



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

POTENCIAL ENERGÉTICO DE BRIQUETES DE CASCA DE ARROZ
EM MISTURA COM SERRAGEM DE PINUS

SARAH CRISTINNE SOARES CALAIS

Brasília, 2022

SARAH CRISTINNE SOARES CALAIS

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE BRIQUETES DE CASCA DE ARROZ EM MISTURA
COM SERRAGEM DE PINUS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. Ailton Teixeira do Vale

Brasília – DF
2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE BRIQUETES DE CASCA DE ARROZ EM MISTURA
COM SERRAGEM DE PINUS**

SARAH CRISTINNE SOARES CALAIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO APRESENTADO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE BACHAREL EM
ENGENHARIA FLORESTAL.

APROVADO POR:

Dr. Ailton Teixeira do Vale
Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB
(Orientador)

Dr. Alexandre Florian da Costa
Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB
(Membro da Banca)

Dra. Clarissa Melo Lima
Faculdade UnB Planaltina – FUP/UnB
(Membro da Banca)

Brasília, 29 de novembro de 2022.

RESUMO

POTENCIAL ENERGÉTICO DE BRIQUETES DE CASCA DE ARROZ EM MISTURA COM SERRAGEM DE PINUS

A biomassa é uma fonte de energia alternativa e renovável de destaque no atual cenário de alta demanda energética e degradação ambiental. Com alta disponibilidade no Brasil, a casca de arroz é uma das biomassas agroindustriais que se adequam à produção de energia, mas que apresenta alto teor de cinzas e baixa densidade do granel. A mistura com biomassa florestal e a compactação do resíduo são possíveis soluções para essas propriedades indesejáveis. Dentro deste contexto, o objetivo do presente trabalho foi a produção e qualificação de briquetes com diferentes proporções de casca de arroz em mistura com serragem de pinus. A caracterização do material *in natura* se baseou nas propriedades físicas (teor de umidade e densidade do granel), análise imediata (material volátil, cinzas e carbono fixo), poder calorífico e densidade energética. Os resíduos foram compactados sem processamento prévio e sem adição de ligante, em uma briquetadeira de laboratório com pressão de 80bar e temperatura de 120°C durante 5 minutos. Os briquetes foram avaliados quanto a densidade aparente, densidade do granel e densidade energética. Foram realizados cinco tratamentos com dez repetições, e adotou-se um delineamento inteiramente casualizado para a análise estatística. Todos os tratamentos mostraram-se adequados para briquetagem. A mistura das biomassas proporcionou a redução do teor de cinzas da casca de arroz e o incremento do teor de carbono fixo da serragem de pinus. O ganho em densidade energética com a compactação da biomassa foi superior a 78% em todos os tratamentos, chegando a atingir 237%.

Palavras-chave: Biomassa; Briquetes; Casca de arroz; Serragem de pinus; Densidade energética.

ABSTRACT

ENERGY POTENTIAL OF RICE HUSK BRIQUETTES IN A MIXTURE WITH PINE SAWDUST

Biomass is an alternative and renewable energy source of prominence in the current scenario of high energy demand and environmental degradation. Rice husk has high availability in Brazil and is one of the agroindustrial biomass that is suitable for energy production, but it presents high ash content and low bulk density. Blending with forest biomass and compaction of the residue are possible solutions to these undesirable properties. Within this context, the objective of the present work was the production and qualification of briquettes with different proportions of rice husk in mixture with pine sawdust. The characterization of the *in natura* material was based on physical properties (moisture content and bulk density), immediate analysis (volatile material, ash and fixed carbon), calorific value and energy density. The wastes were compacted without prior processing and without binder addition, in a laboratory briquetting machine with a pressure of 80bar and temperature of 120°C for 5 minutes. The briquettes were evaluated for bulk density and energy density. Five treatments with ten repetitions were performed, and an entirely randomized design was adopted for statistical analysis. All treatments were suitable for briquetting. The mixture of biomasses provided a reduction in the ash content of rice husk and an increase in the fixed carbon content of pine sawdust. The gain in energy density with biomass compaction was over 78% in all treatments, reaching 237%.

Keywords: Biomass; Briquettes; Rice husk; Pine sawdust; Energy density.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Analisador de umidade Ohaus MB35.	14
Figura 2 – Determinação do teor de material volátil. A – Forno mufla microprocessado Quimis Q318M. B – Candinhos incandescentes após a retirada do forno mufla.	15
Figura 3 – Analisador Termogravimétrico TGA-2000A.	16
Figura 4 – Bomba Calorimétrica IKA C2000 Basic.	17
Figura 5 – Produção dos briquetes. A – Briquetadeira Lippel LB 32. B – Briquete produzido em resfriamento.	19
Figura 6 – Ganho energético pela compactação da biomassa.	255

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamentos dos briquetes em função da composição percentual da casca de arroz e serragem de pinus.....	13
Tabela 2 – Valores médios de teores de material volátil, cinzas, carbono fixo e umidade para o material <i>in natura</i> : casca de arroz (T1), serragem de pinus (T5) e misturas (T2, T3, T4).....	20
Tabela 3 – Análise de variância (ANOVA) dos teores de material volátil, cinzas, carbono fixo e umidade para o material <i>in natura</i>	20
Tabela 4 – Valores médios de densidade do granel, poder calorífico útil e densidade energética do material <i>in natura</i>	21
Tabela 5 – Valores médios de diâmetro, comprimento, volume e teor de umidade dos briquetes produzidos.....	22
Tabela 6 – Poder calorífico superior, inferior e útil dos briquetes.....	23
Tabela 7 – Densidade aparente, do granel e energética dos briquetes.....	24
Tabela 8 – Análise de variância (ANOVA) da densidade energética	24
Tabela 9 – Valores limites das principais propriedades dos briquetes na certificação ENplus	25

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Coleta e Preparo da Matéria-Prima	13
3.2 Caracterização do Material <i>In Natura</i>	14
3.2.1 Teor de Umidade	14
3.2.2 Densidade do Granel	14
3.2.3 Análise Imediata	15
3.2.4 Poder Calorífico	17
3.2.5 Densidade Energética	18
3.3 Produção dos Briquetes	18
3.4 Caracterização dos Briquetes	19
3.4.1 Densidade Aparente Sólida	19
3.4.2 Densidade do Granel	19
3.4.3 Densidade Energética	19
3.5 Análise Estatística	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 Caracterização do Material <i>In Natura</i>	20
4.2 Caracterização dos Briquetes.....	22
5 CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS	27

1. INTRODUÇÃO

O ser humano é o grande responsável pelas decisões tomadas em prol do avanço tecnológico que culminam nas modificações ambientais e climáticas. Uma consequência inevitável é o aquecimento global, realidade ligada diretamente ao consumo de combustíveis fósseis, que ainda tem problemas com o seu gerenciamento. A cada ano a situação se agrava com o aumento populacional e o consequente aumento no consumo de energia, tornando-se necessária a adoção de matrizes energéticas mais limpas.

Neste cenário, a biomassa aparece como uma alternativa promissora principalmente em um país tropical como o Brasil, onde é possível produzir biomassa de qualidade e ter alta produtividade de norte a sul. Além disso, a possibilidade de uso nas formas sólida, líquida e gasosa é uma grande vantagem da utilização da biomassa como combustível.

Entre as biomassas com potencial de uso na produção de energia, tem-se a casca de arroz, resíduo gerado no beneficiamento do arroz, muito utilizado no sul do país na produção de energia elétrica em termoelétricas. Contudo, a queima descontrolada deste material leva à emissão de poluentes e à perda do aproveitamento energético, além de ser um resíduo com baixa densidade do granel e elevado teor de cinzas (VIEIRA *et al.*, 2013; GUIMARÃES *et al.*, 2014).

A briquetagem, processo de compactação caracterizado pela submissão do resíduo à elevadas temperaturas e pressões, surge como uma forma de aumentar a massa por unidade de volume além de ser uma possibilidade de melhor aproveitamento dos resíduos. A grande quantidade de resíduos tem sido um problema para as indústrias, que por meio da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), são obrigadas a oferecerem destinação final ambientalmente adequada aos resíduos que geram.

Uma possível solução para o elevado teor de cinzas é a mistura da casca de arroz com biomassa florestal, uma vez que madeiras em geral, têm baixos teores por conter menores concentrações de elementos que formam cinzas (VASSILEV *et al.*, 2010). Atualmente, o pinus é uma das espécies mais utilizadas pela indústria brasileira de base florestal, com alta geração de resíduos e valor de cinzas geralmente inferior a 1% (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Neste contexto, o presente estudo propõe a briquetagem da casca de arroz misturada com serragem de *Pinus* sp e a avaliação do potencial energético dos briquetes produzidos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Historicamente, o Brasil se destaca por ser um país com expressivo percentual de fontes renováveis em sua oferta interna quando comparado ao resto do mundo, contudo, ainda apresenta predominante participação de fontes não renováveis (EPE, 2022). A matriz energética brasileira é também pouco diversificada e dependente de recursos hídricos como insumo para geração de energia, o que se torna um risco diante das previsões de escassez de chuva (BEZERRA, 2016). Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN), em 2021 houve redução na porcentagem das fontes renováveis na matriz brasileira em razão da queda na oferta hidráulica, associada à menor quantidade de chuvas. Essa queda tem sido compensada por um aumento (cerca de 24%) na geração de energia termelétrica a partir de gás natural, fonte fóssil relacionada ao aumento do efeito estufa.

A biomassa é uma fonte primária de energia considerada uma das principais alternativas para a redução da dependência dos combustíveis fósseis, sendo promissora tanto no mercado internacional quanto no interno. Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é considerada biomassa, que de acordo com sua origem, pode ser classificada em florestal, agrícola ou rejeitos urbanos (ANEEL, 2008). A biomassa agrícola, tipicamente originada de colheitas anuais, se apresenta como uma oportunidade sustentável no país devido a expressiva quantidade de resíduos resultantes da produção nacional (EPE, 2014). No entanto, com exceção do bagaço de cana-de-açúcar, a biomassa residual agrícola ainda é pouco utilizada, e muitas vezes descartada de forma inadequada (DIAS *et al.*, 2012).

A biomassa pode ser utilizada diretamente para geração de energia na forma de calor, bem como pode ser transformada em biocombustíveis líquidos como o etanol e o bioóleo, em biocombustíveis gasosos como o gás de síntese, ou em biocombustíveis sólidos, como os pellets e briquetes (SILVA, 2009). O briquete é o produto resultante da compactação do resíduo por meio do processo de briquetagem, que além de favorecer a queima, propicia condições mais adequadas de uso e armazenamento (DIAS *et al.*, 2012). É uma alternativa energética com potencial de substituição da lenha, sobressaindo-se a ela em relação às características físicas, transporte, armazenagem, responsabilidade ambiental e comercialização (SOUZA *et al.*, 2018).

O briquete pode ser produzido com apenas uma matéria-prima ou com a mistura de diferentes biomassas. A mistura pode ser uma forma mais eficiente de utilização dos resíduos, com potencial de incremento do poder calorífico e redução do teor de cinza, transformando-o

em um produto com maior valor agregado (GONÇALVES *et al.*, 2009; BRAND *et al.*, 2021). A escolha da matéria-prima é importante pois tem maior influência sobre a qualidade dos briquetes do que as variáveis do processo (BRAND *et al.*, 2009; FURTADO *et al.*, 2010).

Segundo as estatísticas da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAOSTAT, 2020), o arroz é a quarta principal *commodity* agrícola no mundo, e o Brasil é o seu nono maior produtor. A casca de arroz é o principal subproduto formado no processo de beneficiamento do arroz e dos mais abundantes resíduos agroindustriais. Ela corresponde ao revestimento exterior do arroz e pesa em média 20% da massa total do grão (ARMESTO *et al.*, 2002). Considerando essa média, estima-se uma produção nacional de 2,15 milhões de toneladas de casca de arroz para a safra 2021/22, projetada em 10,78 milhões de toneladas de arroz (CONAB, 2022).

Devido à alta quantidade gerada anualmente, junto com sua difícil decomposição e constituição altamente fenólica, o descarte inadequado da casca de arroz é um sério problema ambiental. Enquanto os demais resíduos da indústria arroseira (farelo e quirera) são comumente utilizados na produção de ração, a baixa propriedade nutritiva e o elevado teor de sílica da casca impedem seu uso para consumo animal (DINIZ, 2005). Contudo, em função do seu alto teor de voláteis, alto poder calorífico superior e baixo teor de umidade, esse resíduo apresenta potencial como biomassa para geração de energia (VIEIRA *et al.*, 2013).

O Brasil também é referência mundial de produtividade em plantios florestais, com alto volume de produção anual de madeira por área. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2022), as árvores plantadas representam 91% de toda a madeira produzida para fins industriais no país, contemplando aproximadamente 10 milhões de hectares. Aproximadamente 1,9 milhão de hectare dessa área é composta por pinus, que perde apenas em relação ao eucalipto com 7,5 milhões de hectares. Durante o processo de transformação da madeira, toneladas de diversos tipos de resíduos são gerados e entre eles a serragem é um dos mais abundantes. A serragem é originada da operação de serras e encontrada em quase todos os tipos de indústria madeireira, além de ser adequada para a confecção de briquetes de alta qualidade (IBDF, 1988; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Não existem normas brasileiras específicas que determinem os padrões de qualidade dos briquetes, por isso normas internacionais são comumente usadas como referência. A normatização é essencial para garantir a qualidade e uniformidade do produto e diminuir as barreiras de mercado entre os países. Atualmente, o principal padrão de briquetes está contido na norma ISO/DIN 17225, que trata sobre biocombustíveis sólidos, na série 3 – briquetes de origem lenhosa; e série 7 – briquetes de origem não lenhosa (ORELLANA, 2019).

A qualidade do briquete é influenciada por parâmetros relativos à biomassa e ao processo de briquetagem. Em geral, maiores temperaturas, pressões e tempos de prensagem influenciam positivamente na densidade e resistência mecânica dos produtos. Esse comportamento ocorre devido ao maior contato entre as partículas, que permite maior transferência de calor da superfície para o interior do briquete e possibilita produtos mais estáveis com menor dimensão (PAULA *et al.*, 2011; DIAS *et al.*, 2012; FREITAS *et al.*, 2016). Nos briquetes de origem vegetal, a lignina, polímero estrutural da madeira e dos resíduos ligno-celulósicos, fluidifica e age como um adesivo de partículas por meio de elevadas pressões e temperaturas, dispensando a adição de aglutinantes (QUIRINO *et al.*, 2012).

Como a briquetagem visa ao incremento da densidade do material, este é um dos parâmetros que merece mais atenção (ORELLANA, 2019). À medida que a densidade aumenta, haverá mais massa por volume e, portanto, mais energia (LIMA, 2010). Nesse sentido, valores elevados de densidade (aparente e do granel) favorecem a densidade energética e reduzem os custos de transporte e armazenamento (NAKASHIMA *et al.*, 2014). A densidade energética é o parâmetro de qualidade mais importante, visto que relaciona a quantidade de energia contida em um dado volume e permite avaliar e comparar o potencial energético de fontes distintas (QUIRINO *et al.*, 1991; RODRIGUES, 2009).

O poder calorífico refere-se à quantidade de energia liberada na forma de calor pela combustão de uma unidade de massa, e pode ser expresso como poder calorífico superior ou inferior, dependendo se o calor liberado pela condensação da água de constituição do combustível é ou não considerado (SOARES; HAKKILA, 1987). Há também o poder calorífico útil, que representa a quantidade de energia liberada descontada a energia utilizada para evaporação da água de constituição e umidade do combustível (FERREIRA *et al.*, 2014).

A umidade possui influência no poder calorífico dos briquetes, visto que quanto mais úmido, mais energia da combustão será gasta para o aquecimento e evaporação da água presente no material. Segundo Brand *et al.* (2009), quanto maior a pressão e temperatura exercida no processo, menor será o teor de umidade dos briquetes. Além disso, elevados teores de umidade podem provocar explosões e produzir briquetes instáveis dimensionalmente devido à formação de vapor de água no interior da biomassa, enquanto teores muito baixos dificultam os mecanismos de ligação entre as partículas (GONÇALVES, 2010).

A composição química da biomassa é essencial para caracterizar suas propriedades para uso como combustível, bem como para selecionar as tecnologias mais adequadas e antecipar possíveis problemas operacionais e ambientais decorrentes de sua combustão (FERNANDES, 2015). Altos teores de carbono e hidrogênio indicam alto poder calorífico,

enquanto o oxigênio apresenta efeito oposto. Isso ocorre devido ao oxigênio ocupar os espaços vazios presentes nas células e não apresentar características energéticas (FERREIRA *et al.*, 2016). Nesse sentido, o poder calorífico também será maior quando os teores de lignina e extrativos forem maiores, visto que a lignina e os extrativos contêm menos oxigênio quando comparado a celulose e a hemicelulose (QUIRINO *et al.*, 2005).

A análise imediata por sua vez, informa a porcentagem da biomassa que se queima no estado gasoso (material volátil) e no estado sólido (carbono fixo), e fornece indicação do material residual (cinzas) (BRITO; BARRICHELO, 1978). Os materiais voláteis são substâncias desprendidas da biomassa como gases durante a perda de massa no processo de pirólise, possuindo importante papel durante a ignição e nas etapas iniciais de combustão da biomassa. O carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente na matéria e é o componente principal na geração de energia durante a combustão (ORELLANA, 2019). O teor de cinzas representa a fração inerte da amostra, a qual é incombustível, e por isso, tem relação inversa com o poder calorífico (FURTADO *et al.*, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Coleta e Preparo da Matéria-Prima

A casca de arroz e a serragem de pinus foram obtidas na indústria de beneficiamento e madeira do Distrito Federal. Para a caracterização, foram definidos cinco tratamentos em função da proporção de cada resíduo, conforme a Tabela 1. Os tratamentos T2, T3, T4 correspondem as misturas, enquanto os tratamentos T1 e T5 consistem apenas em casca de arroz e serragem de pinus, respectivamente. Os resíduos foram caracterizados de acordo com os tratamentos na forma *in natura*, ou seja, na condição em que foram produzidos, e na forma de briquetes, após terem sido sujeitos ao processo de compactação.

Tabela 1 – Tratamentos dos briquetes em função da composição percentual da casca de arroz e serragem de pinus.

Tratamento	% em massa de casca de arroz	% em massa de serragem de pinus
T1	100	0
T2	75	25
T3	50	50
T4	25	75
T5	0	100

Fonte: Autoria própria.

Em virtude da ausência de normas brasileiras específicas para a padronização e caracterização de briquetes, foram adotadas as normas internacionais ISO (International Organization for Standardization).

3.2. Caracterização do Material *In Natura*

3.2.1. Teor de Umidade

O teor de umidade foi determinado por meio do analisador de umidade halógeno Ohaus MB35 (Figura 1), em conformidade com a norma ISO 18134 (2015). Amostras de 3g foram submetidas ao analisador, aquecido a 100 °C, durante 10 minutos. Cinco amostras de cada tratamento foram testadas para uma maior precisão dos resultados.

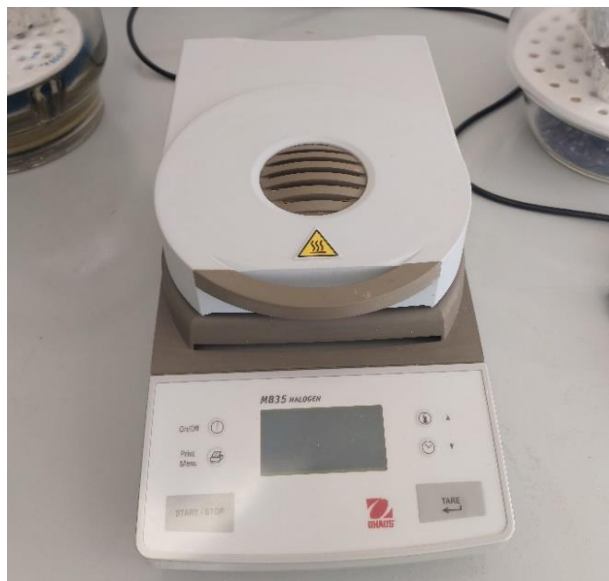


Figura 1 – Analisador de umidade Ohaus MB35.

3.2.2. Densidade do Granel

A densidade do granel da biomassa foi determinada conforme a norma ISO 17828 (2015), segundo a Equação 1, utilizando um recipiente de volume conhecido. A massa foi determinada em uma balança com precisão de 0,01g. Para cada tratamento, foram realizadas cinco repetições.

$$DG = \frac{M}{V_r} * 1000 \quad \text{Equação (1)}$$

Em que:

DG = Densidade do granel (kg/m³);

M = Massa do material *in natura* (g);

V_r = Volume do recipiente (cm³).

3.2.3. Análise Imediata

Na análise imediata foram determinados o teor de material volátil, o teor de cinzas e o teor de carbono fixo, com base nas normas ISO 18122 (2015) e ISO 18123 (2015). Os ensaios foram realizados em duplicatas, no Laboratório de Produtos Florestais (LPF) pertencente ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB) do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA).

a) Material Volátil

O teor de material volátil foi determinado pela Equação 2, a partir de amostras de 1g de material, a 0% de umidade, em cadinhos de grafite com tampa, colocados no interior do forno mufla à temperatura de $900 \pm 10^\circ\text{C}$ por 7 minutos, com porta fechada. Após a retirada do forno, os cadinhos ficaram refriando por 5 minutos em temperatura ambiente, e mais 30 minutos em um dessecador, para posterior pesagem da massa final em uma balança semi-analítica com sensibilidade de 0,001g.

$$MV = \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{amostra}} * 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

MV = Teor de materiais voláteis (%);

Minicial = Massa inicial do cadinho + amostra (g);

Mfinal = Massa final do cadinho + amostra (g);

Mamostra = Massa inicial da amostra seca (g).

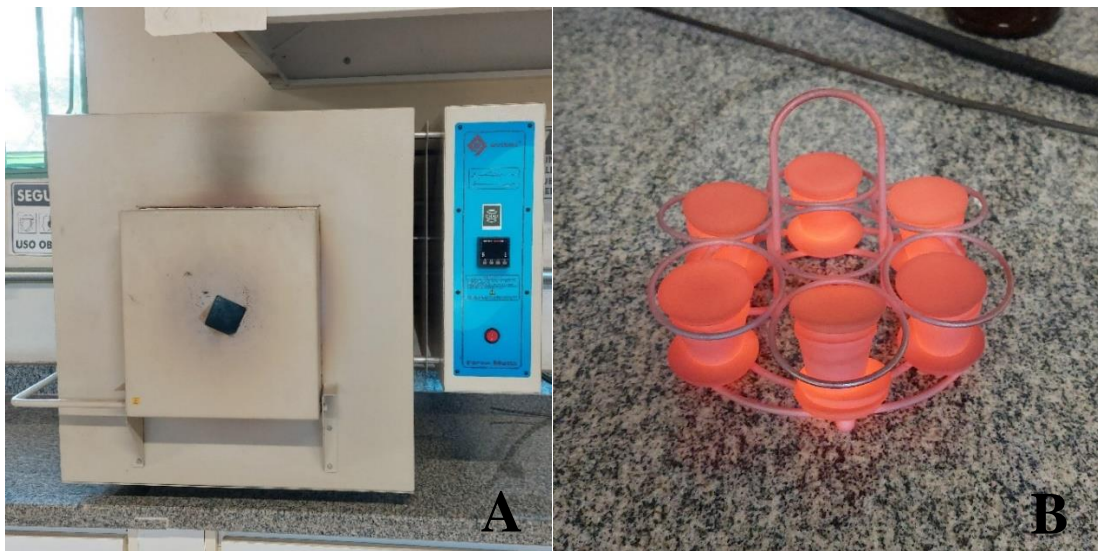


Figura 2 – Determinação do teor de material volátil. A – Forno mufla microprocessado Quimis Q318M. B – Cadinhos incandescentes após a retirada do forno mufla.

b) Cinzas

O teor de cinzas foi determinado em um analisador termogravimétrico (Figura 3), equipamento que se baseia na medida da variação de massa em função da temperatura. Amostras de 1g de material foram adicionadas a cadinhos previamente pesados, inseridos no forno sobre um suporte conectado a uma balança. Os parâmetros do ensaio foram ajustados no software do equipamento. A temperatura foi elevada até 250°C com velocidade de aquecimento de 5°C/min, e manteve-se por 60 minutos para perda dos voláteis. Em seguida, a temperatura aumentou novamente até 550 °C, onde permaneceu por 120 minutos até que as amostras atingissem massa constante.



Figura 3 – Analisador Termogravimétrico TGA-2000A.

Os resultados foram obtidos de forma automática conforme a Equação 3:

$$CZ = \frac{M_{final} - M_{cadinho}}{M_{amostra}} * 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

CZ = Teor de cinzas, em (%);

M final = Massa final do cadinho + amostra (g);

M cadinho = Massa do cadinho (g);

M amostra = Massa inicial da amostra seca (g).

c) Carbono Fixo

O teor de carbono fixo (CF) é uma medida indireta calculada conforme a Equação 4:

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad \text{Equação (4)}$$

3.2.4. Poder Calorífico

a) Poder Calorífico Superior

O poder calorífico superior foi obtido por uma bomba calorimétrica da marca Ika (Figura 4), a partir de amostras de 1g a 0% de umidade, com base na norma ISO 18125 (2017). Na preparação, as amostras foram moídas, secas em estufa à $103\pm 2^\circ\text{C}$ e distribuídas em triplicatas. O valor médio do poder calorífico considerado foi aquele entre dois valores cuja diferença não ultrapassou 29 kcal/kg.



Figura 4 – Bomba Calorimétrica IKA C2000 Basic.

b) Poder Calorífico Inferior

O cálculo do poder calorífico inferior foi realizado conforme a Equação 5, descontando-se do poder calorífico superior a energia necessária para evaporação da água de constituição. O percentual de hidrogênio utilizado foi de 6,08% para a casca de arroz (MACÊDO, 2012) e 6% para serragem de pinus (CALEGARI *et al.*, 2005).

$$PCI = PCS - \left(600 * \frac{9H}{100} \right) \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

PCS = Poder calorífico superior (kcal/kg);

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/kg);

H = Hidrogênio (%).

c) Poder Calorífico Útil

O poder calorífico útil foi obtido a partir do PCI considerando a umidade do material, conforme a Equação 6.

$$PCU = PCI * (1 - U) - 600 * U \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

PCU = Poder calorífico útil (kcal/kg);

U = Umidade em base úmida (%).

3.2.5. Densidade Energética

A densidade energética foi calculada a partir do produto do poder calorífico útil e a densidade do granel, conforme a Equação 7. O poder calorífico útil foi utilizado por melhor refletir a realidade, visto que desconta a energia gasta para evaporação da água de constituição e umidade do resíduo.

$$DE = PCU * DG \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

DE = Densidade energética (kcal/m³);

PCU = Poder calorífico útil (kcal/kg na umidade “u”);

DG = Densidade do granel (kcal/kg na umidade “u”).

3.3. Produção dos Briquetes

Os briquetes foram produzidos na Fazenda Água Limpa (FAL), da Universidade de Brasília. Para cada tratamento foram realizadas 10 repetições, totalizando 50 briquetes. Para cada briquete, 40 gramas de material foram submetidos a uma pressão de 80bar e temperatura de 120 °C durante 5 minutos, em uma briquetadeira da marca Lippel (Figura 5). Após a retirada da pressão, o briquete ficou resfriando por 10 minutos com ventilação forçada. Os parâmetros de briquetagem foram definidos conforme Souza e Vale (2016), e Oliveira *et al.* (2017). Nas misturas, os resíduos foram agitados manualmente com o auxílio de um saco plástico afim de inserir o material de forma homogênea no cilindro. Nenhum aglutinante foi adicionado aos resíduos, dependendo apenas da lignina para aglutinação das partículas.



Figura 5 – Produção dos briquetes. A – Briquetadeira Lippel LB 32. B – Briquete produzido em resfriamento.

3.4. Caracterização dos Briquetes

3.4.1. Densidade Aparente Sólida

A densidade aparente sólida dos briquetes foi determinada de forma unitária, por meio do método estereométrico, pela divisão entre a massa e o volume. A massa foi obtida por uma balança analítica de sensibilidade 0,01g, e o volume calculado considerando-se a forma cilíndrica do briquete, em que o comprimento e diâmetro foram mensurados com o auxílio de um paquímetro digital.

3.4.2. Densidade do Granel

A densidade do granel do briquete foi determinada a partir da relação da massa dos briquetes de cada tratamento e o volume de um recipiente conhecido.

3.4.3. Densidade Energética

A densidade energética do briquete foi calculada pelo produto entre o poder calorífico útil e a densidade do granel.

3.5. Análise Estatística

As caracterizações dos resíduos foram realizadas pela estatística descritiva, adotando-se delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos. Para a densidade energética foi verificada as premissas de homogeneidade de variância e distribuição normal das amostras, necessárias para o uso da estatística paramétrica (teste F), para comparação entre tratamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Caracterização do Material *In Natura*

A Tabela 2 apresenta os valores médios do teor de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e umidade do material *in natura* para cada tratamento. Os baixos coeficientes de variação obtidos indicam que o experimento foi bem controlado.

Tabela 2 – Valores médios de teores de material volátil, cinzas, carbono fixo e umidade para o material *in natura*: casca de arroz (T1), serragem de pinus (T5) e misturas (T2, T3, T4).

Tratamento	Material Volátil (%)	Cinza (%)	Carbono Fixo (%)	Umidade (%)
T1	71,50 (0,81)	12,68 (5,08)	15,82 (1,20)	9,16 (3,16)
T2	75,29 (0,32)	9,24 (1,21)	15,47 (1,60)	8,94 (1,49)
T3	78,66 (0,32)	6,16 (4,51)	15,18 (1,85)	8,60 (1,44)
T4	82,50 (0,39)	3,08 (4,26)	14,42 (2,15)	8,64 (2,38)
T5	85,78 (0,25)	0,23 (8,57)	13,98 (1,52)	8,55 (2,15)

Em que: valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação (%).

Fonte: A autoria própria.

Conforme apresentado na Tabela 3, as propriedades do material *in natura* apresentaram diferença significativa entre tratamentos na análise de variância (ANOVA), a 95% de probabilidade.

Tabela 3 – Análise de variância (ANOVA) dos teores de material volátil, cinzas, carbono fixo e umidade para o material *in natura*.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Sig.
Material Volátil	4	768,56	192,14	1570,69	2,76
Cinza	4	578,91	144,73	1385,72	2,76
Carbono Fixo	4	13,83	3,46	54,40	2,76
Umidade	4	1,38	0,35	10,33	2,87

Em que: GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrado Médio; Sig = Significância.

Fonte: A autoria própria.

Os valores obtidos na análise imediata foram próximos aos valores encontrados por Silva *et al.* (2015) para serragem de pinus, e por Vieira (2018) para casca de arroz. Os resultados apontam que a mistura de biomassas resultou em diminuição do teor de cinza em relação aos briquetes produzidos apenas com casca de arroz (T1) e aumento do teor de carbono fixo em relação aos briquetes produzidos apenas com serragem de pinus (T5). Altos teores de carbono fixo são almejados pois apresentam queima mais lenta, o que proporciona maior tempo de resistência nas câmaras de combustão (BRITO; BARRICHELO, 1982). Por outro lado, a cinza é um material indesejável nas caldeiras por causar aglomeração, incrustações e derretimento

nos componentes de combustores, o que demanda procedimentos de manutenção mais frequentes (BAXTER *et al.* 1998; GONÇALVES *et al.* 2009).

A diferença significativa no teor de cinzas entre a casca de arroz e a serragem de pinus era esperada visto que madeiras de uma forma geral apresentam valores baixos (FENGEL; WEGENER, 1989). Em culturas agrícolas, o solo é composto de areia, argila e silte, que podem ser incorporados à biomassa pós-colheita, contribuindo para a presença de compostos inorgânicos (FERNANDES, 2015). Em sua composição, a casca de arroz apresenta cerca de 18% de sílica, sofrendo variações nessa porcentagem em virtude da influência das variáveis envolvidas no plantio do arroz (BUDEMBERG, 2013; SILVA *et al.*, 2021). Durante a combustão, a matéria orgânica (lignina e celulose) é perdida, restando entre 74-97% de sílica e algumas impurezas como carbono, potássio, cálcio e sódio (TASHIMA, 2006).

A literatura relata diversas formas de aproveitamento para as cinzas da casca de arroz. Devido ao alto teor de sílica, essa cinza é adequada para uso em concreto de alto desempenho. A finura e atividade pozolânica desse material contribuem com o fechamento dos poros do concreto, além de incrementar a resistência e durabilidade mesmo quando se diminui a quantidade de cimento na mistura (PEREIRA *et al.*, 2015; ISAIA *et al.*, 2017). A cinza da casca de arroz também pode ser aplicada em cerâmicas (QUEVEDO, 2020), tintas (STRACKE *et al.*, 2018), geopolímeros (APOLONIO *et al.*, 2020), entre outros.

A Tabela 4 resume os valores de poder calorífico útil, densidade do granel e energética do material *in natura*. O poder calorífico útil foi calculado de acordo com o teor de umidade dos resíduos e alcançou valor médio para a serragem de pinus com 692,3 kcal/kg a mais que a casca de arroz. A densidade energética por sua vez, apresentou valores variando entre 0,41 a 0,94 Gcal/m³ para a casca de arroz e a serragem de pinus, respectivamente.

Tabela 4 – Valores médios de densidade do granel, poder calorífico útil e densidade energética do material *in natura*.

Tratamento	Densidade do Granel (kg/m³)	Poder Calorífico Útil (kcal/kg)	Densidade Energética (Gcal/m³)
T1	120,59 a	3385,68 a	0,41 a
T2	126,21 b	3619,50 b	0,46 b
T3	157,42 c	3845,54 c	0,61 c
T4	184,88 d	3913,81 d	0,72 d
T5	229,28 e	4077,98 e	0,94 e

Em que: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autoria própria.

A densidade do granel apresentou valores próximos aos relatados por Mayer *et al.* (2006) para a casca de arroz, e por Peng *et al.* (2013) para a serragem de pinus. Os resultados encontrados foram influenciados pela menor granulometria da serragem de pinus em relação à casca de arroz. Os resíduos foram analisados na condição em que foram gerados e portanto em diferentes granulometrias, com vistas a dispensar o reprocessamento da matéria-prima e reduzir os custos de produção. Menores partículas facilitam a união destas, diminuem os espaços vazios e proporcionam maior densidade (ERIKSSON *et al.*, 1990; KALIYAN; MOREY, 2009).

4.2. Caracterização dos Briquetes

A briquetagem nos cinco tratamentos foi bem sucedida, e os briquetes produzidos não apresentaram fissuras ou rachaduras visíveis. Contudo, os briquetes confeccionados com casca de arroz (T1, T2, T3, T4) apresentaram desprendimento de material, o que pode ser atribuído à menor superfície de contato em decorrência do tamanho das partículas e portanto, menor transferência de calor. Esta característica indica maior desgaste no transporte e menor vida útil no armazenamento. A Tabela 5 contém os valores médios das dimensões e teor de umidade dos briquetes produzidos.

Tabela 5 – Valores médios de diâmetro, comprimento, volume e teor de umidade dos briquetes produzidos.

Tratamento	Diâmetro (cm)	Comprimento (cm)	Volume (cm ³)	Umidade (%)
T1	3,28 (0,21)	4,19 (0,59)	35,35 (0,77)	8,52 (4,61)
T2	3,29 (0,30)	4,16 (0,42)	35,26 (0,47)	8,37 (2,13)
T3	3,29 (0,45)	4,15 (1,52)	35,37 (1,59)	8,38 (1,03)
T4	3,29 (0,23)	3,99 (0,90)	34,00 (0,84)	8,31 (0,91)
T5	3,35 (1,23)	3,83 (0,60)	33,77 (2,31)	8,17 (2,03)

Em que: valores entre parênteses correspondem aos coeficientes de variação (%).

Fonte: Autoria própria.

Os briquetes apresentaram média de 3,3 cm de diâmetro, 4,06 cm de comprimento e 34,75 cm³ de volume. Geralmente, briquetes de laboratório possuem dimensões menores do que os briquetes industriais, que apresentam entre 5 e 10 cm de diâmetro e de 25 a 40 cm de comprimento, podendo variar em forma e tamanho para atender aos requisitos do cliente (DIAS *et al.*, 2012).

A diminuição da umidade do briquete em relação ao material *in natura* ocorre devido ao aumento da temperatura durante o processo de briquetagem. Apesar disso, o teor de umidade obtido foi satisfatório, uma vez que a literatura recomenda para a combustão de biomassa, um teor de umidade máximo de 25%, devido a valores mais altos diminuir o calor de combustão,

a temperatura da câmara de queima e dos gases de escape (FARINHAQUE, 1981). Altos teores de umidade também afetam negativamente o poder calorífico, e consequentemente a produção de energia, neste sentido elevados valores de poder calorífico são desejáveis, pois implica em menor quantidade de material para atender a demanda energética (QUIRINO, 2002).

A Tabela 6 apresenta os valores referentes ao poder calorífico dos briquetes. O poder calorífico superior da serragem de pinus (T5) está em conformidade com a literatura e dentro do intervalo de 4.700 até 5.000 kcal/kg esperado para madeiras (QUIRINO, 2002; FURTADO *et al.*, 2010; SILVA *et al.* 2015; OLIVEIRA *et al.* 2017). O resultado encontrado para a casca de arroz (T1) está próximo do obtido por Diniz *et al.* (2004) e Quirino *et al.* (2005), que relataram valores de 3.908 kcal/kg e 3.730 kcal/kg respectivamente. A diferença entre esses resultados pode estar relacionada ao teor de cinzas da casca de arroz, que varia de acordo com as variáveis do plantio e possui influência negativa no poder calorífico.

Tabela 6 – Poder calorífico superior, inferior e útil dos briquetes.

Tratamento	Poder Calorífico (kcal/kg)		
	Superior	Inferior	Útil
T1	4116,0	3787,7	3414,03 a
T2	4361,0	4033,8	3645,75 b
T3	4590,0	4263,8	3856,26 c
T4	4665,5	4340,4	3929,93 d
T5	4839,5	4515,5	4097,43 e

Em que: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autoria própria.

Para os briquetes, foi considerado o mesmo poder calorífico superior do material *in natura*, uma vez que o processo de briquetagem é físico e, portanto, não ocorrem grandes alterações na composição química da matéria-prima (ALMEIDA *et al.*, 2015). Consequentemente, obteve-se também o mesmo valor de poder calorífico inferior. O poder calorífico útil dos briquetes por sua vez, apresentou valores mais altos em relação ao material *in natura* devido ao menor teor de umidade.

Conforme os dados apresentados na Tabela 7, a densidade aparente apresentou valores superiores a 1200 kg/m³ em todos os tratamentos. A densidade do granel por sua vez, variou em torno de 400 kg/m³. Segundo Dias *et al.* (2012), a densidade do granel dos briquetes dificilmente excede 500 kg/m³, mas ainda é significativamente maior que a densidade do granel da biomassa não adensada. Essa é uma propriedade muito importante pois determina o espaço útil a ser ocupado pelos briquetes no transporte e armazenamento. Além disso, de acordo com

Quirino e Brito (1991), propriedades como poder calorífico, teor de carbono fixo e teor de cinza, não são significativos individualmente para descrever a qualidade do briquete em comparação com a densidade do granel, pois esta apresenta maior correlação com a combustão.

Tabela 7 – Densidade aparente, do granel e energética dos briquetes.

Tratamento	Densidade (kg/m ³)		
	Aparente	Do Granel	Energética
T1	1203,39 a	402,55	1,37 a
T2	1210,65 a	403,47	1,47 b
T3	1208,84 a	403,96	1,56 c
T4	1259,12 b	405,15	1,59 d
T5	1276,58 c	405,86	1,66 e

Em que: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Autoria própria.

Os tratamentos apresentaram incrementos significativos (teste F a 95% de probabilidade) na densidade energética tanto para o material *in natura* quanto para os briquetes (Tabela 8). A densidade energética é o melhor parâmetro para comparação da eficiência energética pois representa a quantidade de energia por unidade de volume (QUIRINO, 2002).

Tabela 8 – Análise de variância (ANOVA) da densidade energética.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F	Sig.
DE material <i>in natura</i>	4	0,91	0,23	916,63	2,87
DE briquete	4	0,50	0,13	8198,23	2,58

Em que: DE = Densidade Energética; GL = Graus de Liberdade; SQ = Soma de Quadrados; QM = Quadrado Médio; Sig = Significância.

Fonte: Autoria própria.

O comportamento da densidade energética pode ser mais bem visualizado por meio da Figura 6. Para todos os tratamentos houve ganho energético, sendo que a maior porcentagem foi obtida pelos briquetes produzidos apenas com casca de arroz (T1), com aproximadamente o triplo da porcentagem obtida pelo tratamento T5 (100% serragem de pinus). Observa-se que o ganho energético foi afetado pela densidade do granel de forma inversamente proporcional conforme observado por Protásio *et al.* (2011), ou seja, quanto menor o valor de densidade do granel obtido para o material *in natura*, maior foi a taxa de aumento da densidade energética após a compactação.

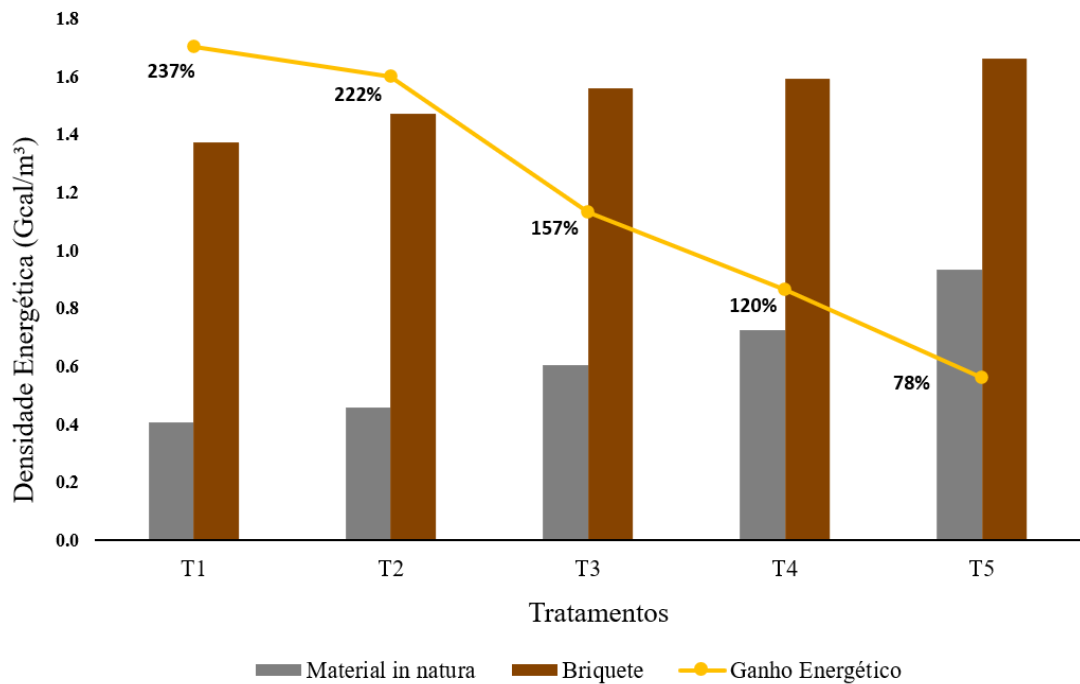


Figura 6 – Ganho energético pela compactação da biomassa.

5. CONCLUSÃO

Os resíduos apresentaram propriedades energéticas satisfatórias e foram favoráveis a briquetagem sem a adição de aglutinantes. Os resultados demonstram que a serragem de pinus apresenta potencial de utilização na mistura com a casca de arroz, melhorando os valores de material volátil, cinzas, poder calorífico e densidade dos briquetes. O ganho em densidade energética com a compactação da biomassa foi superior a 78% em todos os tratamentos, chegando a atingir 237%.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. C. F. *et al.* Qualidade energética da madeira e de briquetes produzidos a partir de *Cupressus lusitanica* Mill. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 108, p. 1003-1011, 2015.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3ed. Brasília, 2008.
- APOLONIO, P. H. *et al.* Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. **Cerâmica**, v. 66, p. 172-178, 2020.
- ARMESTO, L. *et al.* Combustion behaviour of rice husk in a bubbling fluidised bed. **Biomass and Bioenergy**, v. 23, n. 3, p. 171-179, 2002.
- BAXTER, L. L. *et al.* The behavior of inorganic material in biomass-fired power boilers: field and laboratory experiences. **Fuel processing technology**, v. 54, n. 1-3, p. 47-78, 1998.
- BEZERRA, Filomena Nádia Rodrigues. **Sustentabilidade da matriz energética brasileira**. 2016. Dissertação (Mestrado em Economia Rural) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- BRAND, M. A. *et al.* Influência da Pressão e Material nas Propriedades de Briquetes de Biomassa Florestal. **Congresso Brasileiro sobre Florestas Energéticas**, 2009.
- BRAND, M. A. *et al.* Recovery of agricultural and wood wastes: the effect of biomass blends on the quality of pellets. **Fuel**, v. 284, 2021.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n.16, p.63-70, 1978.
- BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos técnicos da utilização o da madeira e carvão vegetal como combustíveis. **Seminário de abastecimento energético industrial com recursos florestais**, p. 101-137, 1982.
- BUDEMBERG, Eduardo Roque. **Caracterização da sílica amorfa extraída da casca de arroz obtida por pré-hidrólise ácida e calcinação, e sua aplicação em borracha de estireno-butadieno (SBR)**. 2013. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- CALEGARI, L. *et al.* Características de algumas biomassas usadas na geração de energia no Sul do Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, p. 37-46, 2005.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/graos/boletim-da-safra-de-graos>. Acesso em: 30 out. 2022.
- DEPI – Deutsches Pelletinstitut GmbH. Handbook for the ENplus quality certification of wood briquettes. Berlin, 2021. Disponível em: <https://enplus-briketts.de/p/Handbook-for-the-ENplus-Quality-Certification-of-Wood-Briquettes-eXbq71qgXqPDAawoy1RpX9>. Acesso em 31 ago. 2022.

DIAS, J. M. C. S. *et al.* Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. **Embrapa Agroenergia**, v. 13, n. 1, p. 130, 2012.

DINIZ, Juraci. **Conversão térmica de casca de arroz à baixa temperatura: produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente**. 2005. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

DINIZ, J. *et al.* Poder calorífico da casca de arroz, caroço de pêssego, serragem de eucalipto e de seus produtos de pirólise. **Ciência e Natura**, v. 26, n. 2, p. 25-32, 2004.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional (BEN) 2022: Ano base 2021. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 01 dez. 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Inventário Energético de Resíduos Rurais. Rio de Janeiro, 2014.

ERIKSSON, S. *et al.* The briquetting of agricultural wastes for fuel. **FAOSTAT**, 1990.

FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: https://www.fao.org/faostat/en/#rankings/countries_by_commodity. Acesso em: 19 de mar. 2022.

FARINHAQUE, R. Influência da umidade no poder calorífico da madeira de bracatinga (*Mimosa scrobella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. **FUPEF**, v. 6, p. 14, 1981.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. **Walter de Gruyter**, p. 613, 1989.

FERNANDES, Patrícia Isabel Caramona. **Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoeletricas**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015.

FERREIRA, I. T. *et al.* Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, n. 4, 2014.

FERREIRA, J. C. *et al.* Qualificação da biomassa em povoamentos florestais de *Pinus taeda*. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269–276, 2016.

FREITAS, A. J. *et al.* Efeito da pressão e do tempo de compactação nas propriedades de briquetes de resíduos madeireiros de paricá. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 380-385, 2016.

FURTADO, T. S. *et al.* Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101–106, 2010.

GONÇALVES, José E. *et al.* Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 657-661, 2009.

GONÇALVES, José Evaristo. **Avaliação Energética e Ambiental de Briquetes Produzidos com Rejeitos Sólidos Urbanos e Madeira de *Eucalyptus grandis***. 2010. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010.

GUIMARÃES, C. O. *et al.* Obtenção de bio-óleo a partir da casca de arroz. **Revista Da Universidade Vale Do Rio Verde**, v. 12, n. 2, p. 159–166, 2014.

IBA – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>. Acesso em 01 de dez. 2022.

IBDF – Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Floresta. Madeiras da Amazônia - Características e Utilização. Vol. II - Estação Experimental de Curuá-Una. Brasília, 1988.

ISAIA, G. C. *et al.* Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural (parte II): durabilidade. **Ambiente Construído**, v. 17, p. 233-252, 2017.

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

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Embrapa Florestas - Comunicado Técnico**, v. 260, 2010.

MACÊDO, Lucélia Alves de. **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

MAYER, F. D. *et al.* Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz. **Simpósio de Engenharia de Produção da UNESP**, v. 13, 2006.

NAKASHIMA, G. T. *et al.* Aproveitamento de resíduos vegetais para a produção de briquetes. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, n. 34, p. 22-29, 2014.

OLIVEIRA, L. H. *et al.* Aproveitamento de resíduos madeiros de *Pinus sp.* com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

ORELLANA, Bruna Bárbara Maciel Amoras. **Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

PAULA, L. E. R. *et al.* Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 103-112, 2011.

PENG, J. H. *et al.* Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v. 111, p. 411-421, 2013.

PEREIRA, A. M. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do concreto com adição de cinza de casca de arroz. **Matéria**, v. 20, p. 227-238, 2015.

PROTÁSIO, T. P. *et al.* Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.

QUEVEDO, Juliana Calage. **Estudo das propriedades mecânicas e termomecânicas de cerâmicas refratárias derivadas da cinza da casca de arroz e alumina calcinada**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2020.

QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. **Laboratório de Produtos Florestais Série Técnica**, n.13, p.19, 1991.

QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. **IBAMA**, 2002.

QUIRINO, W. F. *et al.* Poder Calorífico Da Madeira E De Materiais Ligno-Celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100–106, 2005.

QUIRINO, W. F. *et al.* Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira X Ray densitometry for waste wood briquetts analysis. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525–536, 2012.

RODRIGUES, Thiago Oliveira. **Efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

SILVA, D. A. *et al.* Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015.

SILVA, E. J. *et al.* Influência das variáveis envolvidas no plantio de arroz nas características da cinza de casca de arroz. **Ambiente Construído**, v. 9, p. 67-82, 2021.

SILVA, Maria Teresa Cândido. **Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO2 resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de cogeração**. 2009. Dissertação (Mestrado em Bionergia) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

SOARES, R. V.; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de debastes em plantações de Pinus taeda no estado do Paraná, Brasil. **Revista Floresta**, v. 17, n. 12, p. 73–94, 1987.

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

SOUZA, G. H. R. *et al.* O mercado potencial do uso de briquetes no Brasil. **Simpósio de Tecnologia da Fatec Taquaritinga**, v. 4, n. 1, p. 10, 2018.

STRACKE, M. P. *et al.* Caracterização, tratamento e utilização da cinza da casca de arroz na produção de tinta. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 1, p. 324-334, 2018.

TASHIMA, Mauro Mitsuuchi. **Cinza de casaca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento**

Portland. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2006.

VASSILEV, S. V. *et al.* An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913–933, 2010.

VIEIRA, A. C. *et al.* Caracterização da casca de arroz para geração de energia. **Varia Scientia Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 51–57, 2013.

VIEIRA, Fábio Roberto. **Estudo experimental da pirólise lenta da casca de arroz em reator de leito fixo.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.