

## CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA UTILIZADA EM SECADOR DE GRÃOS EM ROLIM DE MOURA, RONDÔNIA

### ENERGY CHARACTERIZATION OF LIGNOCELLULOSIC BIOMASS USED IN A GRAIN DRYER IN ROLIM DE MOURA, RONDÔNIA

Maria Jhulia Cordeiro Santos<sup>1</sup>, Suelen de Oliveira<sup>2</sup>, Afonso Henrique Rodrigues de Oliveira Barros<sup>3</sup>, Emmanoella Costa Guarana Araujo<sup>4</sup>, Adriano Reis Prazeres Mascarenhas<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Rondônia – UNIR; E-mail: jhulia150699@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Rondônia – UNIR; E-mail: suelen.2895@gmail.com

<sup>3</sup>Universidade Federal de Rondônia – UNIR; E-mail: afonsoqi.barros@gmail.com

<sup>4</sup>Universidade Federal de Rondônia – UNIR; E-mail: emmanoella.araujo@unir.br

<sup>5</sup>Universidade Federal de Rondônia – UNIR; E-mail: adriano.mascarenhas@unir.br

Artigo submetido em 01/09/2023 e aceito em 23/10/2023

#### RESUMO

A biomassa lignocelulósica é fonte de energia renovável, capaz de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Objetivou-se realizar a caracterização imediata e estimativa do poder calorífico superior (PCS) da biomassa utilizada em secador de grãos em Rolim de Moura. A biomassa analisada caracteriza-se como galhos de árvores de limpeza de pastagem. Para a análise da biomassa, as amostras foram transformadas em discos de 2,5 cm de espessura. A umidade na base seca (UBs) foi determinada seguindo a norma ASTM E871-82. A análise química imediata foi realizada conforme as diretrizes da norma ASTM D1762-84, para obtenção dos teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (C). O PCS foi estimado com o modelo  $0,3536 \times CF + 0,1559 \times MV - 0,0078 \times C$  (erro = 3,74%). A UBs encontrada para biomassa analisada foi elevada ( $67,4 \pm 5\%$ ). Altas umidades reduzem a temperatura de ignição e a eficiência global da combustão. O PCS foi de  $18,88 \pm 2,3$  MJ/kg e os percentuais de MV, CF e C se situam por volta de  $77,49 \pm 2\%$ ,  $19,3 \pm 0,5\%$  e  $3,08 \pm 0,05\%$ , respectivamente. Estes resultados estão em harmonia com as informações disponíveis na literatura para outros materiais lignocelulósicos (madeira, cascas e resíduos agroindustriais). O material analisado apresenta potencial para produção de energia em caldeiras e fornos de padarias e pizzarias, por exemplo. Recomenda-se a secagem do material para otimização energética.

**Palavras-chave:** Biocombustível; Combustão da biomassa; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Lignocellulosic biomass is a renewable energy source capable of reducing dependence on fossil fuels and contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions. The objective was to perform immediate characterization and estimate the higher heating value (HHV) of the biomass used in grain dryers in Rolim de Moura. The analyzed biomass is characterized as branches from pasture cleaning trees. For biomass analysis, the samples were transformed into 2.5 cm thick discs. The moisture content on a dry basis (MCdb) was determined following ASTM E871-82 standard. The immediate chemical analysis was carried out according to the guidelines of ASTM D1762-84 standard to obtain volatile matter (VM), fixed carbon (FC), and ash content (A). The HHV was estimated using the model  $0.3536 \times FC + 0.1559 \times VM - 0.0078 \times A$  (error = 3.74%). The MCdb found for the analyzed biomass was high ( $67.4 \pm 5\%$ ). High moisture levels reduce ignition temperature and overall combustion efficiency. The HHV was  $18.88 \pm 2.3$  MJ/kg, and the percentages of VM, FC, and A were around  $77.49 \pm 2\%$ ,  $19.3 \pm 0.5\%$ , and  $3.08 \pm 0.05\%$ , respectively. These results are in line with the information available in the literature for other lignocellulosic materials (wood, husks, and agro-industrial residues). The analyzed material has potential for energy production in boilers and bakery and pizzeria ovens, for example. Drying of the material is recommended for energy optimization.

**Keywords:** Biofuel; Biomass combustion; Sustainability.

## 1. INTRODUÇÃO

Diversos estudos revelaram o potencial dos insumos lignocelulósicos para produção de energia térmica (CARVALHO et al. 2021; CRISÓSTOMO et al, 2021; WYN et al., 2020). Devido a isso, a biomassa de origem florestal, seja de florestas plantadas, resíduos industriais ou de resíduos de supressão de florestas naturais, representam um estoque de energia renovável que causam menos impactos ao ambiente quando comparados aos combustíveis derivados do petróleo (SAYED et al., 2021; MALICO et al., 2021).

No Brasil, a disponibilidade de biomassa é favorecida pela grande produção agrícola e condições climáticas propícias, possibilitando a obtenção do recurso em larga escala. A cana-de-açúcar e madeira são as fontes de biomassa mais utilizadas no Brasil (ALOKIKA et al., 2021; SILVA et al., 2021).

Entre as regiões brasileiras com maior potencial para geração de biomassa, destacam-se a região sudeste, sul e nordeste, no qual existem as

maiores áreas com florestas plantadas de *Eucalyptus*, amplamente empregado na produção de energia para siderúrgicas e caldeiras em indústrias (IBÁ, 2023). No entanto, outras regiões brasileiras contribuem com a geração de biomassa para energia como, por exemplo, a Amazônia. Nesta região, a biomassa é caracterizada pelos resíduos oriundos do desdobro de toras de espécies nativas, resíduos de supressão vegetal e resíduos agroindustriais (SOTELI et al., 2023).

Dentre os estados que se inserem na Amazônia, cabe destaque à Rondônia, onde a energia de biomassa é essencial para as atividades relacionadas ao processamento industrial dos produtos agropecuários. Um exemplo disso é o incremento das áreas cultivadas com soja. Conforme Embrapa 2022, estima-se que a produção em Rondônia será de 1,7 milhões de toneladas, ou seja, representa um crescimento de 20% quando comparado à safra de 2020. Isso traz expectativas e preocupações, porque para que esse incremento traga retornos econômicos, deve haver capacidade de secagem desses grãos para, então, venda no mercado externo.

No mesmo contexto, a expansão de zonas voltadas à pecuária faz da abertura de novas pastagens inevitável, sendo comum a deposição e acúmulo de biomassa nesse processo, principalmente por consequência da supressão de vegetação nativa para favorecimento do desenvolvimento das pastagens. Essa biomassa é adquirida por agroindústrias, como os frigoríficos, uma vez que Rondônia é um dos grandes produtores de carne bovina do País, com cerca de 17 milhões de cabeças de gado (PFEIFER et al 2021). Além dos frigoríficos, essa biomassa é também utilizada em caldeiras de laticínios, e para a produção anual de café em Rondônia, que chega a cerca de 2,8 milhões de sacas (EMBRAPA, 2022).

Com esses números expressivos, fica evidente a necessidade de se incrementar e otimizar o uso das fontes de biomassa para a região, evitando o aumento da pressão sobre a vegetação nativa, assim como a alta dos preços dessa fonte energética. Apesar do potencial da biomassa como fonte de energia em Rondônia, ainda há desafios a serem superados, como a disponibilidade, qualidade e custos dessa fonte energética (CARVALHO et al., 2021).

Nesse aspecto, a qualidade da biomassa é um dos maiores desafios, pois pode haver variações em termos de composição química, tamanho das partículas e umidade. Dessa forma, a qualidade da biomassa pode afetar seu desempenho na combustão, podendo levar a problemas como aumento do consumo de combustível, emissões de poluentes e falhas nos equipamentos.

Assim, estudos que auxiliem na definição das melhores práticas de uso armazenamento para as fontes energéticas de biomassa, são essenciais na otimização do uso dessas fontes de energia. Nesse contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma revisão dos principais aspectos relacionados à caracterização energética de biomassa lignocelulósica, com análise da umidade e sua influência no processo de combustão da biomassa.

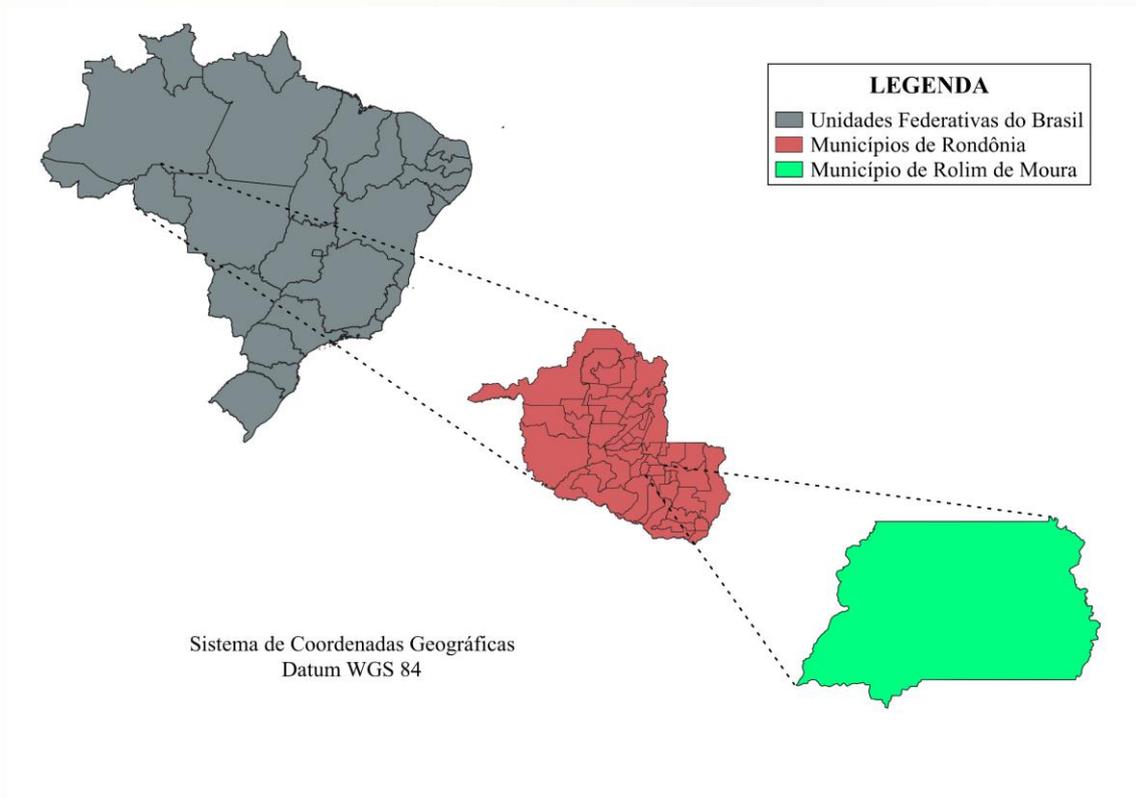
## **2. METODOLOGIA**

### **2.1 Coleta do material de estudo**

O material de estudo foi obtido em um empreendimento que presta serviços de secagem de grãos no município de Rolim de Moura, Rondônia (Latitude: 11° 43' 18,59" S, Longitude: 61° 46' 23,39" O) (Figura 1). Os materiais foram coletados no mês de maio de 2023, que é o fim do período chuvoso. Os

materiais caracterizavam-se como resíduos lenhosos de dimensões variáveis, com diâmetros de ~25 cm e comprimentos de ~1,5 m.

**Figura 1:** Localização do município de Rolim de Moura, Rondônia



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

## 2.2 Preparo do material

O material foi seccionado com serra motorizada em discos com espessura de ~ 2,5 cm. Além disso, as cascas foram removidas para as análises serem realizadas apenas considerando o material lignocelulósico. Em seguida, a partir dos discos, foram retirados cavacos de madeira com auxílio de broca chata acoplada em furadeira de bancada. O material foi seco em estufa de renovação e circulação forçada de ar a 103°C até a obtenção de peso constante e moído em moinho de facas tipo Willey. Subsequentemente, o pó resultante foi peneirado em malhas de 40 *mesh* e 60 *mesh*, com auxílio de um agitador de peneiras durante 20 minutos. O material retido na peneira de 60 *mesh* foi separado para análise imediata da biomassa.

### 2.3 Determinação da umidade

Para determinar a umidade em base seca e base úmida, as massas úmidas de seis amostras foram obtidas por meio do uso de balança semi-analítica. Na sequência, o material foi mantido em estufa de circulação e renovação forçada de ar ajustada com temperatura de  $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  até a observação de massa constante. Finalmente, de posse das massas secas das amostras, as umidades em base seca e base úmida foram calculadas conforme a norma ASTM E871-82 (ASTM, 2019).

### 2.4 Determinação da densidade básica

Para obtenção da densidade básica, seis corpos de prova foram submetidos à saturação em água com auxílio de fundo dessecador submetido ao vácuo de aproximadamente 0,5 bar até observação de volume constante. Em seguida, a densidade básica foi calculada conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

### 2.5 Análise imediata

Conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2007), foram determinados, a partir do material absolutamente seco retido na malha de 60 *mesh*, o teor de materiais voláteis a  $950^{\circ}\text{C}$  em forno mufla durante seis minutos. Já para o teor de cinzas foi empregada a norma TAPPI T413 om-22 (TAPPI, 2022), utilizando-se forno mufla ajustado em  $525^{\circ}\text{C}$  durante 3 h. O teor de carbono fixo foi calculado pela subtração dos teores de cinzas e materiais voláteis em relação à massa seca inicial da amostra.

### 2.6 Poder calorífico superior, inferior e líquido

O poder calorífico superior (PCS) foi estimado pelo modelo ajustado por Parikh et al. (2005), conforme a equação 4.

$$\text{PCS (MJ/kg)} = 0,637\text{CF} + 0,455\text{MV}, \text{ erro} = 3,21\% \quad (4)$$

Também foi calculada a densidade energética (DE) do material analisado por meio da equação 5.

$$DE \text{ (MJ/m}^3\text{)} = \text{Densidade básica (kg/m}^3\text{)} \times \text{PCS} \quad (5)$$

## 2.7 Energia necessária para evaporação da água

Para o cálculo da energia necessária para evaporação da água foram utilizados os procedimentos preconizados no trabalho de Soteli et al. (2023), conforme as equações 6, 7 e 8.

$$E_{bs} = m_s \square D_b \square PCI \text{ (MJ/t)} \quad (6)$$

$$E_{bu} = m_u \square D_b \square PCL \text{ (MJ/t)} \quad (7)$$

$$E_{ea} = [(E_{bs} - E_{bu})/m_a/1000] \text{ (GJ/t)} \quad (8)$$

Onde:  $m_s$  = massa seca da madeira;  $m_u$  = massa úmida da madeira;  $D_b$  = densidade básica;  $m_a$  = massa de água.

## 2.8 Análise dos resultados

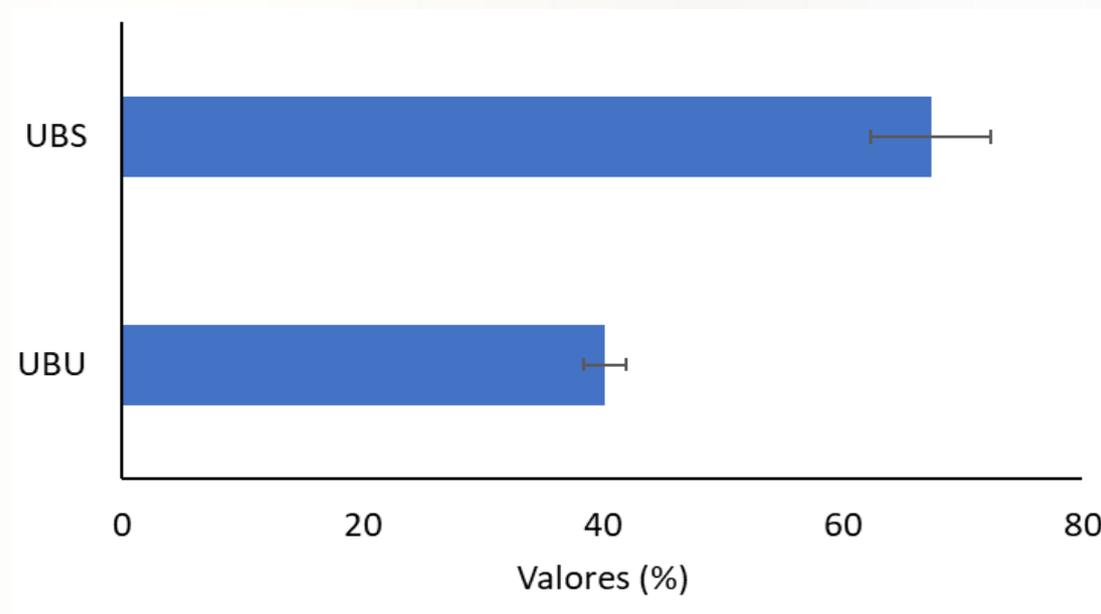
Os resultados foram analisados por meio de estatística descritiva, indicado média e desvio padrão. Também foi empregado o recurso de análise gráfica para interpretação dos resultados.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Determinação da umidade

A biomassa coletada no pátio do secador de grãos apresentou um elevado teor de umidade na base seca, de 67,40%, o que indica que o material ainda não estava seco o suficiente. De acordo com Carvalho et al. (2021), o ideal é que os materiais apresentem até 35% de umidade, pois isso garante um bom desempenho energético. No entanto, a alta umidade do material pode ser relacionada ao sistema de armazenamento realizado sob forma de pilhas a céu aberto. Isso dificulta a secagem natural (ao ar livre) desses materiais, fazendo com que a umidade fique retida no interior das pilhas (Figura 2).

**Figura 2:** Valores de umidade em base seca (UBS) e umidade em base úmida (UBU) obtidos para biomassa utilizada em secadores de grãos no município de Rolim de Moura, Rondônia



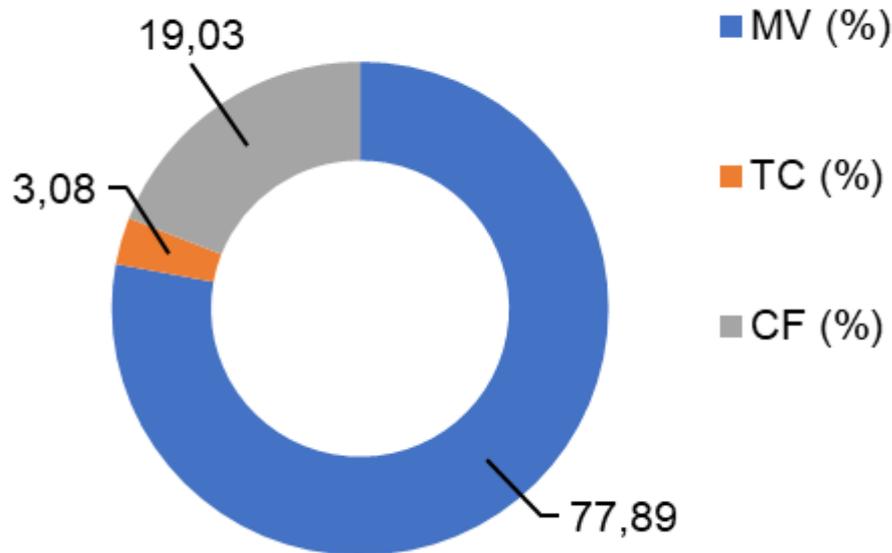
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

É importante ressaltar que a alta umidade pode afetar negativamente a qualidade da biomassa, reduzindo a densidade energética e dificultando o processo de conversão em energia.

### Análise imediata

Os teores de materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (TC) obtidos, conforme evidenciado na Figura 3, foram de 77,89%, 19,03% e 3,08%, respectivamente. No estudo realizado por Silva (1988), que abordou espécies amazônicas originárias de Manaus, foi constatada uma variação significativa nos teores de carbono fixo, oscilando entre 74,33% e 85,56%. Foram observados valores para os materiais voláteis, variando entre 11,69% e 25,11%, e os teores de cinzas, tiveram resultados que variaram de 0,56% a 2,87%.

**Figura 3:** Valores de materiais voláteis (MV), cinzas (TC) e carbono fixo (CF) obtidos para biomassa utilizada em secadores de grãos no município de Rolim de Moura, Rondônia



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

É importante ressaltar que o teor de materiais voláteis é uma propriedade crucial na avaliação do potencial energético da biomassa, uma vez que está diretamente relacionado com o poder calorífico e a eficiência energética (CRISÓSTOMO et al, 2021). Entretanto, o teor de cinzas obtido (3,08%) pode ser considerado elevado para fins energéticos, já que a presença de cinzas pode afetar a combustão e reduzir o rendimento da produção energética. Esse valor pode indicar uma possível contaminação do material, o que pode comprometer sua qualidade para uso em processos energéticos.

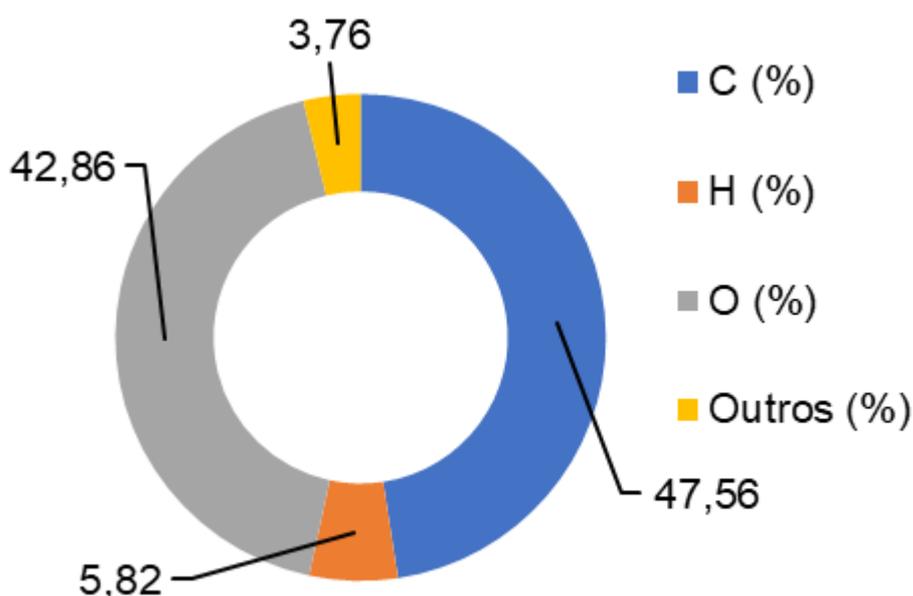
Estudos realizados por Soteli et al. (2023) indicaram que os teores de cinzas podem variar entre 0,17% e 3,60%. Portanto, embora o valor de cinzas obtido esteja dentro desse intervalo, é recomendável que se busque reduzir esse teor para aumentar a eficiência energética do material.

### Análise elementar

Conforme o diagrama de Van Krevelen, os compostos orgânicos podem ser representados por uma relação entre a relação hidrogênio/carbono (H/C) e a

relação oxigênio/carbono (O/C). No caso da biomassa analisada, os valores encontrados para H/C e O/C foram 0,12 e 0,90, respectivamente, os quais estão compatíveis com resultados encontrados na literatura para madeira (0,2 até 1,2) (ADHIKARI et al. 2018) (Figura 4).

**Figura 4:** Teores de carbono (C), oxigênio (O) e hidrogênio (H) para determinação da relação H/C e O/C da biomassa utilizada em secadores de grãos no município de Rolim de Moura, Rondônia



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Esses valores indicam que a biomassa tem uma relação H/C relativamente baixa em comparação com outras substâncias, o que significa que ela tem mais carbono em relação ao hidrogênio. Além disso, a relação O/C também é relativamente baixa, indicando que a biomassa tem menor quantidade de O em comparação com o C. Ou seja, quanto maiores as quantidades de C e menores quantidade de O elementar, maior será o poder calorífico do combustível lignocelulósico (POUDEL et al., 2018).

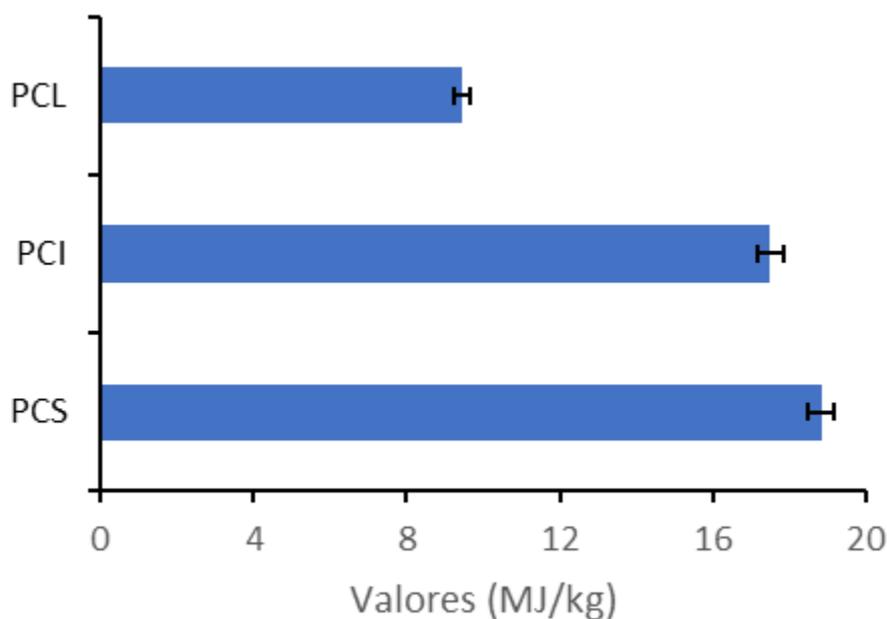
Essas características são típicas de materiais orgânicos de alto poder calorífico, como a lignina, sendo um dos principais componentes da parede celular vegetal (WYN et al., 2020). Portanto, os resultados obtidos na análise

química da biomassa, combinados com a interpretação do diagrama de Van Krevelen, indicaram que ela tem potencial significativo como fonte de energia renovável e pode ser uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis.

### Poder calorífico superior, inferior e líquido

Para a biomassa em estudo, obteve-se valores de poder calorífico superior, inferior e líquido, 18,85, 17,49 e 9,45 MJ/kg, respectivamente (Figura 5). O poder calorífico da biomassa é influenciado por diversos fatores, como a composição química, densidade e umidade. Um estudo realizado por Fortaleza et al. (2019) verificou que a densidade básica e a umidade da biomassa têm uma forte relação com o poder calorífico.

**Figura 5:** Valores de poder calorífico líquido (PCL); poder calorífico superior (PCS); e poder calorífico inferior (PCI) obtidos para biomassa utilizada em secadores de grãos no município de Rolim de Moura, Rondônia



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O valor de PCS é o mais elevado dos três, o que indica que a biomassa tem um alto potencial de liberação de calor quando queimada completamente. Porém, o valor de PCI é um pouco menor que o de PCS, pois durante a combustão incompleta uma parte do carbono permanece na forma de cinzas.

Já o valor de PCL, sendo a diferença entre o PCS e o PCI, indica haver uma perda de energia durante a combustão da biomassa, principalmente devido à presença de umidade elevada na biomassa. Quando a biomassa contém umidade elevada, uma quantidade significativa de vapor de água é gerada durante a combustão, aumentando o PCS, mas não o PCI. Isso resulta em uma redução do valor energético do combustível em relação ao seu potencial máximo.

A densidade energética é uma medida da quantidade de energia que pode ser extraída por unidade de volume ou massa de uma biomassa. No caso da biomassa avaliada, a densidade energética foi calculada em 10984,24 MJ, sugerindo um alto potencial energético dessa biomassa.

### **Energia necessária para evaporação da água**

Foram obtidos para energia produzida em base seca e em base úmida valores de 0,85 e 0,77 MJ/t, respectivamente. A partir disso, a energia estimada para vaporização da água da biomassa foi de 1,44 GJ/t, que é relativamente alto (SOTELI et al., 2023). Um elevado valor indica que uma abundância de energia é necessária para evaporar a água presente na biomassa, o que pode afetar negativamente o poder calorífico da mesma (ALZATE; TORO, 2006; AHN et al., 2023).

Esse valor pode ser considerado ruim para o uso da biomassa como fonte de energia, já que parte da energia disponível será utilizada para a evaporação da água, reduzindo o seu potencial de liberação de calor durante a combustão. Por outro lado, se a biomassa for submetida a um processo de secagem, reduzindo o seu teor de umidade, a energia necessária para a evaporação da água será menor, o que pode aumentar o seu poder calorífico e torná-la mais adequada para uso como fonte de energia.

## **4 CONCLUSÕES**

Conclui-se que as peças de madeira apresentam um teor de umidade muito elevado, o que pode afetar significativamente sua eficiência energética. A umidade excessiva da biomassa pode gerar excesso de vapor de água

durante a combustão, resultando em uma redução do poder calorífico inferior e líquido, que foram de 17,49 e 9,45 MJ/kg, respectivamente. Além disso, o alto teor de umidade da biomassa pode levar a uma perda de energia durante a combustão devido à energia necessária para a evaporação da água, que foi calculada em 1,46 MJ/kg.

Embora a densidade energética da biomassa tenha sido avaliada em um valor elevado de 10.984,24 MJ/m<sup>3</sup>, a alta umidade presente na biomassa pode reduzir significativamente sua eficiência energética e potencial energético. Portanto, é importante considerar o teor de umidade da biomassa ao selecionar uma fonte de energia, a fim de maximizar sua eficiência e reduzir as perdas de energia. Medidas para reduzir o teor de umidade da biomassa podem incluir a secagem adequada antes da combustão ou o armazenamento em condições apropriadas.

## 5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente ao Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais Lignocelulósicos (GPEMLIG), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Fundação Universidade Federal de Rondônia (UNIR), o qual a colaboração foi imprescindível à realização do presente estudo.

## REFERÊNCIAS

ADHIKARI, S.; NAM, H.; CHAKRABORTY, J.P. Chapter 8 - Conversion of Solid Wastes to Fuels and Chemicals Through Pyrolysis. **Waste Biorefinery**, p.239-263, 2018.

AHN, B.;PARK, C.;LIU ,J.J.; OK, Y.S.; WON, W. Maximizing the utilization of lignocellulosic biomass: Process development and analysis. **Renewable Energy**, v. 215, 2023.

ALOKIKA, A.; KUMAR, A.; KUMAR, V.; SINGH, B. Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 169, p. 564-582, 2021.

ALZATE, A.C.; TORO, O.J.S. Energy consumption analysis of integrated flowsheets for production of fuel ethanol from lignocellulosic biomass. **Energy**, v. 31, p. 2447-2459, 2006.

AMERICAN STANDARD TEST METHODS – **ASTM. ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels.** West Conshohocken: ASTM, 2019. 2 p.

AMERICAN STANDARD TEST METHODS – **ASTM. ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.** West Conshohocken: ASTM, 2021. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11941: **Madeira – Determinação da Densidade Básica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

CARVALHO, N. R.; BARROS, J.L.; SILVA, D.A; NAKASHIMA, G.T.; YAMAJI, F.M. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma cadeira. **Quim. Nova**, v. 44, n.o 1, p. 35-40, 2021.

CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F.; VALE, A. T.; CHAVES, B. S. A. Caracterização energética de madeira de *E. grandis*, *Pinus sp.*, *T. vulgaris* e *P. lecointei*. **Recursos Naturais: energia de biomassa florestal**, p 49 - 61, 2021.

EMBRAPA. Publicação da Embrapa Analisa Dados Agropecuários de Rondônia. **Embrapa**, 2022. Disponível em : [Publicação da Embrapa Analisa Dados Agropecuários de Rondônia - Portal Embrapa](#). Acesso em: 20 de Ago de 2023.

FORTALEZA, A. P.; CERETTA, R. P. D. S.; BARROS, D. D. S.; SILVA, S. S. D. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1436-1451, 2019.

IBÁ. Relatório anual. **Ibá**, 2022. Disponível em: [relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf](#). Acesso em: 27 de set. de 2023.

MALICO, I.; PEREIRA, R.N.; GONÇALVES, A.C.; SOUZA, A.M.O. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 960-977, 2019.

PFEIFER, L.F.M.; SALMAN, A.K.D.; TABORDA, J.M.M., SILVA, G.M.; ANDRATE, J.S.; ARAUJO, L.V.; SOUZA, V.L.; TEIXEIRA, O.S. **Caracterização da pecuária em Rondônia.** Embrapa Rondônia-Capítulo em livro científico (ALICE), 2021.

POUDEL, J.; KARKI, S.; OH, S.C. Valorization of Waste Wood as a Solid Fuel by Torrefaction. **Energies**, v. 11, p. 1641, 2018.

SAYED, E.T.; WILBERFORCE, T.; ELSAID, K.; RABAIA, M.K.H.; ABDELKAREEM, M.A.; CHAE, K.J.; OLABI, A.G. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. **Science of The Total Environment**, v. 766, 2021.

SILVA D.A. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – INPA. Qualidade do carvão vegetal produzido com madeiras da região de Manaus em fornos de alvenaria. **Acta amazônica**, v. 18, n, 1-2, 1988.

SILVA, S.P.; COSTA, A.S.V.; SANTOS, S.L.B.; LAIA, M.L. A Importância da biomassa na matriz energética brasileira. **Pensar acadêmico**, v. 19, n. 2, 2021.

SOTELI, R.P.; RODRIGUES, L.D.O.; PEREIRA, B.L.C.; PROTÁSIO, T.P.; CARNEIRO, A.C.O.; OLIVEIRA, A.C. Gestão e classificação de resíduos do processamento primário de madeira tropical amazônica brasileira para fins de geração de energia. **Environ Dev Sustentar (2023)**.

SOUSA, L. T.; CHAVES, M. F. C.; TANNÚS, S. P.; ESPINOSA, J. W. M. Estudo da biomassa como energia renovável no Brasil a partir da matriz SWOT. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 34–44, 2018.

SILVA, S. P.; COSTA, A. S. V.; SANTOS, S.L.B.; LAIA, M.L. A IMPORTÂNCIA DA BIOMASSA NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA. **Pensar acadêmico**, v. 19, n. 2, 2021.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP & PAPER INDUSTRY INC - TAPPI. **Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 900°C, Test Method T 413 om-22**. TAPPI, 2022.

WYN, H.K.; ZÁRATE, S.; CARRASCAL, J.; YERMÁN, L. A Novel Approach to the Production of Biochar with Improved Fuel Characteristics from Biomass Waste. **Waste Biomass Valor**, v. 11, p. 6467–6481, 2020.