternativa energética adequada para o uso doméstico.	Casca do durião e o bagaço	Glicerol, (5% em massa)	Formam combustível mais sólido.	A principal preocupação da combustão do glicerol é a produção de gases tóxicos, especialmente a acroleína.	A resistência do combustível sólido pode ser melhorada pelo uso de material de ligação.
<b>Aspectos ambientais e econômicos da combustão de péletes de biomassa contendo glicerol residual</b>	2020	Polônia	Avaliar os aspectos ambientais e econômicos da combustão de péletes de biomassa contendo glicerol residual.	Cascas de pinheiro e girassol.	Glicerol, (5% em massa)	A adição de glicerol contribui para uma redução insignificante da umidade dos pellets. Após a queima de pellets contendo o glicerol residual, a quantidade de cinza restante foi ligeiramente menor do que na queima de pellets glicerol aos grânulos dão a eles um pequeno aumento de valor calorífico.	A adição de glicerol residual aumenta ligeiramente a geração de CO nos gases de Combustão. Felizmente, a concentração de CO registrada é bastante baixa (1580 mg / m <sup>3</sup> para PP e 1596 mg / m <sup>3</sup> para PP-G).	Os resultados indicam que os parâmetros físico-químicos dos péletes de biomassa testados com adição de 5% de glicerol residual atendem aos padrões europeus. No entanto, a adição de resíduos contribui para um ligeiro aumento do consumo de combustível.

<b>Possibilidade de aproveitamento de resíduos de glicerol como aditivo ao péletes de madeira</b>	2018	Polônia	Neste estudo, foi investigada a possibilidade de utilização de glicerina de pureza técnica como adição aos péletes de madeira destinados ao aquecimento.	Madeira	Glicerol, (7%)	O teor de cloro nas péletes, embora muito baixo, diminui acentuadamente com o aumento da participação do glicerol no combustível celulósico.	A adição de glicerol contribui apenas para uma redução insignificante da umidade dos péletes. Este é um resultado bastante inesperado.	Mostram que a co-combustão de glicerol residual com serragem de madeira não piora a eficiência de aquecimento em uma caldeira padrão. As adições de glicerol praticamente não afetam outras emissões de gases de combustão prejudiciais.
<b>Biossólidos e microalgas como ligantes alternativos para biomassa</b>	2012	Reino Unido	Investigar o efeito das proporções de cascas de arroz, espigas de milho e bagaço, adição de amido, biossólidos ou ligante de microalgas e pressão de compactação nas propriedades relacionadas à durabilidade do briquete, densidade energética e características de combustão.	Cascas de arroz, espigas de milho e bagaço	Amido, biossólidos e microalgas (17% em massa)	O uso do menor teor de casca de arroz e bagaço (ou seja, maior teor de espiga de milho) na mistura de biomassa teve um efeito positivo significativo na densidade relaxada do briquete. O bagaço tem um alto teor de umidade e ricos ligantes naturais.	Foram observadas fisicamente pequenas fissuras nos briquetes contendo as maiores proporções de casca de arroz e bagaço, o que pode ter reduzido sua resistência.	Em comparação com os biossólidos e ligantes de amido, o uso de ligante de microalgas aumentou a densidade de energia dos briquetes. Uma vez que as microalgas podem ser cultivadas usando CO2 da combustão de biomassa, a descoberta de suas vantagens como aglutinante na briquetagem é particularmente bem-vinda.

<b>Volarização integrada de borra de café usada para biocombustíveis</b>	2014	Etiópia	O objetivo deste estudo foi investigar o potencial do uso de borra de café usada para a produção de biodiesel e seus subprodutos para a produção de combustível peletizado.	Borra de café	Glicerol (20 a 40% em massa)	Os resíduos sólidos remanescentes após a extração do óleo e glicerina, que são subprodutos da produção de biodiesel, são experimentalmente comprovados como matérias-primas promissoras para a produção de péletes combustíveis	A glicerina máxima de 40% ainda produzia uma quantidade de cinzas maior que o valor do critério de 0,5%.	A produção dos resíduos sólidos após a extração do óleo e pellets de glicerina pode também promover uma abordagem de desperdício zero para o processo de produção de biodiesel e podem eliminar o custo de descarte da glicerina bruta.
<b>Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior da biomassa de carnaúba com diferentes aglutinantes para uso em forno industrial</b>	2022	Brasil	O presente trabalho teve como objetivo principal identificar qual a melhor combinação entre talo de carnaúba e material aglutinante para ser utilizado como biomassa em forno de indústrias de transformação, tomando como referência o poder calorífico superior (PCS) por meio da análise imediata e da análise de variância (anova).	Talo de carnaúba, fibra do coco verde, casca da castanha de caju e cavaco do cajueiro	Casca da castanha de caju (20/30/40%) em massa	Com os resultados obtidos através das análises de biomassa oriundas do talo de carnaúba, fibra do coco verde, casca da castanha de caju e cavaco do cajueiro, constatou-se que as quatro possuem potencial energético para a utilização como fonte de energia.	Quando se compara os resultados obtidos pela fibra de coco verde e o cavaco de cajueiro, constata-se que o alto teor de umidade (19,70%), o baixo teor de voláteis (72,04%), o alto teor de cinzas (7,25%) associado ao alto teor de carbono fixo (36,01%) e baixo pcs (17,04 mj/kg) torna a fibra de coco verde menos indicada ao uso no <i>blend</i> .	A casca de castanha é a biomassa mais indicada para a utilização do <i>blend</i> de carnaúba como combustível sólido. A composição de 80% de carnaúba e 20% de casca da castanha de caju apresentou teor de umidade de 9,60%, teor de voláteis de 83,50%, teor de cinzas de 5,16%, teor de carbono fixo de 27,58% e poder calorífico superior de 19,04 [mj/kg], sendo este o maior deste estudo.

<b>Uso de biomassa de bambu para a queima em fornos cerâmicos</b>	2022	Brasil	Este trabalho teve como objetivo geral avaliar as vantagens da utilização do bambu na geração de energia da queima em fornos de indústrias do ramo cerâmico.	Bambu e Eucalipto	Não	Verificou-se nessa pesquisa que o bambu ( <i>bambusa vulgaris</i> ) teve uma densidade de 0,417 g.cm-3 e o cavaco de eucalipto ( <i>Eucalyptus urograndis</i> ) 0,471 g.cm-3, sendo assim que teve uma diferença de aproximadamente 12%	A diferença entre o consumo do volume de cavaco de bambu foi maior do que do cavaco de eucalipto.	Outro fator importante foi que o cavaco de bambu manteve a qualidade de queima deixando os materiais com coloração uniforme e de pouca variação de temperatura evitando possíveis trincas.
<b>Caracterização física de briquetes de serragem e caroço de açaí (Euterpe oleracea Mart.) aglutinados com amido de mandioca (Manihot esculenta Crantz)</b>	2021	Brasil	Objetivou-se avaliar as propriedades físicas dos briquetes fabricados com serragem de madeira, caroços de açaí, amido de mandioca em diferentes proporções e pressão de compactação.	Serragem de madeira, caroços de açaí.	Amido de mandioca (10% em massa)	Com relação à umidade, a maior parte dos briquetes apresentou umidade entre 12% e 20,02%, considerando-se índices aceitáveis.	Ocorreu uma secagem desuniforme entre os briquetes e que o período de 15 dias estipulado para secagem dos mesmos ao ar livre não foi suficiente para todos.	A densidade aparente média dos briquetes não foi significativa nos dois estudos conduzidos, evidenciando que o aumento de pressão teve pouca influência na densidade.
<b>Tecnologia de produção de briquetes de resíduos de fruta para geração de energia.</b>	2022	Brasil	O objetivo geral desse trabalho foi realizar levantamento bibliográfico das principais tecnologias na produção de briquetes, a partir do uso de resíduos de frutas, para a geração de energia.	Casca de coco	Não	Foi verificado que a maioria dos estabelecimentos têm preferência pelo briquete, por conta da sua praticidade e limpeza operacional, seguido pela facilidade de aquisição, em relação à lenha legalizada e à legalidade de seu uso.	O valor do briquete é cerca de 25% maior que o valor da lenha.	Diante das análises físico-químicas e das pesquisas em campo, conclui-se que a utilização da biomassa de casca de coco verde tem um bom aproveitamento de potencial energético.

Fonte: Autor (2023)

Encontrou-se no estado da arte afirmações que corroboram com o que é proposto neste trabalho. Os resultados experimentais apresentados por Bala-Litwiniak e Radomiak (2019), mostram que a co-combustão de glicerol residual com serragem de madeira não afetou negativamente a eficiência de uma caldeira padrão, e que as adições de glicerol praticamente não afetaram outras emissões de gases poluentes. O poder calorífico do glicerol residual (22,6 MJ/kg) é um pouco maior que o da serragem de madeira utilizada para a fabricação de péletes (18,1 MJ/kg), portanto, as adições crescentes de glicerol aos péletes contribuem para aumento de seu poder calorífico (BALA-LITWINIAK e RADOMIAK, 2019).

No trabalho de Costa *et al.* (2019), os estudos indicaram a viabilidade técnica da produção de biocombustíveis a partir de casca de arroz, amido de milho e glicerol.

Morrugo *et al.* (2018) afirmaram que os resultados de sua pesquisa demonstram a viabilidade técnica e ambiental do uso da glicerina bruta como ligante na produção de péletes de biomassa de origem agroindustrial. Nos trabalhos expostos na Tabela 1, percebe-se que a porcentagem de glicerol adicionada ficou entre 5-7,5% em massa, e que uma das principais preocupações quanto ao uso do glicerol é a produção de gases tóxicos durante a combustão. Quanto à redução de umidade não há consenso entre os trabalhos. Como são biomassas diferentes, o glicerol pode contribuir significativamente para algumas composições, mas para outras não. Um fator descrito na Tabela 1 e analisado no trabalho Bala-Litwiniak e Radomiak (2019) é que o teor de cloro nos péletes, embora muito baixo, diminui acentuadamente com o aumento da participação do glicerol. Os trabalhos de Carvalho (2022), Strassburger (2022), Neto *et al.* (2021) e Paiva (2022) apresentam diferentes biomassas que privilegiam a diversidade da flora brasileira, casca de castanha de caju, bambu e eucalipto, caroços de açaí e casca de coco respectivamente. Strassburger (2022) e Paiva (2022), não utilizaram aglutinantes, pois seus estudos revelaram que as biomassas já apresentavam seus ligantes naturais, bambu, eucalipto, e casca de coco.

## 4 METODOLOGIA

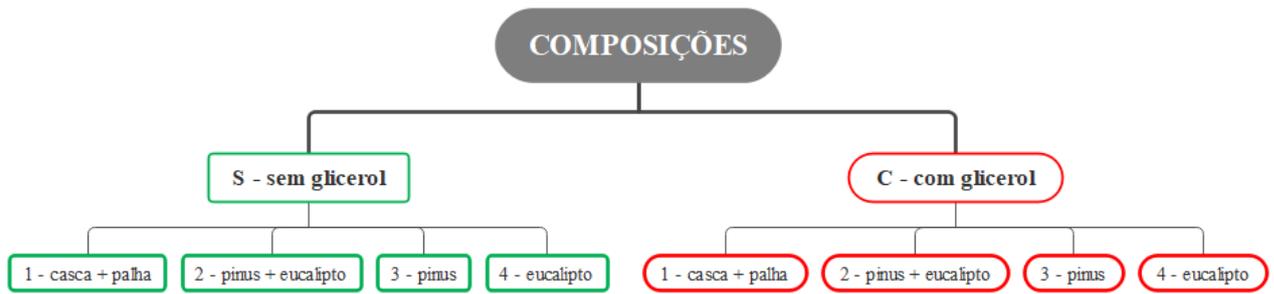
Este trabalho deu continuidade ao trabalho realizado por Machado (2022) que, usando a técnica de moldagem por compressão, preparou e caracterizou amostras de CDR compactado a partir de misturas de frações trituradas de rejeito da triagem de RSU (papel/papelão – 78,6%, plástico mole (plásticos com alta maleabilidade e baixa densidade, tais como polietileno de baixa densidade (PEBD), polipropileno (PP), entre outros) – 18,4%, poliestireno expandido (EPS) – 3,0%) e resíduos da rizicultura do sul do estado de Santa Catarina (mistura de casca de arroz – 15% e palha de arroz – 85%). Essas percentagens de RSU e biomassa foram estimadas por Machado (2022) com base na disponibilidade dos resíduos na região sul de Santa Catarina. A fabricação do CDR compactado foi realizada com diferentes percentuais de RSU (0%, 10% e 20%) na composição e temperaturas de compactação (60 °C, 100 °C e 140 °C), sem adição de aglutinantes. Foram investigadas a composição físico-química dos combustíveis, a resistência mecânica, a densidade energética e a estabilidade dos compactados após exposição ao intemperismo.

Neste trabalho, utilizou-se a mesma composição de rejeitos de RSU e biomassa da rizicultura utilizada por (Machado, 2022), bem como as mesmas condições de compactação que levaram aos melhores resultados, isto é: temperatura de conformação de 100 °C, percentual de 20% de RSU na mistura com biomassa e pressão de compactação de 46,9 MPa (máxima obtida na prensa utilizada). Entretanto, foi adicionado glicerol como aglutinante na composição para avaliar seu efeito em termos de incremento na qualidade do CDR compactado quando comparado àquele sem aglutinante.

O trabalho visa realizar testes iniciais aplicando glicerol como aglutinante, a caracterização físico-química das amostras adicionadas de glicerol não foram analisadas, o enfoque dessa pesquisa são as características do CDR produzido. No contexto do projeto de pesquisa no qual essa dissertação foi realizada, foram testadas várias composições e, na etapa final do projeto, as composições que apresentaram os CDR com melhores características são efetuadas análises físico-químicas.

A Figura 7 apresenta as composições das amostras de CDR compactado que foram avaliadas neste trabalho. As composições que não foram adicionadas de glicerol foram denominadas “S” e as denominadas “C” são as composições que tiveram adição de glicerol como aglutinante. As amostras também foram enumeradas 1 a 4 para se especificar a composição em termos de biomassa.

Figura 7: Fluxograma das composições do CDR compactado avaliadas



Fonte: Autor (2023)

Glicerol foi acrescentado na proporção de 5,0% em relação à massa total de sólidos, baseado no estudo de Bala-Litwiniak e Radomiak (2019). Foi utilizada a mesma proporção de rejeitos de RSU e biomassa em todas as amostras, mas substituindo-se a biomassa da rizicultura por biomassa florestal, com a utilização de serragem de madeira de Eucalipto e de Pinus, que são resíduos da indústria madeireira da região sul catarinense usadas como referência. As composições elaboradas foram descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Composições de CDR estudadas, valores percentuais em massa

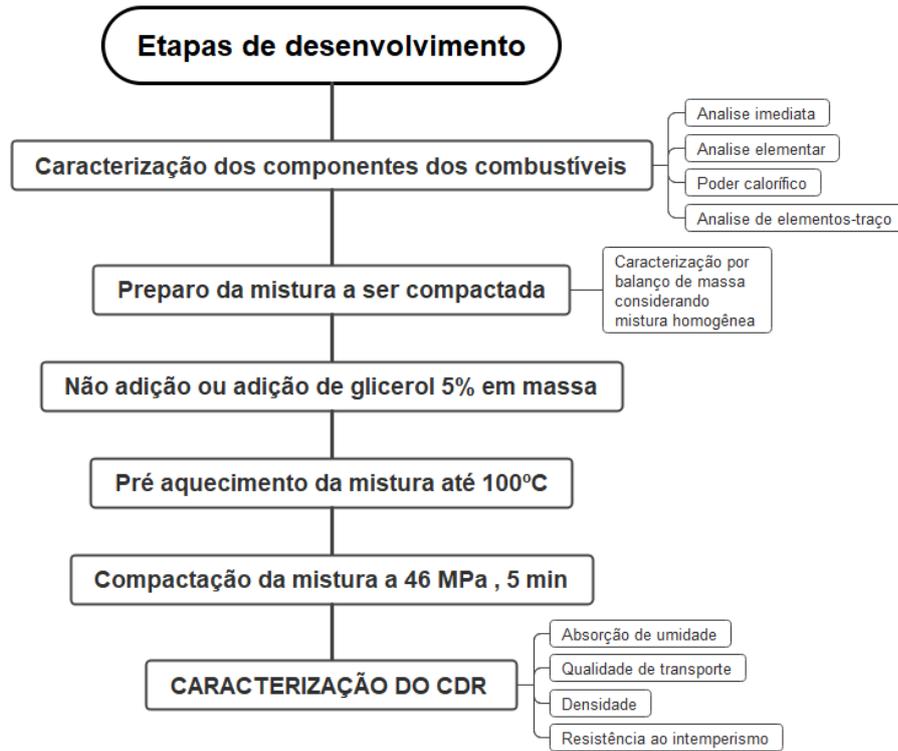
Componente	S1	C1	S2	C2	S3	C3	S4	C4
<b>Papel/papelão</b>	15,72	14,97	15,72	14,97	15,72	14,97	15,72	14,97
<b>Plástico mole</b>	3,68	3,50	3,68	3,50	3,68	3,50	3,68	3,50
<b>EPS</b>	0,60	0,57	0,60	0,57	0,60	0,57	0,60	0,57
<b>Casca de arroz</b>	12,00	11,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Palha de arroz</b>	68,00	64,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Pinus</b>	0,00	0,00	40,00	38,10	80,00	76,19	80,00	0,00
<b>Eucalipto</b>	0,00	0,00	40,00	38,10	0,00	0,00	0,00	76,19
<b>Glicerol</b>	0,00	0,00	0,00	4,76	0,00	4,76	0,00	4,76

Fonte: Autor (2022)

A composição S1 foi estudada por Machado (2022) e reproduzida neste trabalho para fins de verificação da receptibilidade dos resultados e comparação com C1, composição adicionada de glicerol como aglutinante.

Após a compactação, aspectos qualitativos dos CDR foram avaliados, incluindo: densidade energética, estabilidade dos compactados na exposição à umidade, resistência mecânica e resistência ao intemperismo. Dessa forma, a etapas seguidas no desenvolvimento deste trabalho foram representadas na Figura 8.

Figura 8: Fluxograma das etapas de desenvolvimento deste trabalho



Fonte: Autor (2022)

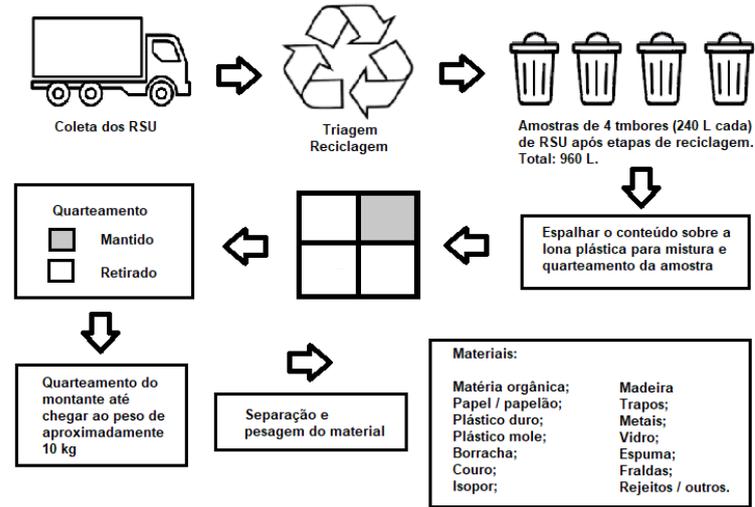
#### 4.1 OBTENÇÃO E PREPARO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram: resíduos sólidos urbanos (RSU), glicerol, serragem de madeira (Pinus e Eucalipto), resíduos da rizicultura (palha e casca de arroz), os quais foram descritos a seguir.

##### 4.1.1 Rejeitos da triagem de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

As amostras de rejeitos da triagem de RSU foram coletadas no centro de processamento e reciclagem da cidade de Imbituba/SC, responsável pela coleta de materiais recicláveis no referido município no período da realização deste trabalho. A separação e a coleta dos resíduos foram baseadas na metodologia de Soares (2011), conforme descrito por Machado (2022) e ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Método de amostragem de rejeitos da triagem de RSU



Fonte: Machado (2022) baseado em Soares (2011)

Devido a limitações de processamento, somente foram utilizadas para a produção de CDR compactado as frações de plástico mole, EPS e papel/papelão do total de rejeitos de RSU. As referidas frações foram caracterizadas em termos físico-químicos após trituração para diminuição do tamanho das partículas. Esse processo foi realizado de forma manual em laboratório utilizando-se como instrumentos uma tesoura para plástico mole (100 g) e papel/papelão (300 g), e um liquidificador doméstico no caso do EPS (100 g). Essas quantidades foram estimadas com base na composição e no número de amostras e de repetições planejadas para os experimentos, tal como apresentado na Tabela 2.

#### 4.1.2 Biomassa

As amostras de biomassa da rizicultura (palha e casca de arroz) foram cedidas a Machado (2022) pela Cooperativa Agropecuária de Tubarão – COPAGRO. As amostras de biomassa florestal, serragem de Pinus e de Eucalipto, foram cedidas e coletadas em duas empresas do município de Criciúma/SC, Salvaro Indústria e Comércio de Madeiras e Madeireira Baschiroto.

As amostras de biomassa da rizicultura, palha e casca de arroz, foram trituradas preliminarmente utilizando-se um triturador de resíduos e liquidificador doméstico e, posteriormente foram trituradas novamente até 0,60 mm, tamanho de partícula adotados para os testes de caracterização. As biomassas florestais de Pinus e Eucalipto foram obtidas em

granulometria reduzida, conforme pode ser observado na Figura 9, sem necessidade de trituração previamente às análises de caracterização.

Figura 10: Amostras de biomassas conforme recebidas, rizicultura à esquerda (palha e casca de arroz) e madeira à direita (pinus e eucalipto)



Fonte: Autor (2022)

### 4.1.3 Glicerol

O glicerol é um líquido incolor, inodoro e viscoso, de fórmula molecular  $\text{HOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2\text{OH}$ , peso molecular 92,09 g/mol e teor de 99,5%. (FISPQ, 2023). O glicerol empregado neste estudo como aglutinante é P.A da marca Neon, e suas propriedades físicas e químicas estão expressas na Figura 11, no Anexo A e no Anexo B.

Figura 11: Propriedades físicas e químicas do glicerol

#### 9. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

**Forma:** Líquido  
**Cor:** Incolor  
**Odor:** Inodoro  
**pH (100 g/l em 20 °C):** ca.5  
**Ponto de fusão:** 20 °C  
**Ponto de ebulição:** 182 °C em 27 hPa  
**Ponto de fulgor:** Não disponível  
**Taxa de evaporação:** Não disponível  
**Inflamabilidade (Sólido/Gás):** 199 °C em ca.1013.0 hPa - Copo de Pensky-Marten fechado  
**Limite de explosividade superior:** Não disponível  
**Limite de explosividade inferior:** Não disponível  
**Pressão de vapor:** < 0.001 hPa em 20 °C  
**Densidade de vapor:** 3.18 - (Ar = 1,0)  
**Densidade:** 1,01 g/cm<sup>3</sup>  
**Solubilidade (água):** 1,000 g/l em 25 °C - miscível  
**Coefficiente de partição octanol/água:** log Pow: -1.75 em 25 °C - Não se prevê qualquer bioacumulação.  
**Temperatura de decomposição:** Não disponível  
**Temperatura de auto-ignição:** 370 °C  
**Viscosidade dinâmica (15°C):** 1,412 mPa.s em 20 °C 612 mPa.s em 30°C 14.8 mPa.s em 100 °C  
**Tensão superficial:** ca.63.4 mN/m em 20 °C

Fonte: FISPQ Neon (2023)

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DAS AMOSTRAS DE CDR

Amostras de cada um dos materiais empregados na composição do CDR foram separadas após o pré-tratamento (papel/papelão, plástico mole, EPS, casca e palha de arroz, serragem de Pinus e de Eucalipto) e encaminhadas para caracterização nos laboratórios da SATC - Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (LabSATC), instituição parceira do projeto de pesquisa ao qual este trabalho está relacionado, para realização das análises imediata e elementar, determinação do teor de cloretos, do Poder Calorífico Superior (PCS), do Poder Calorífico Inferior (PCI) e do teor de elementos-traço.

### 4.2.1 Análise imediata

A análise imediata compreende as determinações dos teores mássicos de umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo e foi realizada com base nos seguintes métodos em um analisador termogravimétrico (modelo TGA 701, marca Leco): **umidade**, PO-158/ASTM D7582-15 (TGA) (ASTM, 2015); **matéria volátil**, PO-061/ASTM D3175/PO-158/ASTM D7582-15 (TGA) (ASTM, 2020; ASTM, 2015); **cinzas**, PO-060/ASTM D3174/PO-158/ASTM D 7582-15 (TGA) (ASTM, 2018; ASTM, 2015); **carbono fixo**, PO-068/ ASTM D3172/PO-158/ASTM D7582 (TGA) (ASTM, 2013; ASTM, 2015).

O primeiro parâmetro determinado foi o teor de umidade por meio do aquecimento da amostra até cerca de 105 °C em atmosfera inerte (nitrogênio) e manutenção da amostra nessa temperatura até massa constante. Posteriormente prosseguindo-se o aquecimento em atmosfera inerte até (aproximadamente) 950°C determinou-se o teor de matéria volátil. Em seguida, a amostra foi resfriada até cerca de 750 °C e incinerada a essa temperatura, em atmosfera de oxigênio, para se determinar o teor de cinzas remanescentes. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C/min. O teor de carbono fixo foi determinado por diferença em relação aos demais parâmetros.

### 4.2.2 Análise elementar

A análise elementar compreende a determinação da concentração dos principais elementos constituintes dos combustíveis sólidos, que são: Carbono (C), Hidrogênio (H),

Nitrogênio (N), Enxofre (S) e Oxigênio (O). Essa análise foi realizada em um analisador elementar (modelo CHN628, marca LECO) seguindo-se a metodologia da Tabela 3.

Tabela 3: Metodologias da análise elementar dos componentes das amostras de CDR

<b>Análise Imediata</b>	
Carbono (C)	PO-197/ PO-197
Hidrogênio (H)	PO-197
Nitrogênio (N)	PO-197/ PO-197
Enxofre (S)	ASTM D 4239 (ASTM, 2018)/18 E <sup>1</sup> Método A/ PO-064
Oxigênio (O)	Por diferença
Cloretos (Cl)	ABNT NBR 9917:2009 / SMWW, 23 <sup>a</sup> Edição, Método 4500-Cl-B / PO-082

Fonte: Autor (2023)

O teor de cloretos também foi determinado em um analisador elementar (modelo CHN628, marca LECO), mas empregando-se o método ABNT NBR 9917:2009/SMWW, 23<sup>a</sup> Edição, Método 4500-Cl-B/PO-082 (ABNT, 2009) e utilizando-se potenciometria, técnica eletro-analítica aplicada à determinação de espécies eletroativas por meio de eletrodos de íon seletivo.

Não foi possível realizar a análise elementar e a determinação de poder calorífico das amostras de frações de plástico mole e poliestireno expandido (EPS) em razão de que suas características não permitirem a inserção da quantidade mínima necessária de amostra para funcionalidade do equipamento de análise. Em virtude disso, dados da literatura foram utilizados, conforme sugerido por Crema (2022) e demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da análise elementar de alguns tipos de plásticos em percentual em massa

	<b>Carbono C (c.r.)</b>	<b>Hidrogênio H (c.r.)</b>	<b>Nitrogênio N (c.r.)</b>	<b>Enxofre S (c.r.)</b>	<b>Oxigênio O (c.r.)</b>	<b>Cloro Cl (c.r.)</b>
<b>PEBD</b>						
Park <i>et al.</i> (2012)	85,70	14,20	0,05	0,00	0,05	0,00
Sharaddin <i>et al.</i> (2017)	85,60	13,40	0,26	0,00	0,74	0,00
Pessoa Filho (2020)	83,69	15,40	0,00	0,91	0,00	0,00
<b>PP</b>						
Sharaddin <i>et al.</i> (2017)	86,88	12,50	0,28	0,03	0,32	0,00
Pessoa Filho (2020)	78,32	13,70	0,24	2,18	5,56	0,00
<b>PS</b>						
Park <i>et al.</i> (2012)	92,70	7,90	0,00	0,00	0,00	0,00
Sharaddin <i>et al.</i> (2017)	91,57	7,80	0,15	0,04	0,45	0,00
Pessoa Filho (2020)	91,16	8,02	0,10	0,72	0,00	0,00

\*c.r.: Base conforme recebida.

Fonte: Adaptado de Crema (2022)

### 4.2.3 Determinação do poder calorífico

O poder calorífico é uma das mais importantes propriedades do combustível. É avaliado pela quantidade de energia na forma de calor liberada durante a queima total de uma determinada quantidade de combustível (COSTA, 2019). Poder Calorífico Superior (PCS), segundo Nogueira (2007) e Klautau (2008), representa o calor liberado, ou seja, a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível. Poder Calorífico Inferior (PCI) para Calegari *et al.* (2005) e Klautau (2008) é a quantidade líquida e calor liberado durante a combustão. OPCS foi determinado em um calorímetro (modelo AC500, marca LECO) empregando-se o método PO-063/ASTM D5865-13 (ASTM, 2013). O PCI foi calculado a partir do PCS e do teor de H de cada componente e considerando o teor de umidade do combustível, correspondendo à quantidade de calor útil resultante da queima do combustível (Equação 1).

$$PCI = PCS - 2,43(9H + U) \quad (1)$$

onde:

PCI = Poder Calorífico Inferior, em MJ/kg;

PCS = Poder Calorífico Superior, em MJ/kg;

H = Fração mássica do hidrogênio na amostra determinada por meio de análise elementar;

U = Teor de umidade da amostra, determinado na análise imediata, em % em massa.

Devido às características das amostras de plástico mole e EPS que impossibilitaram sua análise elementar e determinação do PCS, foram utilizados dados da literatura como base de referência para o poder calorífico (Tabela 5).

Tabela 5: Poder Calorífico Inferior de materiais plásticos

Tipo de Plástico	[kJ/kg, c.r.]
<i>PEBD</i>	
Sharuddin <i>et al.</i> (2017)	39.500
<i>PP</i>	
Costa (2006)	46.169
Sharuddin <i>et al.</i> (2017)	40.800
<i>PS</i>	
Costa (2006)	41.401
Sharuddin <i>et al.</i> (2017)	43.000

\*c.r.: conforme recebido.

Fonte: Adaptado de Crema (2022)

Para plástico mole foram utilizados valores médios dos plásticos PEBD e PP, e para EPS foram usados os valores de PS.

#### 4.2.4 Análise de elementos-traço

Para a análise de elementos-traço, as amostras foram digeridas a fim de se remover componentes orgânicos empregando-se a norma ASTM D5258-02/SMWW, 23ª Edição, Método 3120 B/PO-248 (ASTM, 2013), que emprega extração ácida de elementos de sedimentos via aquecimento por microondas em recipiente fechado. A quantificação dos elementos-traço foi realizada por ICP-OES (Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado), técnica analítica que consiste na excitação dos átomos com plasma a alta temperatura. Esses átomos se excitam até emitirem o comprimento de onda específico e característico de um elemento (ATOM, 2020).

Os elementos pesquisados foram Alumínio (Al), Antimônio (Sb), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmiio (Cd), Cálcio (Ca), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estanho (Sn), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Selênio (Se), Zinco (Zn).

### 4.3 PREPARAÇÃO DO MATERIAL A SER COMPACTADO

Como anteriormente apresentado, apenas algumas frações de rejeitos de triagem de RSU foram empregadas na composição do CDR: papel/papelão, materiais plásticos (PEBD, PP, PS) e poliestireno expandido (EPS), em proporções baseadas no trabalho de Machado (2022), que utilizou os dados da caracterização gravimétrica ponderada do estado de Santa Catarina contida no Plano Diretor para a Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos do Estado de Santa Catarina (PERS, 2018).

Figura 12: Materiais utilizados na preparação dos compactados



Fonte: Autor (2022)

A composição da fração de rejeitos de RSU e o percentual de glicerol (5% em massa em relação à massa total das amostras) foram mantidos constantes para todas as composições avaliadas neste trabalho, conforme indicado na Tabela 2.

A massa das amostras de cada composição de CDR sem glicerol que foi compactada totalizou 2,5 g. As amostras com adição de glicerol tiveram um acréscimo de 0,125 g (correspondente a 5% da massa total de sólidos), totalizando 2,625 g. Todas as composições foram testadas em triplicata.

A preparação se deu a partir da separação das matérias-primas em recipientes de menores volumes e com as respectivas identificações. As amostras foram pesadas em balança laboratorial (modelo KA-120, marca EXACTA), com precisão de 0,001 g, homogeneizadas, colocadas em sacos plásticos pequenos que facilitaram o manuseio. Após a pesagem das frações, foram produzidas 8 (oito) composições divididas, em 4 (quatro) sem adição de glicerol nomeadas S1, S2, S3 e S4, e 4 (quatro) composições com adição de glicerol nomeadas C1, C2, C3 e C4.

A adição do glicerol (99,7%, NEON) foi realizada com o auxílio de uma pipeta plástica, no momento em que as frações são colocadas no molde da prensa, antes do pré-aquecimento na estufa, a quantidade pipetada foi calculada, baseada na densidade do glicerol que é de 1,261 g/cm<sup>3</sup> a 20 °C.

#### 4.4 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS DE CDR COMPACTADO

As amostras de cada composição foram compactadas utilizando-se uma prensa hidráulica construída por Machado (2022) a partir do modelo descrito por Falemara *et al.* (2018), a qual pode ser visualizada na Figura 13.

O procedimento consistiu em, após pesagem de cada amostra de dada composição, essa foi colocada no molde da prensa e, em seguida, no interior de uma estufa de secagem e esterilização de 80 L, da marca NOVA, para pré-aquecimento do material dado que a prensa utilizada não dispunha de aquecimento. A temperatura de pré-aquecimento foi monitorada com o auxílio de um termômetro portátil com duas entradas tipo K (modelo AK892, AKSO), até atingir 100 °C, tal como pode ser observado na Figura 14.

Figura 13: Prensa hidráulica utilizada no preparo das amostras de CDR compactado



Fonte: Autor (2022)

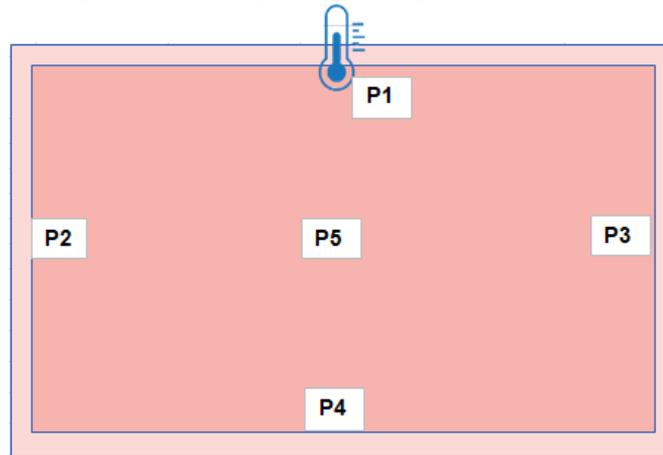
Figura 14: Amostra na estufa, compartimento da prensa e controle de temperatura



Fonte: Autor (2023)

O termopar composto por dois sensores foi acoplado à estufa, à amostra somente foi retirada quando as duas temperaturas estabilizaram em 100 °C. Na Figura 15 estão apresentados os pontos selecionados para calibração da estufa, realizada antes do processo de compactação. A temperatura em cada um desses pontos foi medida 3 vezes para verificação de sua estabilidade e uniformidade.

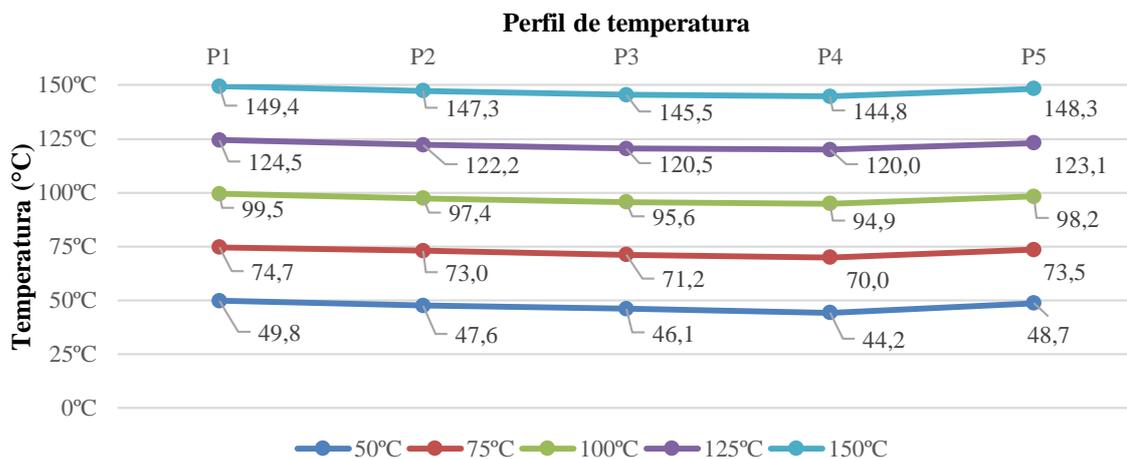
Figura 15: Mapeamento do perfil de temperatura no interior da estufa



Fonte: Autor (2023)

Os resultados dessa calibração foram apresentados na Figura 14, e demonstram uniformidade de temperatura.

Figura 16: Perfil de temperatura da estufa empregada no pré-aquecimento das amostras de CDR antes da compactação



Fonte: Autor (2023)

O ponto P5 foi selecionado como ponto no qual ficaram localizadas as amostras durante o seu pré-aquecimento por ser o ponto com maior estabilidade de temperatura.

Segundo Auprakul *et al.* (2019) a temperatura leva a menor carga e amacia o aglutinante natural (como óleo, amido, lignina ou proteína) durante o processo de compactação. Posteriormente, a amostra pré-aquecida foi imediatamente colocada no compartimento da prensa hidráulica e iniciada a compressão nas condições descritas a seguir.

No experimento de Garrido *et al.* (2017) foram utilizadas as seguintes especificações pressões (22-67 MPa) e temperaturas (ambiente-130 °C), já De Donato *et al.* (2016)

empregou pressões de ( $7,85 \times 10^{-4}$  a  $3,14 \times 10^{-3}$  MPa) e temperaturas (150 °C a 250 °C). Em virtude de limitações da prensa utilizada, a pressão empregada foi de aproximadamente 46,9 MPa, valor medido por Machado (2022), limite possível de se atingir no equipamento. O material foi pressionado por cerca de 5 minutos, conforme tempo médio aplicado em estudos anteriores (GUG, CACCIOLA e SOBKOWICZ, 2015; SONG *et al.*, 2021; MACHADO, 2022). A pressão de compactação utilizada foi mantida constante em todos os ensaios, assim como a temperatura de pré-aquecimento do material, que foi de 100 °C.

#### **4.4.1 Caracterização das amostras de CDR produzidas**

Os testes utilizados para avaliar a qualidade das amostras de CDR em termos de absorção de umidade, qualidade de transporte (resistência mecânica), densidade do compactado, resistência ao intemperismo e umidade foram descritos a seguir.

##### 4.4.1.1 Teste de absorção de água

O teste de absorção de água foi baseado na metodologia de Gug, Cacciola e Sobkowicz (2015), e seu objetivo foi quantificar o grau de absorção e avaliar a resistência física e mecânica dos compactados. Nesse teste as amostras de CDR foram pesadas em balança com precisão de 0,001 g (modelo KA-120, EXACTA), mergulhadas em um recipiente com água a temperatura ambiente e deixadas nessa condição por 60 min. Após esse período, as amostras seriam secas superficialmente com auxílio de um papel toalha para retirada do excesso de água e pesadas novamente, deixadas em repouso e observadas após 48 h a fim de verificar sua integridade após absorção. Entretanto, não foi possível a complementação desse teste, pois as amostras assim que colocadas no recipiente, após alguns minutos, se desagregaram completamente, tanto as composições S (sem glicerol) quanto as C (com glicerol).

##### 4.4.1.2 Teste de resistência mecânica

O teste de resistência mecânica foi baseado nas metodologias empregadas por Khankari *et al. apud* Al-Wilyan *et al.* (2002) e de Sah *et al. apud* Al-Wilyan *et al.* (2002), que consistiu em deixar as amostras caírem livremente de uma altura de 1,85 m sobre uma chapa

plana de aço, com 4 (quatro) repetições para cada peça de CDR compactado, a fim de se avaliar ocorrência de trincas, perdas de massa e deformidades nas peças.

A perda de massa foi calculada por meio da relação entre a massa final e a massa inicial das amostras de CDR compactado após as 4 (quatro) repetições de queda, conforme Equação 2:

$$\text{Resistência mecânica}(\%) = \left(\frac{m_f}{m_i}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

onde:

$m_f$  representa a massa final do CDR compactado após 4 (quatro) repetições de queda;

$m_i$  representa a massa inicial do CDR compactado.

As amostras de CDR compactado com perda de massa maior do que 10% foram avaliadas como reprovadas.

#### 4.4.1.3 Densidade

A densidade da madeira é um dos fatores mais significativos e mais empregados, pois intervém em diversas propriedades da madeira. Ela é estabelecida como massa seca por unidade de volume saturado (BOWYER *et al.*, 2003). O método utilizado para a determinação da densidade das amostras de CDR produzidas foi descrito por Rabier *et al.* (2006), no qual, com o auxílio de um paquímetro e de uma balança com precisão de 0,001g (modelo KA-120, Exacta,) foram medidas as dimensões (diâmetro e altura) e a massa das amostras de CDR. A partir disso, a densidade foi calculada por meio da Equação 3.

$$d = \frac{m}{V} \quad (3)$$

onde:

$m$  representa a massa do CDR compactado;

$V$  representa o volume do CDR compactado, medido após 24 horas de sua compactação.

Figura 17: Medições no paquímetro e pesagem na balança para cálculo de densidade



Fonte: Autor (2023)

#### 4.4.1.4 Teste de resistência a intemperismo e umidade

O teste de intemperismo e umidade foi baseado no procedimento realizado por Song *et al.* (2021), onde os péletes foram colocados no ambiente externo, sem qualquer proteção e expostos as condições climáticas. Os péletes foram observados durante 14 dias, e diariamente foram anotadas as condições do clima. Após esse período de exposição, a variação de espessura ( $\Delta h$ ) (Equação 4) e de massa (Equação 5) de cada pélete foram calculadas para determinação da resistência ao intemperismo e avaliar prováveis mudanças de aspecto.

$$\Delta h = \frac{h_i - h_o}{h_o} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$R_m = \frac{m_i - m_o}{m_o} \cdot 100\% \quad (5)$$

onde:

$h_i$  representa a espessura inicial do CDR compactado;

$h_o$  representa a espessura final do CDR compactado;

$m_i$  representa a massa inicial do CDR compactado;

$m_o$  representa a massa final do CDR compactado.

Após a exposição às condições atmosféricas, a variação da espessura dos péletes e as mudanças no aspecto definem sua qualidade e indicam sua aprovação ou reprovação.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção foram apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. No primeiro momento foram realizadas caracterizações dos materiais, frações de RSU e biomassas utilizadas. Os parâmetros contemplados foram: análise imediata, análise elementar, Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior, teor de cloretos e análise de elementos-traço. Considerações importantes observadas no processo de compactação do CDR foram apresentadas. Para finalizar, foram realizadas caracterizações do CDR, com testes que compreendem absorção de umidade, resistência mecânica, densidade e resistência ao intemperismo.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS SÓLIDOS

A Tabela 6 apresenta os resultados da caracterização físico-química das amostras de cada uma das frações dos rejeitos de RSU, das biomassas e das composições sem adição de glicerol elaboradas neste estudo. Esses resultados foram discutidos nas seções a seguir.

Tabela 6: Propriedades dos sólidos originais e das composições de CDR sem adição de glicerol estudadas: resultados das análises imediata, elemental, poder calorífico e elementos-traço

	Papel/ papelaão	Plástico mole	EPS	Casca de arroz	Palha de arroz	Serragem pinus	Serragem eucalipto	S1 <sup>a</sup>	S2 <sup>b</sup>	S3 <sup>c</sup>	S4 <sup>d</sup>
<b>Análise imediata [% m/m]</b>											
Cinzas [b.s. <sup>e</sup> ]	5,70	1,76	0,61	11,77	18,66	0,32	1,18	15,07	1,56	1,22	1,91
Matéria Volátil [b.s.]	85,21	97,49	99,39	72,35	67,94	85,29	82,63	72,46	84,75	85,81	83,69
Carbono Fixo <sup>f</sup> [b.s.]	9,09	0,75	0,00	15,88	13,40	14,39	16,19	12,47	13,69	12,97	14,41
Umidade [c.r. <sup>g</sup> ]	8,54	3,31	1,91	10,81	10,89	7,41	11,90	10,18	9,20	7,40	11,00
<b>Análise elemental [% m/m, b.s.]</b>											
C	53,18	85,60 <sup>h</sup>	91,57 <sup>h</sup>	41,38	29,52	48,38	46,47	37,10	50,00	50,76	49,24
H	8,17	13,40 <sup>h</sup>	7,80 <sup>h</sup>	6,17	4,46	6,83	6,76	5,60	7,26	7,29	7,23
N	0,24	0,26 <sup>h</sup>	0,15 <sup>h</sup>	0,39	0,61	0,23	0,24	0,51	0,24	0,23	0,24
S	0,14	0,00 <sup>h</sup>	0,04 <sup>h</sup>	0,04	0,18	0,01	0,02	0,15	0,03	0,03	0,04
O <sup>i</sup>	32,49	0,62 <sup>h</sup>	0,00 <sup>h</sup>	40,20	45,88	44,23	45,28	41,15	40,93	40,51	41,35
Cl	0,08	0,00 <sup>h</sup>	0,00 <sup>h</sup>	0,05	0,69	<0,01 <sup>j</sup>	0,05	0,49	0,03	0,01	0,05
<b>Poder calorífico [MJ/kg, b.s.]</b>											
PCS <sup>k</sup>	19,53	38,95 <sup>l</sup>	41,39 <sup>m</sup>	18,84	15,54	19,69	19,66	17,93	20,49	20,50	20,48
PCI <sup>n</sup>	17,72	36,01 <sup>o</sup>	39,63 <sup>o</sup>	17,48	14,56	18,18	18,17	16,69	18,89	18,89	18,89
<b>Elementos-traço [mg/kg, b.s.]</b>											
Alumínio	192,27	452,62	<0,10 <sup>p</sup>	<0,10 <sup>p</sup>	<0,10 <sup>p</sup>	10,27	404,14	46,88	212,64	55,09	370,19
Antimônio	<0,005 <sup>q</sup>	1,94	0,01	<0,005 <sup>q</sup>	<0,005 <sup>q</sup>	<0,005 <sup>q</sup>	3,00	0,07	1,27	0,07	2,47
Arsênio	<0,01 <sup>j</sup>	244,19	0,00	97,67	0,00	195,35					
Bário	<0,10 <sup>p</sup>	34,38	<0,10 <sup>p</sup>	<0,10 <sup>p</sup>	<0,10 <sup>p</sup>	14,64	<0,10 <sup>p</sup>	1,27	7,91	12,97	1,27
Cadmio	<0,001 <sup>r</sup>	0,51	0,72	0,20	0,00	0,41					

Cálcio	20832,45	686,66	1027,40	690,33	3030,62	498,05	512,23	5449,95	3710,41	3704,74	3716,08
Cobalto	<0,01 <sup>j</sup>	<0,01 <sup>j</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00					
Cobre	2,01	18,22	0,01	2,26	0,93	<0,009 <sup>s</sup>	160,31	1,89	65,11	0,99	129,23
Cromo	<0,01 <sup>j</sup>	236,94	0,00	94,78	0,00	189,55					
Estanho	<0,10 <sup>p</sup>	<0,10 <sup>p</sup>	0,00	0,00	0,00	0,00					
Ferro	50,39	49,33	76,44	139,10	91,75	10,27	53,41	89,28	35,67	18,41	52,92
Manganês	4,97	1,64	<0,10 <sup>p</sup>	80,14	205,52	79,94	43,88	150,21	50,37	64,79	35,94
Selênio	2,85	<0,01 <sup>j</sup>	<0,01 <sup>j</sup>	<0,01 <sup>j</sup>	1,45	<0,01 <sup>j</sup>	<0,01 <sup>j</sup>	1,43	0,45	0,45	0,45
Zinco	72,26	32,64	105,29	11,52	17,48	4,37	5,20	26,46	17,02	16,69	17,35

<sup>a</sup>Composição S1 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 12% casca de arroz e 68% Palha de arroz); <sup>b</sup>Composição S2 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 40% serragem de pinus e 40% serragem de eucalipto); <sup>c</sup>Composição S3 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 80% serragem de pinus); <sup>d</sup>Composição S4 (15,72% papel/papelão, 3,68% plástico mole, 0,60% EPS, 80% serragem de eucalipto); <sup>e</sup>Base seca; <sup>f</sup>Valor calculado por diferença; <sup>g</sup>Base conforme recebida; <sup>h</sup>Resultados apresentados por Sharuddin *et al.* (2017); <sup>i</sup>Valor calculado por diferença; <sup>j</sup>Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,01%; <sup>k</sup>Poder Calorífico Superior; <sup>l</sup>Resultados apresentados por Areeprasert *et al.* (2017); <sup>m</sup>Resultados apresentados por Pessoa Filho (2020); <sup>n</sup>Poder Calorífico Inferior; <sup>o</sup>Valor calculado por meio da Equação 1; <sup>p</sup>Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,1%; <sup>q</sup>Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,005%; <sup>r</sup>Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,001%; <sup>s</sup>Não quantificável, limite inferior de quantificação igual a 0,009%.

Fonte: Autor (2023)

### 5.1.1 Análise imediata

A análise imediata engloba os teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo. Os teores de umidade das biomassas de casca de arroz (10,81%, c.r.), palha de arroz (10,89%, c.r.), serragem de pinus (7,41%, c.r.) e serragem eucalipto (11,90%, c.r.), encontram-se dentro dos valores encontrados nos estudos de Auprakul *et al.* (2019) e Gallardo *et al.* (2020) que apresentam teor de umidade entre 6% e 12%. Os trabalhos de Gentil (2008), Gonçalves (2009) e Wilaipon (2007) apontaram que o teor de umidade da biomassa deve ser de 8% a 15% para aglomeração de partículas. Na pesquisa de Gentil (2008), o teor de umidade para serragem foi de 11,1%, Gonçalves (2009) utilizou resíduos madeireiros contendo 12% de umidade, já Wilaipon (2007) verificou que o teor de umidade para biomassa de espiga de milho foi de 15,2%.

Os baixos teores de umidade para plásticos e EPS podem ser explicados parcialmente pela capacidade absorviva do material, por se tratarem de polímeros e de baixa densidade. De acordo com Quirino (1991), máquinas briquetadeiras de pistão hidráulico aceitam materiais com até 20% de umidade. O trabalho Seye *et al.* (2008) mostra que um teor de umidade de até 14% gera nenhuma ou pouca dificuldade no processo de combustão. A umidade das biomassas interfere diretamente em outros parâmetros como o poder calorífico inferior, que decresce com o aumento da umidade, e a condutividade térmica (QUIRINO, 1991; MOERS *et al.*, 2011).

Os resultados obtidos na determinação do teor de cinzas das matérias-primas e misturas utilizadas neste trabalho foram indicados na Tabela 6. O teor de cinzas de um combustível é um fator importante no seu emprego como combustível, pois dependendo de sua composição química, em altas temperaturas podem fundir e provocar incrustações nos equipamentos (MAIA, 2013).

Os teores de cinzas das frações de materiais empregados na composição do CDR, em geral, foram baixos, demonstrando uma diferença entre as biomassas florestais e da rizicultura. Os resultados variaram entre 0,61% (b.s.) para EPS, fração de RSU, e 18,66% (b.s.) para palha de arroz. Esse valor encontrado para o teor de cinzas na palha de arroz é semelhante ao encontrado por Machado (2022), que foi 19,76% (b.s.). Entre as composições S1, S2, S3 e S4, o teor de cinzas variou de 1,22% para composição S3 a 15,07% para composição S1, baseada na biomassa da rizicultura e previamente estudada por Machado (2022). Os maiores teores de cinza estão nas biomassas da rizicultura, casca de arroz com 11,77% (b.s.), bem como na composição S1, 15,07%, composta de biomassa da rizicultura.

As composições S2, S3 e S4 são baseadas em biomassa florestal, que tipicamente tem baixo teor de cinzas (0,32%, b.s., para serragem de pinus e 1,18%, b.s., para serragem de eucalipto) e, por isso, apresentaram valores baixos e próximos entre si para esse parâmetro (1,56% para S2, 1,22% para S3 e 1,91% para S4, em b.s.).

Os resultados de teor de cinzas no trabalho realizado por Magalhães *et al.* (2019) apresentam para papel de impressão (3,93%), papelão (2,44%) e papel de jornal (1,89%) (b.s.), estando o valor encontrado neste trabalho para papel/papelão bem próximo a esses (5,70%, b.s.).

Recomenda-se que briquetes sejam compostos por materiais com teor de cinzas preferencialmente abaixo de 4% (b.s.) (Chen *et al.* 2009). Dentre as frações de RSU, papel/papelão apresentou maior teor de cinzas, 5,70% (b.s.). Como as cinzas não queimam, briquetes com baixos teores são mais recomendados (Akowuah *et al.*, 2012).

Os componentes minerais também são indesejáveis do ponto de vista energético (BRAND, 2010). Em alta concentração, as cinzas causam perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor (MOERS *et al.*, 2011). A cinza residual é indesejável, portanto quanto menor o teor melhor é a qualidade do combustível (GENTIL, 2008; ALVES *et al.*, 2012; OLADEJI, 2010). Em alta concentração, podem diminuir o poder calorífico, e ainda causar perda de energia e sua presença afeta também a transferência de calor (MOERS *et al.*, 2011).

Todas as amostras caracterizadas apresentaram alto teor de voláteis, variando de 67,94% (b.s.) para palha de arroz, 99,39% (b.s.) para EPS (Tabela 6). EPS e plástico apresentam os maiores valores, isso caracterizado pela facilidade de ignição para combustão que esses resíduos apresentam. Em geral o teor de voláteis das biomassas varia entre 70-85% (b.s.) (CARVALHO *et al.* (2021). Os resultados das biomassas de madeira de pinus e eucalipto ficaram em 85,29% (b.s.) e 82,63% (b.s.), respectivamente, que representa altos teores de voláteis. Paula (2010) apresentou valores de 78% a 83% (b.s.) para resíduos de madeira, enquanto Souza *et al.* (2012) encontrou valores de 82% a 86% (b.s.) para esses mesmos resíduos.

O teor de voláteis aponta a parcela do material que tem por encargo o início da conversão térmica. É a fração liberada no estágio inicial de aquecimento do material e descreve a sua reatividade. Quando presente em teores representativos na biomassa, pode iniciar a combustão em temperaturas mais baixas (NOGUEIRA; LORA 2010). O teor de volátil determina uma maior facilidade de ignição e estabilidade da chama durante a combustão. No entanto, a velocidade de devolatilização também está relacionada com a

estrutura e à decomposição das partículas de biomassa na combustão (VIRMOND *et al.*, 2012)

O teor de carbono fixo representa a massa restante após a saída de compostos voláteis e excluindo-se as cinzas e a umidade do material (VIERA, 2012). Com relação ao teor de carbono fixo, tem-se que quanto maior seu valor maior a quantidade de calor gerada na combustão (SILVEIRA, 2008). As biomassas de madeira apresentaram resultados dentro dos esperados por NOGUÉS (2010), pinus, 14,39% (b.s.) e eucalipto, 16,19% (b.s.). Nesta pesquisa, a porcentagem de carbono fixo para madeira de pinus foi inferior ao encontrado por Peng (2013), que foi de 16,8% (b.s.). Os níveis esperados de carbono fixo em resíduos de biomassa variam entre 7% e 20% (b.s.) (YAO *et al.*, 2005), portanto, os valores encontrados estão dentro do esperado. Theis *et al.* (2006) encontraram valores de carbono fixo para resíduos de palha de aveia de 13,6% (b.s.), enquanto García *et al.* (2012) observaram valores de 18,85% (b.s.) para aveia em farelo e 20,67% (b.s.) para resíduos de palha de aveia, valores próximos aos obtidos nesse estudo.

O EPS é resultado da polimerização do estireno (um derivado de petróleo) em água e pertencendo ao grupo dos termoplásticos. Os valores baixos de carbono fixo para o plástico (0,75%) e para o EPS (0%) são inversamente correspondentes aos valores altos de materiais voláteis (97,49%) e (99,82%) respectivamente, pois a quantidade de carbono fixo da amostra é o resultado das substâncias remanescentes da etapa de devolatilização. EPS e plásticos são derivados fósseis e, conseqüentemente, há contribuição associada ao efeito estufa, dado que não são renováveis, portanto sua combustão implicará em emissões de CO<sub>2</sub>. Há de se destacar que a mistura com biomassas ameniza os impactos e viabiliza seu aproveitamento energético.

### **5.1.2 Análise elementar**

A determinação da composição elementar de combustíveis é muito importante, pois a energia gerada na queima está diretamente associada à concentração dos principais componentes do combustível (C, H, N, S e O) e à entalpia de combustão de carbono, hidrogênio e enxofre (TRUGILHO, P.F. *et al.*, 2010). Pela análise elementar, pode-se verificar que produzido. Os elementos C e H contribuem positivamente para o PCS, enquanto o teor de H associado ao teor de O também afeta o PCI, devido à formação de água (VIRMOND *et al.*, 2012). De acordo com Protásio *et al.* (2011), é desejável que a madeira apresente elevados teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio devido às correlações existentes entre esses elementos e o poder calorífico. Altas concentrações de

oxigênio na biomassa decrescem o seu poder calorífico (NORDIN, 1994; HUANG *et al.*, 2009; PROTÁSIO *et al.*, 2011), enquanto altos teores de carbono e hidrogênio contribuem com o aumento do valor calórico (DEMIRBAS; DEMIRBAS, 2004; PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Biomassas de madeira apresentam teores de carbono muito semelhantes na análise elementar, já as biomassas da rizicultura estudadas apresentam teores de carbono semelhantes a outros estudos similares, como espiga de milho, de 40,50% (WILAIPON, 2007), casca de banana, de 41,47% (WILAIPON, 2009), casca de café, de 47,5% (FELFLI *et al.*, 2011). Altos valores de poder calorífico geralmente estão associados a altos valores de teor de carbono. O hidrogênio, assim como o carbono, é oxidado durante a combustão e geram energia na forma de calor. A casca de arroz apresentou teor de hidrogênio de 6,17%, a palha, 4,46%, madeiras de pinus, 6,83% e o eucalipto 6,76% enquanto as composições apresentaram valores semelhantes. Teores similares foram encontrados para a casca de arroz por Morais *et al.* (2006), de 4,29 %, e por Felfli *et al.* (2011), de 5,2% também para a casca de arroz. De acordo com Protásio *et al.* (2011), para produção de bioenergia é desejável que o combustível apresente elevados teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio.

Segundo Obernberger *et al.* (2006), problemas de emissão relacionados a combustíveis sólidos podem ser esperados quando a concentração de N se apresenta acima de 0,6% em massa (b.s.). Dentre os sólidos analisados neste trabalho, o único que apresentou teor de nitrogênio (N) acima de 0,6% (b.s.), foi a palha de arroz com 0,61% (b.s.), as demais ficaram abaixo, inclusive as composições apresentaram valores menores que esse.

Os teores de enxofre são inferiores aos valores de referência dos combustíveis fósseis convencionais (0,1-0,2% em CDR, 3-5% em combustíveis fósseis), conforme expresso por Genon e Brizio (2008). Nas composições estudadas, a que apresentou maior concentração de enxofre foi a composição S1, com 0,15% (b.s.).

A presença de cloro também gera emissões de HCl (ácido clorídrico), sais de cloro e pode promover a formação de dioxinas e furanos (PCDD/PCDF), ou seja, altos teores de cloro nos resíduos podem causar problemas operacionais, nesse sentido, resíduos de Policloreto de Vinila (PVC) não são adequados para recuperação energética por conterem alta concentração desse elemento (GIZ, 2017).

A norma NBR 16849/2020 (ABNT, 2020) foi instituída para resíduo sólido urbano para fins energéticos (RSUE), nela algumas especificações são obrigatórias: PCI, teor de cloro, expresso em porcentagem (%), e teor de mercúrio, expresso em miligrama por quilograma (mg/kg). Conforme essa norma, os RSUE devem apresentar concentração de cloro

de  $3\% \leq Cl \leq 3,00\%$ ) em base seca, e estabelece um sistema de classificação que determina valores-limites para teor de cloro (%), tal como descrito na Tabela 7. Todas amostras analisadas neste trabalho apresentaram teores de cloro dentro das especificações da norma, a amostra de palha de arroz apresentou 0,69%, classificada como C2 pela norma, as demais concentrações ficaram abaixo de 0,5%, sendo classificadas como C1. Segundo Machado (2022), o teor de cloro mais alto na biomassa palha de arroz em relação às outras, pode estar vinculado aos insumos utilizados no tratamento de pragas do cultivo do arroz.

Tabela 7: Limites de cloro para classificação de RSU para fins energéticos no Brasil

		C1	C2	C3
Teor de cloro (%)	Limite superior da média ( $P \geq 95\%$ )	$Cl \leq 0,5$	$0,5 < Cl \leq 1,5$	$1,5 < Cl \leq 3,0$

Fonte: Autor, baseado na NBR 16849/2020 (ABNT, 2020)

### 5.1.3 Análise de elementos-traço

A mistura dos resíduos sólidos urbanos com baterias, tintas, eletrônicos e outros materiais podem levar à sua contaminação com elementos traços potencialmente tóxicos. Os resíduos vegetais também podem apresentar essas contaminações causadas pela contaminação metálica (Zn ou Cu) das plantas ou suplementação da alimentação dos animais (PARADELO *et al.*, 2011).

A necessidade da avaliação dos elementos-traços também é apresentada na da NBR 16.849/2020 (ABNT, 2020), que traz os requisitos para a aplicação dos RSU para fins energéticos e que recomenda a determinação da concentração de um ou mais elementos em base seca, sendo eles: antimônio, arsênio, berílio, chumbo, cobalto, estanho, manganês, níquel, platina, paládio, ródio, selênio, tálio, telúrio e vanádio. As análises para determinação das concentrações de chumbo e mercúrio não puderam ser realizadas neste trabalho devido a limitações analíticas. O mercúrio é o mais tóxico e mais bioacumulável, e sua determinação, juntamente com a de chumbo, deverá ser realizada na sua continuidade deste trabalho.

Nas frações de RSU avaliadas, bem como nas composições, o Ca foi o elemento mais abundante. A fração de papel/papelão apresentou a maior concentração 20832,45 mg/kg. Na fração papel/papelão o cálcio deve ser proveniente da utilização de carbonato de cálcio na produção do papel (carga ou película de revestimento). Para a casca de arroz, a presença de Cálcio pode ser justificada pelo uso deste macronutriente na adubação da produção do arroz.

Em seguida foram elencados os elementos-traços que foram encontrados em segundo e terceiro lugares em termos de concentração, em conjunto com as amostras referentes. Em segundo lugar estiveram o Al para papel/papelão, plástico mole, serragem de eucalipto (S1 e S4); o Mn para casca de arroz, palha de arroz, serragem de pinus e S1, e o Zn para EPS. O terceiro elemento com maior concentração foi o Fe para plástico mole, EPS, casca de arroz, palha de arroz, S1, e Zn para papel/papelão; Ba para serragem de pinus; Ar para serragem eucalipto, S2 e S4, e Al para S3.

Dentre os elementos químicos avaliados nesta dissertação, alguns são metais pesados e apresentam alta toxicidade devido à sua não-biodegradabilidade e a bioacumulação em organismos vivos, como por exemplo arsênio, cádmio, cobre, estanho, antimônio e cromo.

A presença de arsênio (244,94 mg/kg) nas amostras de serragem de eucalipto é preocupante, pode estar caracterizando uma contaminação, tendo em vista que o material utilizado era de madeira sem tratamento com preservativos segundo a fonte. No trabalho de Pereira Junior (2015), para alburno de *Eucalyptus sp.*, a concentração de As encontrada foi de  $9 \pm 6$  µg/g, muito inferior ao encontrado nesta dissertação. As possíveis explicações seriam o uso de pesticidas (VASSILEV *et al.*, 1999) e as plantações em solos contaminados. O trabalho de Melo, Dias e Assis (2015), que avaliou a fitorremediação de solos contaminados com As por outras leguminosas, demonstra que as plantas avaliadas apresentavam mecanismos de acumulação de translocação desse metaloide.

Para todos sólidos originais e frações analisados, a concentração de Cd foi inferior ao limite de detecção do experimento, com exceção da serragem de eucalipto (0,51 mg/kg), o que corrobora a hipótese de que esta madeira pode ter sido plantada em regiões de solo contaminado. Ncube e Phiri (2015) que avaliaram madeiras da Zambia encontraram 3,3-7,9 mg/kg para a serragem de eucalipto e 5,1-8,6 mg/kg para a serragem de pinus.

Ainda sobre os metais pesados, estanho não foi encontrado dentro dos limites de medição experimental para nenhuma das frações/composições.

Cromo foi encontrado apenas na fração serragem de eucalipto e, conseqüentemente, nas composições S2 e S4. Pereira Junior (2015) encontrou foi  $16 \pm 8$  µg/g para o alburno de *Eucalyptus sp.* No estudo de Ncube e Phiri (2015), a composição encontrada foi de 4,9-56,9 mg/kg para a serragem de eucalipto e 9,9-28,2 mg/kg para pinus.

Antimônio é comumente utilizado na fabricação de plásticos, como catalisador, retardante de chama ou pigmento (VICZEK *et al.*, 2020). Neste estudo encontrou-se a concentração de 1,94 mg/kg) para a fração plástico mole e 0,1 mg/kg para o EPS.

#### 5.1.4 Poder calorífico

Nos estudos de Sing *et al.* (2012), Faizal *et al.* (2016), Chaitanya *et al.* (2017) e Song *et al.* (2021), onde as amostras de compactados de biomassa foram testadas com base na norma ASTM D240 (ASTM, 2019), os valores encontrados nesses estudos estão entre 18,00 e 22,33 MJ/kg (base seca) com até 60% de participação de RSU na mistura, para diferentes tipos de biomassa. Relacionando com estudos anteriores, baseados na norma, os resultados apresentaram valores que se enquadram com as referências, S1, 17,93 MJ/kg; S2, 20,49 MJ/kg; S3, 20,50 MJ/kg e S4, 20,48 MJ/kg.

Conforme a norma NBR 16849/2020 (ABNT, 2020), os Resíduos Sólidos Urbanos para fins Energéticos (RSUE) devem apresentar  $PCI \geq 19,88$  MJ/kg base seca, há um sistema de classificação que determina valores-limites, descrito na Tabela 8. Das amostras analisadas, apenas plástico mole e EPS apresentaram valores acima de 19,88 MJ/kg, sendo classificados como P1. Palha de arroz apresentou PCI de 14,56 MJ/kg e foi classificada como P3, e as demais amostras, incluindo as composições S1, S2, S3 e S4, apresentaram resultados entre 14,98 MJ/kg e 19,88 MJ/kg, sendo, classificadas como P2.

Tabela 8: Limites para classificação de PCI do RSU para fins energéticos no Brasil segundo a norma NBR 16849/2020

PCI (base seca)		P1	P2	P3
MJ/kg	Limite superior da média ( $P \geq 95\%$ )	$PCI \leq 19,88$	$19,88 < PCI \leq 14,98$	$14,98 < PCI \leq 10$

Fonte: Autor, baseado na NBR 16849/2020 (ABNT, 2020)

A Tabela 9 apresenta um comparativo entre os valores de PCI das frações de materiais e das amostras de CDR em relação às especificações da ASTM D240 e indica a classificação conforme a norma NBR 16849. As amostras de plástico mole e EPS apresentaram valores de PCI classificadas como P1, S1 apresentou 16,69 MJ/kg, dentro das especificações da norma ASTM D240 (ASTM, 2019), mas abaixo quando comparados com estudos realizados por Sing *et al.* (2012), Faizal *et al.* (2016), Chaitanya *et al.* (2017) e Song *et al.* (2021), com valores entre 18,00 MJ/kg e 22,33 MJ/kg (b.s.). A norma NBR 16849/2020 (ABNT, 2020) estabelece que RSUE devem apresentar  $PCI \geq 19,88$  MJ/kg base seca, nas especificações dessa norma, S1 está reprovado.

As demais amostras (S2, S3 e S4) apresentaram valores de PCI iguais a 18,89 MJ/kg, sendo classificadas como P2 por meio da referida norma.

Tabela 9: Resultados PCI (ASTM D240/ NBR16849)

	PCI (MJ/kg, b.s.)	ASTM D240*	NBR16849**
<b>Papel/Papelão</b>	17,72	Reprovado	P2
<b>Plástico mole</b>	36,01	Aprovado	P1
<b>EPS</b>	39,63	Aprovado	P1
<b>Casca de arroz</b>	17,48	Reprovado	P2
<b>Palha de arroz</b>	14,56	Reprovado	P3
<b>Pinus</b>	18,18	Aprovado	P2
<b>Eucalipto</b>	18,17	Aprovado	P2
<b>S1</b>	16,69	Reprovado	P2
<b>S2</b>	18,89	Aprovado	P2
<b>S3</b>	18,89	Aprovado	P2
<b>S4</b>	18,89	Aprovado	P2

\*Sing *et al.* (2012), Faizal *et al.* (2016), Chaitanya *et al.* (2017), ASTM D240 (ASTM, 2019)

\*\*NBR 16849/2020 (ABNT, 2020), RSU para fins Energéticos (RSUE)

Fonte: Autor (2023)

O CDR tem como características poder calorífico considerável, composição físico-química homogênea, facilidade de armazenamento, facilidade de manuseio e transporte, e menor emissão de poluentes (GENDEBIEN *et. al.*, 2003; KOBAYASHI *et. al.*, 2005). Observa-se que o poder calorífico das composições ficou entre 16,08 MJ/kg para S2 e 18,34 MJ/kg para S4. Nota-se que as amostras de termoplásticos têm um PCS maior quando comparados com as outras amostras apresentadas na Figura 24, isso se deve aos polímeros serem derivados do petróleo. O termoplástico é um composto rico em carbono, que é responsável pela elevação do poder calorífico. Se a proporção de termoplásticos nas composições de CDR for aumentada em trabalhos futuros, espera-se obter CDR com maior poder calorífico.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS DE CDR

A Tabela 6 apresenta os resultados da caracterização físico-química das amostras de cada uma das frações dos rejeitos de RSU, das biomassas e das composições sem a adição de glicerol elaboradas neste estudo. Esses resultados foram discutidos nas seções a seguir.

### 5.2.1 Absorção de umidade

Mergulhadas as amostras de CDR das composições S1, S2, S3, C1, C2, C3 em água, essas logo apresentaram desintegração, coincidindo com os estudos de Sing *et al.* (2012) e Greinert, Mrówczyńska e Szefer (2019). Os mesmos estudos apontam que uma maior

quantidade de RSU proporciona uma maior resistência à umidade, com menor grau de desintegração, mas isso não pode ser avaliado neste trabalho, pois o percentual de RSU não foi variado. As composições S4 e C4 (Figura 23) apresentaram desintegração após aproximadamente 1 min submersas em água, caracterizando que as composições que apresentam menor absorção foram aquelas com maiores quantidades de biomassa de eucalipto. Estudos realizados por Morrugo *et al.* (2019) indicam como positivo o uso de glicerol nos compactados para aumento da resistência a umidade, porém, neste trabalho o comportamento das amostras adicionadas de glicerol foi semelhante aos das amostras sem esse aglutinante. Este trabalho não contemplou teste de absorção de umidade ambiente (sem submersão em água).

Figura 18: Decomposição dos CDR mergulhados em água para teste de umidade



Fonte: Autor (2023)

### 5.2.2 Teste de resistência mecânica

Os resultados do teste de resistência mecânica foram apresentados na Tabela 10. Neste trabalho, os péletes com perda de massa maior do que 10% foram avaliados como reprovados. Os resultados de perda de massa variaram entre 0,44% para S4 e 3,53% para S1. Relacionando-se a resistência mecânica dos compactados com a norma europeia CEN/TS 15210-1 (para biocombustíveis sólidos), percebe-se que os compactados devem ter resistência mecânica acima de 95% (CAMARGO *et al.*, 2020).

Apesar de todas as amostras estarem dentro dos parâmetros e aprovadas, o trabalho apresenta uma diferença significativa entre S1 e demais composições, que apresentaram resultados de perda de massa abaixo de 1%.

Tabela 10: Resultados das medições de massas iniciais e pós-queda, e do cálculo da perda de massa e da resistência mecânica das amostras de CDR compactado.

Massa inicial (g)	Massa pós-queda (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)	Resistência mecânica (%)	Resultado
<b>S1</b>					
2,3489	2,2659	0,0830	3,53	96,47	Aprovado
2,3501	2,2733	0,0768	3,27	96,73	Aprovado
2,4553	2,3801	0,0752	3,06	96,94	Aprovado
<b>C1</b>					
2,2057	2,1929	0,0128	0,58	99,42	Aprovado
2,3755	2,3598	0,0157	0,66	99,34	Aprovado
2,4981	2,4802	0,0179	0,72	99,28	Aprovado
<b>S2</b>					
2,5188	2,5004	0,0184	0,73	99,27	Aprovado
2,4138	2,3980	0,0158	0,65	99,35	Aprovado
2,6350	2,6188	0,0162	0,61	99,39	Aprovado
<b>C2</b>					
2,6934	2,6814	0,0120	0,45	99,55	Aprovado
2,9877	2,9713	0,0164	0,55	99,45	Aprovado
2,8236	2,8117	0,0119	0,42	99,58	Aprovado
<b>S3</b>					
2,4411	2,4213	0,0198	0,81	99,19	Aprovado
2,5524	2,5403	0,0121	0,47	99,53	Aprovado
2,6450	2,6331	0,0119	0,45	99,55	Aprovado
<b>C3</b>					
2,5906	2,5788	0,0118	0,46	99,54	Aprovado
2,5393	2,5255	0,0138	0,54	99,46	Aprovado
2,5364	2,5194	0,0170	0,67	99,33	Aprovado
<b>S4</b>					
2,4125	2,4018	0,0107	0,44	99,56	Aprovado
2,4043	2,3893	0,0150	0,62	99,38	Aprovado
2,3583	2,3455	0,0128	0,54	99,46	Aprovado
<b>C4</b>					
2,5082	2,4917	0,0165	0,66	99,34	Aprovado
2,5085	2,4965	0,0120	0,48	99,52	Aprovado
2,5165	2,4988	0,0177	0,70	99,30	Aprovado

Fonte: Autor (2023)

Dentre as composições de CDR com biomassa florestal, observa-se que a perda de massa determinada foi menor para a amostra S4, constituída de serragem de eucalipto. Comparando-se as amostra S2, S3 e S4 e C2, C3 e C4 entre si, respectivamente, observa-se

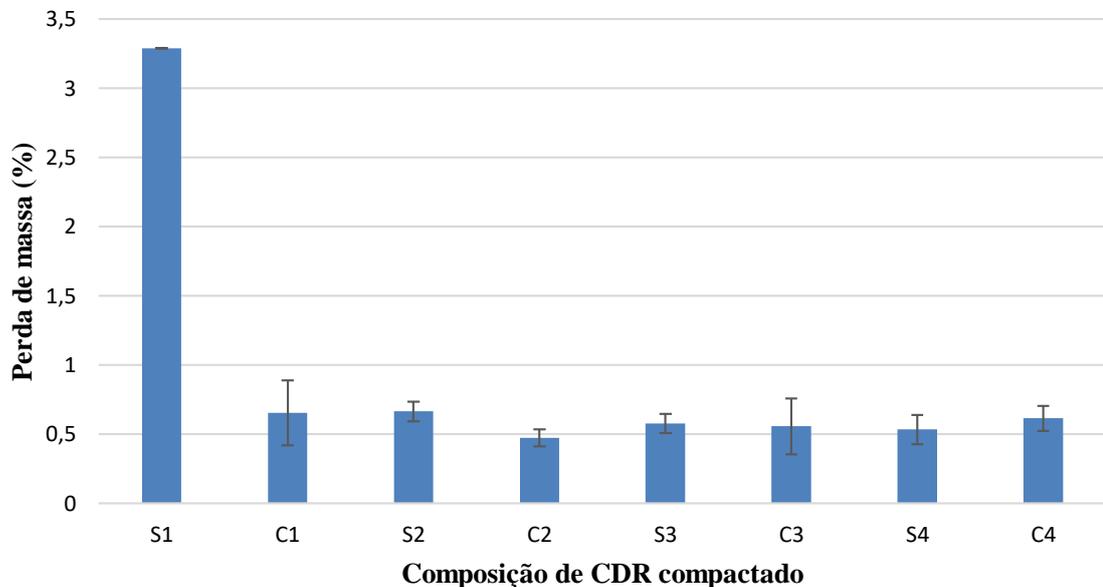
uma tendência de a redução da perda de massa com a adição de glicerol observada para as amostras S1 e C1 também se aplicar, no entanto, mais trabalho é necessário acerca disso.

Confrontando os resultados com a literatura, constata-se que o desempenho das composições com biomassas florestais pode estar relacionado ao teor de lignina:

- ✓ Dam *et al.* (2004) relataram que a lignina exibe propriedades termoendurecíveis em temperaturas de trabalho menores que 140 °C e atua como resina intrínseca na produção de placas sem aglutinantes
- ✓ Lehtikangas (1999) afirmaram que umidade de cerca de 8% a 15% na biomassa reduzirá a temperatura de amolecimento da lignina para 100 °C a 135 °C, com a plastificação de cadeias de moléculas.
- ✓ Granada *et al.* (2002) relataram que as propriedades adesivas da lignina termicamente amolecida contribuem consideravelmente para as características de resistência dos briquetes feitos de materiais lignocelulósicos.

Observando-se os resultados apresentados na Figura 19, as composições apresentam desvio padrão baixo, não há variações consideráveis, significando que os dados são homogêneos, concentrados em torno da média. A composição S1 apresenta resultado significativamente diferente comparado com C1 de mesma composição, os restantes das composições apresentaram resultados insignificantes comparando S2, S3 e S4 com C2, C3 e C4.

Figura 19: Resultados das médias de perda de massa e desvio-padrão das amostras de CDR compactado



Fonte: Autor (2023)

As amostras da composição C3 (biomassa de pinus) apresentaram trincas e pequenas fissuras assim que retiradas da prensa hidráulica (Figura 20). Comparando-se essa amostra com a amostra S3 de mesma composição, mas sem adição do glicerol, constatou-se que a ausência de trincas. Nos processos de peletização, os teores de lignina e de umidade da biomassa são os parâmetros mais importantes que determinam a resistência mecânica dos pelétes (Samuelsson *et al.*, 2009; Karkania *et al.*, 2012). Os CDR S4 e C4 apresentaram aspecto mais uniforme após sua compactação e simetria das partículas, a lignina encontrada no eucalipto pode ter influenciado nesse resultado.

De modo geral, em temperaturas superiores a 70 °C a lignina começa a plasticizar, tornando-se maleável e permitindo melhor adesão entre as partículas durante o processo de densificação, resultando em pelétes com melhores propriedades mecânicas (KALIYAN e MOREY, 2010). Na literatura, observa-se que para madeiras folhosas, o teor de lignina varia entre 26% e 29% para o gênero eucalipto. Já em madeira de coníferas, tal como o pinus, esse valor varia entre 25% e 30% (PROTASIO *et al.*; 2013; PEREIRA; 2014).

Figura 20: Amostras de CDR compactado que apresentaram trincas C3 (pinus com adição de glicerol)



Fonte: Autor (2023)

### 5.2.3 Densidade do compactado

A densidade representa uma importante propriedade do combustível que pode ser relacionada a uma maior capacidade energética (MACHADO, 2022). Com auxílio de um paquímetro foram realizadas medições de raio e altura de cada CDR que possibilitou o cálculo do volume, e posteriormente o cálculo da densidade.

A densidade é muito importante no contexto de CDR, pois os resultados são úteis para avaliação de logística de transporte e armazenamento desse combustível.

Os resultados da determinação da densidade das amostras de CDR compactado foram apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados das medições de raio e altura, e do cálculo da densidade das amostras de CDR compactado

	<b>Raio (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>S1</b>					
	0,825	0,70	1,4769	2,3489	1,5904
	0,825	0,70	1,4769	2,3501	1,5912
	0,825	0,70	1,4769	2,4533	1,6624
<b>C1</b>					
	0,825	0,70	1,4769	2,2057	1,4934
	0,825	0,70	1,4769	2,3755	1,6084
	0,825	0,70	1,4769	2,4981	1,6914
<b>S2</b>					
	0,845	0,60	1,3280	2,5155	1,8966
	0,845	0,60	1,3280	2,4138	1,8175
	0,845	0,60	1,3280	2,6350	1,9841
<b>C2</b>					
	0,850	0,70	1,5678	2,6934	1,7179
	0,850	0,70	1,5678	2,9877	1,9056
	0,850	0,70	1,5678	2,8236	1,8010
<b>S3</b>					
	0,845	0,59	1,3059	2,4411	1,8692
	0,845	0,61	1,3502	2,5524	1,8904
	0,825	0,68	1,4347	2,6450	1,8435
<b>C3</b>					
	0,845	0,80	1,7707	2,5906	1,4630
	0,845	0,73	1,6158	2,5393	1,5715
	0,845	0,75	1,6601	2,5364	1,5279
<b>S4</b>					
	0,925	0,80	2,1219	2,4125	1,1369
	0,925	0,80	2,1219	2,4043	1,1331
	0,925	0,79	2,0954	2,3583	1,1255
<b>C4</b>					
	0,925	0,92	2,4402	2,5082	1,0278
	0,925	0,90	2,3871	2,5085	1,0508
	0,925	0,85	2,2545	2,5165	1,1162

Fonte: Autor (2023)

Verifica-se na Tabela 11 e na Tabela 12 que a densidade diminuiu nas composições adicionadas de glicerol (C1, C2, C3 e C4) em relação às sem glicerol (S1, S2, S3 e S4), tal como também foi observado por Bala-Litwiniak e Radomiak (2019).

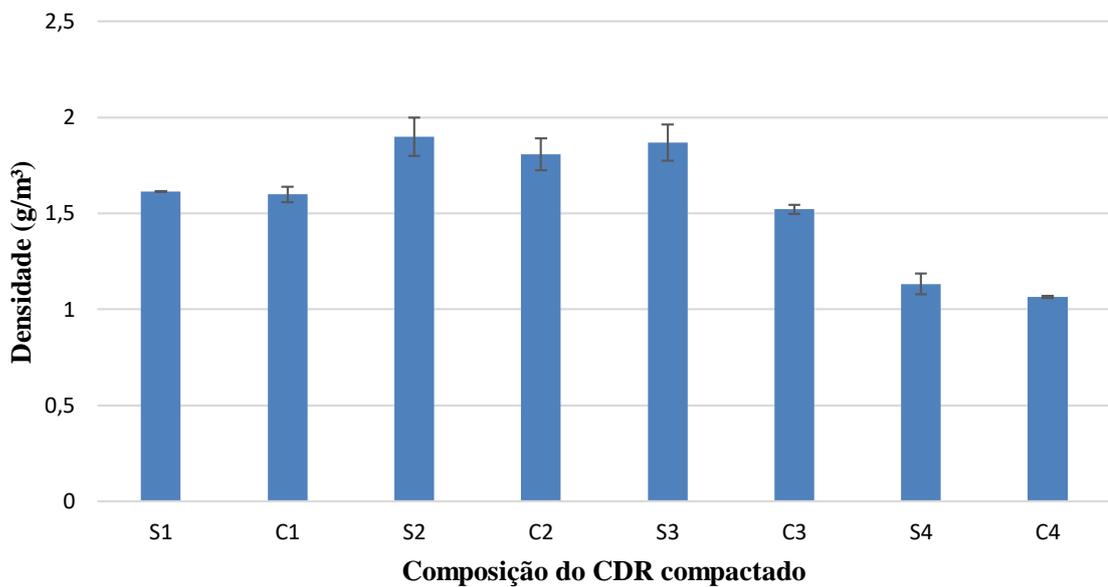
Os resultados para densidade encontrados nesse trabalho (Tabela 11) variaram entre 1,0278 g/cm<sup>3</sup> para C4 e 1,9841g/cm<sup>3</sup> para S2, sendo que a composição C4 foi a que apresentou a menor densidade média (1,0649 g/cm<sup>3</sup>, biomassa de eucalipto). Os valores médios da densidade e o respectivo desvio padrão encontrados para cada composição foram apresentados na Tabela 12 e na Figura 21.

Tabela 12: Resultados de densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) (médias e desvio padrão) das amostras de CDR compactado

Composição	S1	C1	S2	C2	S3	C3	S4	C4
Média	1,6146	1,5977	1,8993	1,8081	1,8676	1,5207	1,1318	1,0649
Desvio padrão	0,0413	0,0994	0,0833	0,0940	0,0234	0,0546	0,0058	0,0458

Fonte: Autor (2023)

Figura 21: Resultados das médias de densidade e desvio-padrão das amostras de CDR compactado



Fonte: Autor (2023)

Observando-se os resultados apresentados na Tabela 12 e na Figura 21, pode-se concluir que todas as composições apresentaram desvio padrão baixo, não houveram variações consideráveis, significando que os dados são homogêneos, concentrados em torno da média. Constata-se que na comparação entre as composições, a adição do glicerol não alterou a densidade do CDR de forma expressiva, mas observou-se uma tendência de redução com sua adição, sendo mais significativa entre S3 e C3 (18,6% menor).

Em termos logísticos, quanto maior a densidade do CDR, melhor. Da mesma forma, a densidade energética é maior. Nesse aspecto, destacaram-se as amostras S3 e C3. No entanto, é necessário estudar o efeito da densidade sobre sua combustibilidade.

### 5.2.4 Teste de intemperismo

O teste de resistência ao intemperismo foi conduzido colocando-se péletes no ambiente externo, sem qualquer proteção, deixando-os expostos às condições climáticas durante 14 dias, registrando-se as condições do clima diariamente. Esse registro foi apresentado na Tabela 13.

Tabela 13: Registro diário das condições climáticas e do aspecto das amostras durante o teste de intemperismo

Dias	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Clima	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Nublado	Chuva	Nublado	Sol	Sol	Chuva	Chuva	Nublado	Sol
<b>S1</b>	S	S	P	P	P	P	A	A	A	A	D	D	D	D
<b>C1</b>	S	P	P	P	A	A	D	D	D	D	D	D	D	D
<b>S2</b>	S	S	S	S	S	P	A	D	D	D	D	D	D	D
<b>C2</b>	S	S	P	P	P	P	A	A	D	D	D	D	D	D
<b>S3</b>	S	S	P	P	P	A	D	D	D	D	D	D	D	D
<b>C3</b>	S	S	P	P	P	A	D	D	D	D	D	D	D	D
<b>S4</b>	S	S	S	S	S	S	P	A	D	D	D	D	D	D
<b>C4</b>	S	S	S	S	S	S	P	A	D	D	D	D	D	D

Legenda: S – Sem alteração; P - Pouca alteração; A - Alteração; D – Deformação.

Fonte: Autor (2023)

Após o referido período de exposição, a variação de espessura ( $\Delta h$ ) e também a massa ( $Rm$ ) deveriam ser verificadas a fim de se determinar a resistência e as respectivas mudanças de aspecto. Como é possível verificar na Figura 27 e Tabela 13, nos primeiros 5 (cinco) dias, com ausência de chuvas, os compactados apresentaram resistência satisfatória. Com 10 (dez) dias de exposição, apresentaram uma alteração interessante com a ocorrência de apenas um dia chuvoso nesse período. Nas amostras das composições S1, C1, S3 e C3, houve uma deformação mais acentuada em relação às composições S2, C2, S4 e C4. Com 14 (quatorze) dias de exposição, desses, mais 2 (dois) dias chuvosos, houve uma deformação por completo para todas as amostras. Devido a essa deformação, não foi possível a medição de espessura e massa das amostras, impedindo a finalização do teste. Portanto, pode-se constatar que os péletes estudados não apresentam resistência ao intemperismo.

Figura 22: Teste de intemperismo após 5, 10 e 14 dias de exposição, respectivamente



Fonte: Autor (2023)

A Tabela 14 apresenta um quadro resumo dos resultados obtidos para os parâmetros estudados para as amostras S e C de CDR compactado.

Tabela 14: Comparação dos resultados dos parâmetros estudados para as amostras S e C

	PCI (MJ/kg)	Absorção de umidade	Perda de massa (%)	Resistência mecânica (%)	Densidade (g/m <sup>3</sup> )	Resistência ao intemperismo
<b>S1</b>	16,69*	Reprovado	3,29	96,71	1,6147	Reprovado
<b>C1</b>	Não avaliado**	Reprovado	0,65	99,35	1,5977	Reprovado
<b>S2</b>	18,89*	Reprovado	0,66	99,34	1,8994	Reprovado
<b>C2</b>	Não avaliado**	Reprovado	0,47	99,53	1,8082	Reprovado
<b>S3</b>	18,89*	Reprovado	0,58	99,42	1,8677	Reprovado
<b>C3</b>	Não avaliado**	Reprovado	0,56	99,44	1,5208	Reprovado
<b>S4</b>	18,89*	Reprovado	0,53	99,47	1,1318	Reprovado
<b>C4</b>	Não avaliado**	Reprovado	0,61	99,39	1,0649	Reprovado

\*Baseado em Sing et al. (2012), Faizal et al. (2016), Chaitanya et al. (2017), ASTM D240 (ASTM, 2019)

\*\* O poder calorífico do glicerol não foi avaliado.

Fonte: Autor (2023)

Analisando-se os parâmetros apresentados na Tabela 14, a menor perda de massa no teste de resistência mecânica foi observada para a amostra S4, constituída de serragem de eucalipto, que se destacou como a mais indicada dentre as composições de CDR estudadas em termos desse parâmetro. Conforme indicado anteriormente, comparando-se as amostras S2, S3 e S4 e C2, C3 e C4 entre si, respectivamente, observou-se uma tendência de redução da perda de massa com a adição de glicerol observada para as amostras S1 e C1 também se aplicar, no entanto, mais trabalho é necessário acerca disso.

Em relação à densidade das amostras de CDR, na comparação entre as composições estudadas, a adição do glicerol não apresentou efeito expressivo, mas observou-se uma tendência de redução da densidade do CDR com a sua adição. Apesar de ser vantajoso, em termos logísticos, se ter um CDR de maior densidade dado que isso também implica em maior densidade energética, faz-se necessário estudar o efeito da densidade sobre a sua combustibilidade.

Dessa forma, constata-se que as amostras S4 e C4, ambas compostas de biomassa de eucalipto, apresentaram os melhores resultados para a resistência mecânica, e as amostras S2 e C2, compostas de mistura de serragem de pinus e de eucalipto em igual proporção, apresentaram maior densidade. Ambos são parâmetros importantes para questões logísticas relativas a transporte e armazenamento. Diante disso, os CDR compactados compostos de biomassa florestal apresentaram-se como as melhores opções.

A expectativa de que a adição de glicerol como aglutinante apresentasse efeito de melhora dos parâmetros de qualidade do CDR comparativamente às amostras de CDR sem sua adição não se confirmou completamente, o que requer aprofundamento no estudo. Em relação aos testes de absorção de umidade e resistência ao intemperismo, nos quais todas as amostras foram reprovadas, como já mencionado, também faz-se necessária a continuidade do estudo em trabalhos futuros.

A amostra S1, de mesma composição anteriormente estudada por Machado (2022), apresentou resultados similares aos encontrados neste trabalho.

## 6 CONCLUSÃO

Com o crescimento populacional e o aumento crescente de consumo, muitos resíduos são gerados e descartados de forma incorreta e em locais impróprios, ocasionando contaminações, poluição e impactos ambientais negativos. Em busca de soluções, vários estudos e pesquisas são realizados atualmente, tal como este.

A pesquisa apontou que os resíduos sólidos da rizicultura, da indústria madeireira e urbanos, são uma boa alternativa para produção de combustíveis derivados de resíduos compactados para geração de energia.

A análise das propriedades físico-químicas das frações de materiais empregados e das composições de CDR estudadas demonstraram aumentos do poder calorífico dos combustíveis de aproximadamente 4% e 11% com a adição de 20% em massa de RSU à biomassa florestal e da rizicultura, respectivamente, baixa concentração de cloro, sendo que a maior concentração encontrada foi para a palha de arroz (0,69%, b.s.) dentre as frações de materiais, e dentre as misturas de biomassa e RSU, a composição S1, que continha biomassa de arroz, apresentou o maior valor (0,49%, b.s.). As especificações da normatização brasileira para a aplicação de RSU para fins energéticos (ABNT NBR 16849/2020) em termos de teor de cloro e PCI foram atendidas.

A caracterização do CDR compactado demonstrou a existência de limitações referentes à resistência ao intemperismo, mas o glicerol pode ser uma boa alternativa para melhorar a compactação de resíduos da rizicultura e, conseqüentemente, aumentar sua resistência física. Isso foi verificado apenas para as amostras de CDR contendo essa biomassa (C1), o que indica a necessidade de continuidade do estudo da aplicação do glicerol como aglutinante. Levando-se em consideração que o glicerol é um subproduto da transesterificação de triglicerídeos para a produção de biodiesel, seu emprego na produção de combustíveis é uma alternativa de aplicação atrativa e que deve ser mais explorada em estudos futuros.

Este trabalho demonstrou que o CDR compactado é uma alternativa promissora para o aproveitamento de resíduos urbanos e agroflorestais, auxiliando nas questões sociais, econômicas e ambientais relacionadas aos impactos da destinação de RSU, e ofertando um combustível renovável para os setores energético e industrial.

## 7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- ✓ Aprofundar o estudo da adição de glicerol como aglutinante;
- ✓ Testar novas opções de aglutinantes para agregação das partículas dos sólidos empregados na produção de CDR;
- ✓ Estudar novas formulações de CDR, com diferentes composições de rejeitos de RSU;
- ✓ Testar novas pressões de compactação, com equipamentos que mais se assemelham aos aplicados em processos industriais;
- ✓ Estudar a influência da fração de lignina presente nas biomassas e seus efeitos na conformação de CDR compactado;
- ✓ Analisar a influência do tempo de compactação na conformação do CDR;
- ✓ Realizar estudo de viabilidade técnica e econômica do processo de produção de CDR de biomassa e rejeitos de RSU compactado;
- ✓ Realizar estudo da combustibilidade de CDR compactado.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABIB BRASIL. **Projetos sustentáveis e soluções energéticas carbono zero. Brasil Biomassa Consultoria Mapeamento Engenharia Industrial Tecnologia.** Disponível em: [https://www.abibbrasil.com.br/\\_files/ugd/09c803\\_92f4a8eca7b04ccca1de4932ad87d3e4.pdf](https://www.abibbrasil.com.br/_files/ugd/09c803_92f4a8eca7b04ccca1de4932ad87d3e4.pdf). Acesso em: 02 set. 2023.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Carvão Vegetal - **Análise Imediata.** NBR-8112 (MB1857), Outubro 1986.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregados para concreto – **Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis.** NBR-9917, abril 2009.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos.** NBR-16849, fevereiro 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019:** Abrelpe. 15. ed. São Paulo, 2019. 64 p. Disponível em: [www.abrelpe.org.br](http://www.abrelpe.org.br). Acesso em: 17 jul. 2020.
- ABRELPE (Brasil). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021:** Abrelpe. São Paulo, 2021. 19-21 p. Disponível em: [www.abrelpe.org.br](http://www.abrelpe.org.br). Acesso em: 31 mai.2021
- AGÊNCIA CÂMARA DE NOTÍCIAS. **Projeto cria incentivo fiscal para geração de energia elétrica por resíduo sólido.** 2022. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/noticias/896360-projeto-cria-incentivo-fiscal-para-geracao-de-energia-eletrica-por-residuo-solido/> Acesso em 29, agosto de 2023.
- ALEXANDRE, L. H. Z. **Combustível ecológico a partir de resíduos de biomassa e rejeitos de carvão mineral.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016.
- ALMEIDA, Mayara Régia Alves de. **Sacolas plásticas: o lixo em circulação.** 2008. Disponível em: <http://www.webartigos.com/articles/10704/1/sacolas-plasticas-o-lixo-em-circulacao/pagina1.html>

AL-WIDYAN, M.I.; AH-JALIL, H.F.; ABU-ZREIG, M.M.; ABU-HAMDEH, N.H. 2002. **Physical durability and stability of olive cake briquetes**. Biosystems Engineering. Canadian.

ANEEL **Debate geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos**. Aneel, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/aneel-debate-geracao-de-energia-a-partir-de-residuos-solidos-urbanos>\_Acesso em: 04, abril de 2022

APRE Florestas. **Plantios de pinus têm forte presença na economia de SC**. Disponível em: <https://apreflorestas.com.br/noticias/plantios-de-pinus-tem-forte-presenca-na-economia-de-sc/>

AREEPRASERT, C. *et al.* **Municipal plastic waste composition study at transfer station of bangkok and possibility of its energy recovery by pyrolysis**. Energy Procedia, v. 107, p. 222 226, 2017, ISSN 1876 6102, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.132>.

ASAVATESANUPAP, Channarong; SANTIKUNAPORN, Malee. **A feasibility study on the production of solid fuel from glycerol and agricultural waste**. Thailand. 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16849:2020: **Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos** - Requisitos. Rio de Janeiro, 2020. 30 p.

ASTM D3172. **Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D3174. **Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D3175. **Standard Test Method for Volatir Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020.

ASTM D4239. **Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

ASTM D5258. **Standard Practice for Acid-Extraction of Elements from Sediments Using Closed Vessel Microwave Heating.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D5865. **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D7582. **Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015

ATOM, Junior. **Metais Pesados: Entenda o que são, seus riscos, e como são determinados.** Atom Jr, 2020. Disponível em: <https://www.atomjr.com.br/post/metais-pesados-entenda-o-que-s%C3%A3o-seus-riscos-e-como-s%C3%A3o-determinados> Acesso em: 19 Mai.2022.

AUPRAKUL, U.; PROMWUNGKWA, A.; TIPPAYAWONG, N.; CHAIKLANGMUANG, S. **Factors affecting properties of fuel pellets from compaction of mixed biomass and waste plastics** *Agric EngInt: Journal Open access* at <http://www.cigrjournal.org>

BALA-LITWINIAK, A.; RADOMIAK, H. **Possibility of the utilization of waste glycerol as an addition to wood pellets.** *Waste and Biomass Valorization*. V. 10, pp. 2193–2199, 2019.

BALA-LITWINIAK, A. **Environmental and economic aspects of combustion of biomass pellets containing a waste glycerol.** *Combustion Science and Technology*, V. 193, N° 11, pp. 1998-2008, 2021. DOI: 10.1080/00102202.2020.1746774.

BARROS, T.D. **Consultora autônoma – Embrapa. 2011.** Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/biodiesel/glicerol>. Acesso em: 18 mai. 2022.

BAZARGAN, A.; ROUGH, S.; MCKAY, G. **Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel.** a Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Hong Kong University of Science and Technology. 2014

BEATRIZ, A.; ARAÚJO, Y.J.K.; LIMA, D.P. **Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas.** Departamento de Química, Centro de Ciências Exatas e

Tecnologia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Av. Senador Filinto Müller, 1555, 79074-460 Campo Grande - MS, Brasil. 2011

BESEN, G.R. **Coleta seletiva com inclusão de catadores: construção participativa de indicadores e índices de sustentabilidade.** São Paulo, 2011. 275p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo.

BESEN, G.R. *et al.* **Resíduos sólidos: vulnerabilidades e perspectivas.** In: SALDIVA P. *et al.* Meio ambiente e saúde: o desafio das metrópoles. São Paulo: Ex Libris, 2010.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos;** altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF.

BRASIL BIOMASSA. **Soluções energéticas: Produção de briquete.** Disponível em: <https://www.brasilbiomassa.com.br/briquete> Acesso em 06 set. 2023.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal.** Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131 p.

BRAZILIAN ASSOCIATION INDUSTRY BIOMASS AND RENEWABLE ENERGY. **Brazil Status Report 2012: bioenergy – biomass – renewable energy.** Disponível em: <https://www.carrysun-tech.com/> Acesso em: 06 abr. 2022.

BRITO, J.O. **O uso energético da madeira. Estudos avançados 21 (59), 2007 centro nacional de referência em biomassa. Aproveitamento energético de resíduos de madeira e florestais na forma de briquetes.** Centro nacional de referência em biomassa. Estudos avançados. Disponível em: [http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br\\_briquete.asp](http://infoener.iee.usp.br/scripts/biomassa/br_briquete.asp). Acesso em: 12 jan. 2022

BROTO, **Floresta de pinus: saiba mais sobre essa cultura e o mercado no brasil.**

Disponível em: [https://blog.broto.com.br/floresta-de-pinus-saiba-mais-sobre-essa-cultura/?gclid=eaiaiqobchmii6gt4qgegqmvrevcchl1dnasweaayayaaegjwi\\_d\\_bw](https://blog.broto.com.br/floresta-de-pinus-saiba-mais-sobre-essa-cultura/?gclid=eaiaiqobchmii6gt4qgegqmvrevcchl1dnasweaayayaaegjwi_d_bw) acesso em 04 set. 2023

BUENO, C. **O lixo da energia.** 2008. Disponível em <http://cidadesustentavel.gabeira.com/?p=34>. Acesso em: 28 mar. 2022

BUTTON, S. T. **Metodologia para Planejamento Experimental e Análise de Resultados.** Campinas, 2012, disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/posgraduacao/IM317/apostila2012.pdf>, acesso em 20 de junho de 2021.

CALEGARI, L. FOELKEL, C. E. B; HASELEIN, C. R.; ANDRADE, J. L. S.; SILVEIRA P.; SANTINI, E. J. **Características de Algumas Biomassas Usadas na Geração de Energia no Sul do Brasil.** Biomassa e Energia. V.2, n.1, p. 37-46, 2005.

CAMARGO *et al.* "**Caracterização química, física e térmica de péletes de madeira de diferentes composições.**" Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 24 (2020): e11. Rede. 28 de setembro de 2021.

CARVALHO, J. S. **Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior da biomassa de carnaúba com diferentes aglutinantes para uso em forno industrial.** 2022. 63 f.: il. Color.

CARVALHO, A.M. PEREIRA, B.L.C.; SOUZA, M.M. **Produção de pellets da madeira.** In: Santos, F.; Colodette, J. & Queiroz, J. H. (Eds.) – Bioenergia & Biorrefinaria : cana-de-açúcar e espécies florestais. Universidade Federal de Viçosa, p. 380-400, 2013.

CASTELLÓ, M. L. **Estudo da glicerina por Análises Térmicas.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

CASTRO, A.F.N.M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de Eucalyptus na madeira e carvão vegetal.** Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

CHAVES, A.M.B.; VALE, A.T.; MELIDO, R.C.N; ZOCH, V.P. **Característica energética da madeira e carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp.** Enciclopédia Biosfera, v.9, n.17; p.533-542. 2013.

CHRISOSTOMO, W. **Estudo da compactação de resíduos lignocelulósicos para a utilização de combustível sólido.** Universidade de São Carlos. Dissertação. 80fls. São Carlos. Disponível em: [http://www.bdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=5173](http://www.bdt.ufscar.br/htdocs/tedeSimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=5173) Acesso em 12 Jan.2022.

CLIMA TEMPO, **Previsão do tempo em Criciúma.** <https://www.climatempo.com.br/previsao-do-tempo/15-dias/cidade/376/criciuma-sc> Acesso em 16 Fev.2023

CHI, Z.; PYLE, D.; WEN, Z.; FREAR, C.; CHEN, S. **Um estudo de laboratório de produção ácido docosaheptaenóico de biodiesel - glicerol residual por fermentação de microalgas.** Process Biochem. 42, 1537–1545, 2007.

CIDASC. **Santa Catarina alcança o maior valor de produção agropecuária da história.** Disponível em: <http://www.cidasc.sc.gov.br/blog/2021/04/14/santa-catarina-alcanca-o-maior-valor-de-producao-agropecuaria-da-historia/> Acesso em 10 Mai.2022.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia.** 3. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

COSTA, S.C., BARCELOS, R.L., MAGNAGO, R. F. **Biocombustível sólido de glicerol e resíduos agrícolas como fonte de energia.** Departamento de Produção, Construção e Agroindústria, Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL). Palhoça, SC, 2019.

COUTO, L., C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L.F.; CÂMARA, D. **Vias de valorização energética da biomassa.** Biomassa e Energia, v. 1, n. 1, p.71-92, 2004.

CREMA, J.Z. **Caracterização físico química de resíduos sólidos urbanos para o desenvolvimento de combustível para a indústria cimenteira.** Universidade Federal de Santa Catarina, Graduação em Engenharia de Energia, 50 p. Araranguá, SC, 2022.

DEMIRBAS, A.; DEMIRBAS, H. **Estimating the calorific values of lignocellulosic fuels.** Journal Energy, Exploration & Exploitation, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2004.

DIAS, S.M.F. (2003) **Avaliação de programas de educação ambiental voltados para o gerenciamento os resíduos sólidos urbanos.** 326p. Tese (Doutorado em Saúde Ambiental) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo.

DIAS, J.M.C.S. (2012) **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** Embrapa Agroenergia – Brasília, DF.

DIAS, D.L. **Glicerol, Brasil Escola.** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/glicerol.htm>. Acesso em 18 de mai. 2022.

DIEHL, A.A. **Pesquisa em ciências sociais aplicadas: métodos e técnicas.** São Paulo: Prentice Hall, 2004.

DIONIZIO, A.F. **Aproveitamento energético de resíduos agroindustriais no Distrito Federal.** 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

DONATO, C.; TAKENAKA, E. **O Aproveitamento de Resíduos de Madeira para o Desenvolvimento: Sustentável** – Fórum Ambiental V. 12, N. 04, 2016.

EMBRAPA. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais.** Brasília, 2012. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/78690/1/DOC-13.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.

EMBRAPA. **Florestas – Eucalipto - Como energia, é utilizado como briquete e cavaco?** Brasília, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/eucalipto/perguntas-e-respostas>. Acesso em 06 dez. 2023.

EMBRAPA. **Melhoramento genético e lançamento de cultivares.** Brasília, 2021. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223302/1/EmbrapaFlorestas-2021-LV-EucaliptoEmbrapa-cap2.pdf> . Acesso em 29 nov. 2023.

EPAGRI. **Mapeamento por imagens de satélite da área de cultivo de arroz.** Disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/2020/07/31/epagri-conclui-mapeamento-por-imagens-de-satelite-da-area-de-cultivo-de-arroz/>, acesso em 15 Mai. 2022.

EPAGRI. **Produtividade do arroz catarinense cresce 23% em 10 anos.** <https://blog.epagri.sc.gov.br/index.php/produtividade-do-arroz-catarinense-cresce-23-em-10-anos>. Acesso em: 25 abril 2023.

ERIKSSON, S.; PRIOR, M. **The briquetting of agricultural wastes for fuel.** Roma: FAO, 1990.

EPS: **Presente em seu dia a dia de diferentes formas.** Knauf Isopor, c2019. Disponível em: Acesso em: 01, out 2023.

FAIZAL, H.M *et al.* **Development of palm biomass briquettes with polyethylene plastic waste addition.** Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering) 78: 9–2, 2016, 69–75. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/7/850>. Acesso em 20 set. 2020.

FALEMARA, Babajide Charles *et al.* **Performance Evaluation of the Physical and Combustion Properties of Briquettes Produced from Agro-Wastes and Wood Residues.** Recycling. 2018.

FELFLI, F. F.; MESA J. M.; ROCHA J. D.; FILIPPETTO D.; LUENGO C. A. e PIPPO W. A. **Biomass briquetting and its perspectives in Brazil.** *Biomass and Bioenergy*, v.35, p. 232-242, Campinas – SP, 2011.

FERNANDES, E. R. K. **Valorização de resíduos gerados na bananicultura por conversão termoquímica por pirólise.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Universidade da Região de Joinville – UNIVILLE, 2012.

FERNANDES, L.; SABINO, M. G.; ROSSETTO, H. L. **Método de extração de sílica da casca do arroz.** Cerâmica 60 (2014) 160-163. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/Y4HRJCLs6j3L6bty7fMFKhQ/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: agosto, 2021.

FURTADO, T.S.; VALIN, M.; BRAND, M.A. & BELLOTE, A.F.J. (2010) – **Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal.** Pesquisa Florestal Brasileira, vol. 30, n. 62, p. 101-106. <http://dx.doi.org/10.4336/2010.pfb.30.62.101>.

GALLARDO, Antônio; CARLOS, Mar; COLOMER, Francisco J; EDO, Natalia; JORGE, Andrea. **Design of solid recovered fuels from municipal solid waste and biomass.** Alcoi, p. 1-10, jul. 2020.

GARCÍA, R., GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, MP, MARTÍN, AJ, PEVIDA, C., RUBIERA, F., 2020. **Co-peletização de serragem de pinheiro e combustível derivado de rejeição (RDF) para pellets derivados de resíduos de alta qualidade.** Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono, INCAR-CSIC, C / Francisco Pintado Fe 26, 33011, Oviedo, Espanha.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil.**2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

GARCÍA, R. *et al.* **Caracterização de resíduos de biomassa espanhóis para utilização energética** Tecnologia de recursos biológicos 103: 249-258, 2012.

GARRIDO, M.A; CONESA, J.A; GARCIA, M.D. **Characterization and Production of Fuel Briquettes Made from Biomass and Plastic.** Wastes Energies, V. 10, p. 850, 2017.

GENON, G.; BRIZIO, E. **Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF**. Waste Management, [S.L.], V. 28, N. 11, P. 2375-2385, nov. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2007.10.022>.

GENTIL, L.V.B. (2008). **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. Tese de **Doutorado em Engenharia Florestal**, Publicação EFL TD - 009/2008. Departamento de Engenharia Florestal. Universidade de Brasília, 2008.

GERIS, R.; SANTOS, N. A. C.; AMARAL, B. A.; MAIA, I. S.; CASTRO, V. D.; CARVALHO, J. R. M. **Biodiesel de Soja – Reação de Transesterificação para Aulas Práticas de Química Orgânica**. Química Nova, vol. 30, nº. 5, 2007.

GIZ - Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. **Opções em Waste-toEnergy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. Governo Federal da Alemanha, 2017.

GONÇALVES, José; SARTORI, Maria; LEÃO, Alcides, **Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, V. 13, N. 5, P. 657–661, 2009.

GREINERT, A.; MRÓWCZYNSKA, M.; SZEFLNER, W. **The Use of Waste Biomass from the Wood Industry and Municipal Sources for Energy Production**. Sustainability. V11, 2019.

GUG, J.; CACCIOLA, D.; SOBKOWICZ, M. **Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics**. Waste Management, Volume 35, pp. 283-292, 2015

HUANG, C. *et al.* **Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy**. Waste Management, n. 29, p. 1793-1797, 2009.

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). **Relatório 2021**. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf> Acesso em: 11 mai. 2022

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Produção da Extração Vegetal da Silvicultura**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html>. Acesso em: 26 abr. 2023.

ISO 17247. **Análise de um combustível mineral sólido relatado em termos de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, cinzas, umidade, e oxigênio por diferença**. INTERNATIONAL STANDARD. 2020.

JACOBI, P.R.; BESEN, G.R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. *Revista Scielo Brasil -Estudos avançados* 25 (71). São Paulo, 2011. <https://www.scielo.br/j/ea/a/YgnDNBqW633Y8nFLF5pqLxc/?format=pdf&lang=pt> Acesso em: 03, abril de 2022.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products**. *Biomass and Bioenergy*, Oxford, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009.

KAMI, E.C.A. **Análise Termoeconômica de Sistema Híbrido Solar Térmico Integrado à Unidade de Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2019. p. 240. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

JALIL, H.F.; ABU-ZREIG, M.M.; ABU-HAMDEH, N.H. Physical durability and stability of olive cake briquettes. *Canadian Biosystems Engineering*, V. 44, P. 41-45, 2002.

KAZIMIERZ *et al.* Uso de resíduos em produção de pellets para fins energéticos. **Renewable Energy**. Elsevier, V. 145 (C), pp. 997-1003, 2020.

KLAUTAU, J.V.P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Cocorrente Para Secagem de Grãos**. 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

KLEVESTON, F. **Metodologia de Avaliação do Potencial de Resíduos Agrícolas para Conversão Energética**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. 2011.

KNOTHE, G.; RAZON, L.F. **Biodiesel fuels**. Progress in Energy and Combustion Science. V. 58, p. 36-59, 2017.

LACERDA, C.V.; SOUZA, R.O.L.; ESSAYEM, N.; GONZALEZ, W.A. **Reaproveitamento do Glicerol Residual do Processo de Produção de Biodiesel Utilizando Catalisador à Base de HPA Suportado em Ácido Nióbico para a Obtenção de Aditivos**. Rev. Virtual Quim, volume. 6, n. 5, pp. 1332-1352, 2014. Disponível em: <<http://www.uff.br/rvq>>. Acesso em: 05 fev. 2023.

LIU, H. *et al.* **A review on current status of the co-combustion technology of organic solid waste (OSW) and coal in China**. Energy Fuels. V. 34, p. 15448–15487, 2020.

LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. **Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento de arroz**. Revista Gestão Industrial, v. 08, n. 01, p. 219-232. Santa Maria, RS, 2012.

MACHADO, A.G. **Aproveitamento energético dos rejeitos da triagem de resíduos sólidos urbanos combinados com biomassa: uma opção energética para a região sul de Santa Catarina**, Dissertação (Mestrado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC, 2022.

MAGALHÃES *et al.* **Produção e caracterização de briquetes a partir de resíduos sólidos e prensagem semi-manual**. Universidade Federal Rural do Semi-Árido, R. Francisco Mota, 572 - Pres. Costa e Silva, Mossoró – RN, 2019.

MAIA, B.G.O. **Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes**. Joinville: Univille 2013.

MELO, R.F.; DIAS, L.E.; ASSIS, I.R. **Potencial de Espécies de Leguminosas para Recuperação de Solo Contaminado por Arsênio.** Revista Brasileira de Geografia Física, [s. l.], V. 8, N. 3, P. 938-947, 2015.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, R.; SAFARI A.; MUSTAFFA, W. E.S.B. **Biomassenergy in Malaysia: Currentstateandprospects. Renewable and Sustainable.** Energy Reviews, v.15, p.3360– 3370, 2011.

MIYAKE, R.G. **Análise termodinâmica e de transferência de calor em um gerador de vapor a carvão pulverizado e palha de arroz.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2011.

MMA. Gov.br, 2022: **Governo Federal acaba com espera de mais de 10 anos e publica decreto do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/governo-federal-acaba-com-a-espera-de-mais-de-10-anos-e-publica-decreto-do-plano-nacional-de-residuos-solidos/> Acesso em 16 mai. 2022

MORAIS, M. *et al.* **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação.** In: An. 6. Encontro de Energia no Meio Rural (AGRENER- GD), UNICAMP: Campinas-SP, 2006.

MOERS E.M.; VIEIRA A. C.; FERNANDES D.M.; SOUZA S. N. M.; BARICATTI R. A. **Caracterização da biomassa residual proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia.** I COLASSA – Congresso Latino Americano de Suinocultura e Sustentabilidade Ambiental. Foz do Iguaçu, PR. 2011.

NCUBE, E.; PHIRI, B. **Concentrations of heavy metals in Eucalyptus and Pinus wood sawdust and smoke, Copperbelt province, Zambia.** Maderas. Ciencia y Tecnología, [S.L.], V. 17, n. 3, pp. 585-596, 2015. SciELO Agencia Nacional de Investigacion y Desarrollo (ANID). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2015005000052>.

NOGUÉS, F.; GARCÍA D.; REZEAU, A. **Energia de la biomassa. Textos docentes.** v.1, p. 125-143.2010.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Wood Energy: Principles and Applications**. [S.l.: s.n.], 2002.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 199 p., 2010.

NOGUEIRA G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

NOGUEIRA, M. F. M. **Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão**, Florianópolis – SC 2007.

NORDIN, A. **Chemical and elemental characteristics of biomass fuels**. *Biomass and Bioenergy*, v. 6, n. 5, p. 339-347, 1994.

NUNES, Osmar Manoel; BORGES, Gustavo da Rosa; WOHLBERG, Janaina. **O uso da casca de arroz como alternativa energética: um estudo de caso no município de dom pedrito** - rs. 2017. 21 f. Curso de Tecnologia em Agronegócio, Unipampa, Dom Pedrito, 2017.

OBERNBERGER, I; BRUNNER, T; BARNTHALER, G. **Chemical properties of solid biofuels—significance and impact**. *Biomass And Bioenergy*, [S.L.], v. 30, n. 11, p. 973-982, nov. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011>.

OBSERVATÓRIO AGRO CATARINENSE. **Produção Agropecuária Grãos**. Disponível em: <https://www.observatorioagro.sc.gov.br/areas-tematicas/producao-agropecuaria/paineis/> Acesso em 29 ago. 2023.

OLIVEIRA JUNIOR, E. M. **Produção de briquetes com resíduos de vegetais de jardinagem e podas em condomínios residenciais**. 2013. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental), Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

OSHIRO, T.L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016

PARADELO, R.; VILLADA, A.; DEVESA-REY, R.; MOLDES, A.B.; DOMÍNGUEZ, M.; PATIÑO, J.; BARRAL, M.T. **Distribution and availability of trace elements in municipal solid waste composts**. J. Environ. Monit., [S.L.], v. 13, n. 1, p. 201-211, 2011. Royal Society of Chemistry (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/c0em00408a>.

PAIVA, M.V. **Tecnologia de produção de briquetes de resíduos de fruta para geração de energia**. Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química. Uberlândia. 2022.

PAULA, L.E.R. **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos**. 72 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

PEREIRA JUNIOR, S.M. **Determinação de cobre, cromo e arsênio em madeira preservada (eucalyptus sp.) pelas espectrometrias de fluorescência de raios x**. 2014. 53 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

PEREIRA JÚNIOR, V.B. **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. Energia na Agricultura, v.17, n.1, p.34-37, 2001.

PESSOA FILHO, J.S. **Tratamento térmico para aproveitamento energético de resíduos plásticos: análise experimental**. 2020. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2020.3004>.

PERS, Adenilso Biasus. Secretário de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Plano estadual de resíduos sólidos de Santa Catarina: contrato administrativo n. 012/2016. 2. ed. Florianópolis, 2018. 400 p. (2). Disponível em: <http://www.perssc.premiereng.com.br/documentos>. Acesso em: 15 set. 2020.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S. **Fornos de carbonização utilizados no Brasil**. I Congresso Internacional de Uso da Biomassa Plantada para Produção de Metais Geração de Eletricidade. Belo Horizonte – MG, 2001.

POLI, D.C.R. *et al.* **Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos**. Waste Management.v. 8, n. 8, p. 09-31, 2013. Revista de ciências Exatas e Tecnologia. Disponível em: <https://revista.pgsskroton.com/index.php/rcext/article/view/2217>. Acesso em: 05 abr. 2022.

PONTE, M.R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: Caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica**.2017. Monografia (Engenharia de Energias) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, 2017.

PROTÁSIO, T.P.; TRUGILHO, P.F.; SIQUEIRA, H.F.; ALVES, I.C.N.; ANDRADE, C.R. & GUIMARÃES Júnior, J.B. (2015) – **Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus**. Brazilian Journal of Forestry Research, vol. 35, n. 84, p. 435-442.

PROTÁSIO, T.P. *et al.* **Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal**. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 1, p. 113-122, 2011.

PROTASIO, T. P. **Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

QUIRINO, W.F. **Utilização Energética de resíduos vegetais**. Brasília: LPF/IBAMA, 2003.

RABIER, F.; T.M.; BÖHM, T.; HARTMANN, H.; DAUGBJERG J.P.; RATHBAUER, J.; CARRASCO, J.; FERNÁNDEZ, M. **Particle density determination of pellets and briquettes**. Biomass Bioenergy 2006, 30, 954–963.

REIS, B.O.; SILVA, I.T.; SILVA, I.M.O, ROCHA, B.R.P. **Produção de briquetes energéticos a partir de caroços de açaí.** Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, UFPA CEP 66075-110, Belém – PA, Brasil. 2002.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J.H. **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais.** Produção Independente, 1.<sup>a</sup> ed. Viçosa. P. 551, 2013.

SEYE, O., 2011, Apostila Energia da Biomassa: curso Engenharia de Energia. SEYE O, SOUZA RCR, BACELLAR AA, RAMOS DE SOUZA CD, DE MORAIS M. R. **Caracterização do Caroço de Açaí como insumo para geração de Eletricidade via Gaseificação.** In: Proceedings: AGRENER GD 2008-7<sup>o</sup> Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural. Universidade de Fortaleza – Unifor: Fortaleza (CE); 23rd to 26th September 2008. Available from: <http://www.nipeunicamp.org.br/agrener/anais/2008/Artigos/31.pdf>.

SEVER, A.A.; ATIMTAY, A.; SANIN, F.D. **Comparação do valor do combustível e características de combustão de duas amostras RDF diferentes.** Waste Manag. 47, 217–224, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.037>.

SHARUDDIN, S.D.A. *et al.* **Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste.** Energy Conversion and Management, v. 148, p. 925 934, 15 September 2017.

SILBERSTEIN, E. **UnB mapeia matérias primas para a fabricação de briquetes.** UnB Ciência, 19 dez. 2011. Disponível em: <https://unbciencia.unb.br/biologicas/34-engenharia-florestal/201-unb-mapeia-materias-primas-para-a-fabricacao-de-briquetes>. Acesso em: 06 abr. 2022.

SILVA, K.V.A; FERREIRA, N.; CHLUSEWICZ, V.D.; BORTOLO, I.D.; GIRALDO, G.A.G.; SANTOS, J.A.P.; VITOTTO, F.L.; AUGUSTO, C., 2017 – **Fluxograma Produção de Biodiesel.** Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Fluxograma-da-producao-de-biodiesel\\_fig7\\_322148981](https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Fluxograma-da-producao-de-biodiesel_fig7_322148981) Acesso em 21 mai. 2022

SING, ChinYee *et al.* **An experimental investigation on the handling and storage properties of biomass fuel briquettes made from oil palm mill residues.** Journal of Applied Sciences, v. 12, n. 24, p. 2621-2625, 2012.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos.** Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011

SONG, B.; COOKE-WILLIS, M.; THEOBALD, B.; HALL, P. **Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics.** Fuel. V. 283, n. 1, P. 119263, 2021.

SOUZA, M.M.; SILVA, D.A.; ROCHADELLI, R.; SANTOS, R.C. **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de pinus taeda.** FLORESTA, v.42, n.2, p.325-334. 2012.

SPANHOL, A.; NONES, D.L.; KUMABE, F.J.B. & BRAND, M.A. (2015) – **Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia.** Revista Floresta, vol. 45, p. 833-844. 2015.

STRASSBURGER, A. - **Uso de biomassa de bambu para a queima em fornos cerâmicos,** Toledo, 48 p., 2022.

THERMOWOOD HANDBOOK. **Finnish thermowood association (fta).** FIN – 00171, Helsinki, Finland. 90p., 2003.

THEIS, M. *et al.* **Tendência de incrustação de cinzas resultantes da queima de misturas de biocombustíveis. Parte 1:** Taxas de deposição. 85: 1125-30, 2006.

THANH, L.T.; OKITSU, Kenji; BOI, Luu Van e Maeda Yasuaki. **Catalytic technologies for biodiesel fuel production and glycerol utilization.** Faculty of Chemistry, Vietnam National University, 19 Le Thanh Tong St., Hanoi, Vietnam, 2012

TRUGILHO, Paulo Fernando. **Energia da biomassa florestal**, 2010. Universidade federal de Lavras. Disponível em: <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Palestras/Palestra-05.pdf> Acesso em 10 DEZ.2021>.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C.T.; HESS, J.R.; KENNEY, K.L. **A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. Biofuels.** Bioproducts and Biorefining, 5(6), 683-707, 2011.

VASSILEV, S.V.; BRAEKMAN-DANHEUX, C.; LAURENT, Ph.; THIEMANN, T.; FONTANA, A. **Behaviour, capture and inertization of some trace elements during combustion of refuse-derived char from municipal solid waste.** Fuel, [S.L.], v. 78, n. 10, p. 1131-1145, ago. 1999. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0016-2361\(99\)00043-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0016-2361(99)00043-5).

VICZEK, S.A. *et al.* **Origins and carriers of Sb, As, Cd, Cl, Cr, Co, Pb, Hg, and Ni in mixed solid waste – A literature-based evaluation.** Waste Management, [S.L.], v. 103, p. 87-112, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.009>.

VIRMOND, E.; DE SENA, R.F.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C.A.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J. **Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes.** Waste Management (Elmsford), v. 32, p. 1952-1961, 2012.

YAO, BY *et al.* **Efeito das propriedades do combustível na combustão de biomassa. Parte II. Abordagem de modelagem identificação dos fatores controladores.** 84: 2116-2130, 2005.

YAZDANI, S.S., GONZALEZ, R., 2007. **Fermentação anaeróbica de glicerol: um caminho para viabilidade econômica para a indústria de biocombustíveis.** Curr. Opin. Biotech. 18, 213–219.

ZIBETTI, V.; LIMA; E.P.P. **Fundamentos de tecnologia ecológica para tratamento de efluentes**, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil, 2013.

WILAIPOON, P., TRIRATTANASIRICHAI K.; TANGCHAICHIT K. **The effects of moderate die pressure on banana-peel briquettes.** The 2nd International Conference on Thermal Engineering and Applications. United Arab Emirates, Jan 3-6, 2006.

WILAIPOON, P. **Physical characteristics of maize cob briquette under moderate die pressure.** American Journal of Applied Sciences. v. 4, n.12 p. 995-998, 2007.

WILAIPOON, P. **The effects of briquetting pressure on banana-peel briquette and the banana waste in northern Thailand.** American Journal of Applied Sciences. v. 6, n. 1, p. 167-171, 2009.

## ANEXO A – FISPQ DA GLICERINA NEON

**NEON** Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ

Página 1 de 5

Produto: Glicerina  
FISPQ nº: 00266

Atualizada em: 27/01/2023

**1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA**

Nome do produto: Glicerina  
Referências(s) do(s) Produto(s): 01456 / 03821  
Nome da empresa: Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda  
Endereço: Rua Ernesto Joaquim de Souza, 575  
Telefone da empresa: (11) 2219-9999  
Telefone para emergências: (11) 2219-9999 / (11) 99220-2068  
Fax: (11) 2219-9950 / (11) 2219-9951  
E-mail: [neon@neoncomercial.com.br](mailto:neon@neoncomercial.com.br)

**Usos identificados da substância ou mistura**

Produto classificado como reagente analítico, uso para laboratório de controle de qualidade e fins industriais.

**2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS****CLASSIFICAÇÃO DE PERIGO DO PRODUTO (ABNT NBR 14725-2)**

Não é uma substância ou mistura perigosa de acordo com o Sistema Harmonizado Global (GHS).

**ELEMENTOS APROPRIADOS DA ROTULAGEM (ABNT NBR 14725-3)****Pictogramas:** -**Palavra de Advertência:** -**Frases de Perigo:** -**Frases de Precaução:** -**3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES****Substância:**

Nome comum: Glicerina  
N° CAS: 56-81-5  
Peso molecular: 92,09 g/mol  
Fórmula Hill: HOCH<sub>2</sub>CH(OH)CH<sub>2</sub>OH  
Concentração: 90 a 100%

**4. MEDIDAS DE PRIMEIROS-SOCORROS****Inalação:** Se a vítima estiver respirando, leve-a para o ar fresco. Se a vítima não estiver respirando, aplique respiração artificial. Chamar imediatamente um médico.**Contato com a pele:** Em caso de contato, lavar a pele imediatamente com sabão e água em abundância. Consultar um médico.**Contato com os olhos:** Em caso de contato com os olhos, lavar com água em abundância por, no mínimo, 15 minutos. Separar as pálpebras com os dedos para garantir uma lavagem adequada. Chamar um oftalmologista.**Ingestão:** Fazer a vítima beber água (dois copos no máximo). Consultar o médico se se sentir mal.

## ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA GLICERINA

**NEON**Especificação Técnica do  
Produto

Neon Comercial Reagentes Analíticos Ltda  
 CNPJ:00.327.149/0003-41 I.E.:672.313.766.110  
 Rua Ernesto Joaquim de Souza, 740  
 CEP: 08655-805 - Chácara Primavera, Suzano-SP  
 Tel:(11)2219-9999 Fax:(11)2219-9999

Nro. CAS	56-81-5	Fórmula Molecular	HOCH <sub>2</sub> CH(OH)CH <sub>2</sub> OH	Peso Molecular	92,09
----------	---------	-------------------	--	----------------	-------

Nome	<b>Glicerina P.A./ACS</b>	Versão	4	Validade	3 Anos
Ref. Bibliográfica	ACS 11ª Edição - Página 362 à 364.				
Elaborado por	Leandro Viana	Data	13/09/2005		
Revisado por	Wellington Silva dos Anjos	Data	18/11/2022		
Aprovado por	Felipe Gabriel Vicente Ferreira	Data	18/11/2022		

Observações

Determinação	Especificação
Teor	>= 99,5 %
Aparência	= Líquido límpido incolor e viscoso
Metais pesados (como Pb)	<= 2 ppm
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	<= 10 ppm
Cor (APHA)	<= 10
Resíduo após ignição	<= 0,005 %
Água (K.F.)	<= 0,5 %
Substâncias escurecidas pelo ácido sulfúrico	= Passa teste
Neutralidade	= Passa teste
Acroleína e glicose	= Passa teste
Esteres e ácidos graxos	<= 0,05 %
Compostos clorados (como Cl)	<= 0,003 %

Observações Gerais