

Otimização da produção de briquetes de biomassa: influência de tempo e pressão na compactação, na estabilidade dimensional e no potencial energético sustentável

Fernanda Hillary Duarte dos Santos^[1], Edgar José de Sousa Lopes^[2], Rodrigo Moraes Miranda^[3], Carolina Araújo Figueiredo^{[4]*}, Félix Lélis da Silva^[5], Geanilson Brito da Silva^[6]

^[1] fhillary7@gmail.com, ^[2] edgarlopesea@gmail.com, ^[5] felix.lelis@ifpa.edu.br, ^[6] geanilson.silva@ifpa.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA), Castanhal, Pará, Brasil.

^[3] rodrigo.miranda@itec.ufpa.br, ^[4] carolina.figueiredo@itec.ufpa.br. Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Pará, Brasil.

* autor correspondente

Resumo

Os combustíveis fósseis, embora dominantes na matriz energética, causam impactos ambientais significativos. Como alternativa sustentável, este trabalho avaliou a produção de briquetes a partir de bagaço de cana, visando otimizar seu rendimento de expansão. O material, coletado na Feira do Agricultor de Castanhal-PA, foi processado (triturado, seco, moído) e prensado em prensa hidráulica, com medições da expansão longitudinal (altura e diâmetro) em intervalos de 0 a 48 horas, mediante análise dos efeitos da pressão e tempo sobre a análise. Utilizou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com 4 pontos fatoriais, 4 axiais e 3 centrais. A seguir, determinou-se a umidade por infravermelho; teor de cinzas em forno mufla a 525 °C por 4 horas; material volátil a 950 °C em forno mufla; e carbono fixo pela diferença entre as porcentagens de umidade, cinzas e material volátil. Como resultado, a altura dos briquetes apresentou explicabilidade de 91,12%, sendo influenciada positivamente pelo tempo (5,50 min) e pressão (21,24 tf), com máximos locais indicados pelos termos quadráticos negativos, sugerindo ótimo em níveis intermediários. O diâmetro teve menor explicabilidade (40,49%), sendo mais sensível ao tempo (0,405) que à pressão (0,013), com interação negativa (-0,063) mostrando que aumento simultâneo não é vantajoso. Efeitos quadráticos confirmam máximos locais, indicando que tempos e pressões extremas reduzem a compactação. Assim, condições moderadas promovem estabilidade estrutural e maior eficiência energética dos briquetes. Os resultados demonstram que os briquetes produzidos são tecnicamente viáveis para substituir combustíveis fósseis ou lenhosos em processos industriais, aliando eficiência energética a benefícios ambientais.

Palavras-chave: bioenergia; briquetagem; cana-de-açúcar; resíduo; sustentabilidade.

Optimization of biomass briquette production: influence of time and pressure on compaction, dimensional stability, and sustainable energy potential

Abstract

Fossil fuels, although dominant in the energy matrix, cause significant environmental impacts. As a sustainable alternative, this study evaluated the production of briquettes from sugarcane bagasse, aiming to optimize its yield by analyzing the effects of pressure and pressing time on longitudinal expansion (height and diameter). The material, collected at the Farmers' Market in Castanhal-PA, was processed (crushed, dried, ground) and pressed in a hydraulic press, with expansion measurements at intervals of 1 to 48 hours. A Central Composite Rotational Design (CCRD) with 4 factorial points, 4 axial and 3 central, was used. Next, moisture content was determined by infrared; ash content in a muffle furnace at 525 °C for 4 hours; volatile matter at 950 °C in a muffle furnace; and fixed carbon by the difference between the percentages of moisture, ash and volatile matter. As a result, the height of the briquettes showed an explainability of 91.12%, being positively influenced by time (5.50 min) and pressure (21.24 tf), with local maxima indicated by negative quadratic terms, suggesting optimum at intermediate levels. The diameter had lower explainability (40.49%), being more sensitive to time (0.405) than to pressure (0.013), with a negative interaction (-0.063) showing that simultaneous

increase is not advantageous. Quadratic effects confirm local maxima, indicating that extreme times and pressures reduce compaction. Thus, moderate conditions promote structural stability and greater energy efficiency of the briquettes. The results demonstrate that the briquettes produced are technically viable to replace fossil or wood fuels in industrial processes, combining energy efficiency with environmental benefits.

Keywords: bioenergy; briquetting; residue; sugar cane; sustainability.

1 Introdução

A principal fonte de energia mundial ainda provém de combustíveis fósseis, que geram poluentes e gases de efeito estufa (Ferreira; Furtado, 2024). Paralelamente, resíduos orgânicos das atividades industrial e agrícola são subutilizados e agravam a poluição (Zargo; Barros, 2019). Esse cenário é identificado pela ausência de sistemas adequados de tratamento ou reaproveitamento desses resíduos, situação comum à do setor agrícola, particularmente nas feiras livres, onde a geração de resíduos orgânicos é elevada e pouco aproveitada (Torres; Lange, 2022).

Com o objetivo de reduzir os impactos ambientais e promover o reaproveitamento de resíduos orgânicos, surgem os briquetes, como estratégias voltadas à reutilização de resíduos industriais. Essa prática possibilita a geração de um combustível sólido eficiente, por meio do aproveitamento de diferentes tipos de biomassa (Smith *et al.*, 2019).

Com o crescimento do mercado energético sustentável, a procura por resíduos eficientes para a briquetagem é grande, o bagaço da cana-de-açúcar apresenta grande potencial energético, tanto para fins industriais quanto para domésticos (Silva; Mantese; Florian, 2023). Além de ser considerado como o maior resíduo da agroindústria brasileira, grande parte do bagaço pode ser utilizado para geração de energia (Vaz Junior, 2020). A princípio, qualquer biomassa vegetal pode ser utilizada na produção de briquetes, no caso do bagaço, ele apresenta um valor energético maior do que o próprio etanol e, por isto, tem ótimo potencial para ser utilizado na geração de energia (ANEEL, 2024).

A briquetagem transforma resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar (24% a 30% do peso da cana) em combustível sólido de alta densidade energética, formato uniforme e fácil armazenamento (Vaz Junior, 2020). Esse resíduo tem potencial para gerar 60-160 kWh/tonelada, e economicamente, o bagaço apresenta viabilidade comprovada, gerando 76 kWh/tonelada de cana. Considerando a tarifa média de R\$ 307,29/MWh (ANEEL, 2024), obtém-se receita de R\$ 23,35/tonelada com a venda da energia excedente em cima de uma geração média de 76 kWh/tonelada (Carvalho-Gonçalves, 2021).

O bagaço de cana responde por 77% da energia de biomassa no Brasil (COGEN, 2025), alinhando-se à economia circular (Grotto *et al.*, 2021) e as ODS 7 (Energias renováveis e acessíveis), 8 (Trabalho decente e crescimento econômico) e 12 (Consumo e produção responsáveis) (Silva *et al.*, 2021). Por fim, a adoção de briquetes de resíduos promovem vantagens competitivas para o setor sucroenergético (Grotto *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a briquetagem emerge como uma tecnologia promissora para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, transformando-os em combustíveis sólidos de alto valor energético. O bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, apresenta potencial energético superior ao do etanol, tornando-se uma alternativa viável para a geração de energia térmica e elétrica (Souza *et al.*, 2022). A briquetagem não apenas proporciona uma forma eficiente de utilização desse resíduo, mas também contribui para a redução de impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado.

A viabilidade econômica da briquetagem de bagaço de cana-de-açúcar também é significativa. A geração de bioeletricidade a partir desse resíduo representa uma parcela considerável da matriz energética brasileira, com o bagaço e a palha da cana-de-açúcar respondendo por cerca de 75% da produção de bioeletricidade em 2023 (Nunes *et al.*, 2019). Além disso, a comercialização da energia excedente gerada a partir dos briquetes pode representar uma fonte adicional de receita para os produtores rurais, contribuindo para a sustentabilidade econômica do setor (Costa *et al.*, 2019).

Do ponto de vista experimental, a utilização de um método estatístico, como o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) permite mapear relações não lineares entre as variáveis críticas do processo como pressão e tempo de prensagem. Essa abordagem estatística identifica com precisão como essas variáveis influenciam a expansão longitudinal (altura e diâmetro) dos briquetes, revelando termos quadráticos que modelos lineares convencionais não detectariam. O DCCR não apenas otimiza a combinação ideal de pressão-tempo para maximizar a densidade energética, mas também reduziu custos operacionais ao minimizar tentativas empíricas. Essa eficiência é crucial para aplicações industriais, onde a reprodutibilidade e o aproveitamento máximo de resíduos, como o bagaço de cana, são prioritários para sua modelagem (Oshiro, 2016).

Dessa forma, os seguintes questionamentos foram levantados: 1) Qual o efeito da pressão e do tempo de prensagem sobre a expansão longitudinal em termos de mudança de compactação quanto à altura dos briquetes, 2) Qual o efeito da pressão e do tempo de prensagem sobre a expansão longitudinal em termos de mudança de compactação quanto ao diâmetro dos briquetes? E 3) Através das análises físico-químicas é possível obter resultados de eficiência no briquetes?

Em síntese, a aplicação do Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) representa uma ferramenta robusta para a otimização de processos de compactação na produção de briquetes, permitindo uma análise detalhada dos efeitos e interações entre pressão e tempo de prensagem. A utilização desse método fornece bases estatísticas sólidas para o ajuste fino das variáveis operacionais, contribuindo para o desenvolvimento de briquetes com maior densidade energética, estabilidade dimensional e aproveitamento eficiente de resíduos agroindustriais. Assim, ao integrar modelagem estatística e experimentação controlada, este estudo avança na compreensão do comportamento físico dos briquetes, fornecendo subsídios científicos e tecnológicos relevantes para aprimorar a sustentabilidade e a eficiência produtiva no setor de biocombustíveis sólidos.

Em seguida, o artigo realizará o detalhamento do percurso metodológico deste estudo abrangendo desde a obtenção da biomassa até a caracterização final do produto. O delineamento experimental (seção 2) orienta as fases de preparo da matéria-prima, que incluem trituração, secagem controlada e moagem, seguidas pela etapa de compactação (prensagem). Para aferir a qualidade dos briquetes, realizou-se o monitoramento da expansão longitudinal e a análise imediata, determinando-se os parâmetros de umidade, teor de cinzas, voláteis e carbono fixo. A interpretação desses dados (seção 3) permite uma discussão robusta dos resultados, fundamentando as conclusões deste artigo (seção 4).

2 Método da pesquisa

Esta pesquisa teve caráter experimental, com análises descritivas e explicativas com foco na modelagem e otimização de processo, por meio de ajuste de superfícies de respostas, na busca de melhores combinações para a confecção dos briquetes, assim como analisar suas características físico-químicas. As análises foram realizadas no Laboratório de Físico-Química de Alimentos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA – Campus Castanhal). Os bagaços da cana-de-açúcar (~ 10kg), foram recolhidos na Feira do Agricultor (1°17'49"S e 47°55'19"W) na cidade de Castanhal-PA.

2.1 Delineamento experimental

Com o objetivo de otimizar o processo produtivo de fabricação de briquetes e determinar a combinação mais eficiente entre os parâmetros operacionais, visando ao máximo aproveitamento do resíduo e à maior eficiência energética do produto final, foi empregado o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Essa metodologia estatística permite avaliar de forma sistemática os efeitos e as interações entre as variáveis independentes (tempo e pressão de prensagem) possibilitando a identificação do binômio de prensagem mais adequado para a obtenção de briquetes com melhores propriedades físico-mecânicas e desempenho energético.

Os pontos utilizados para o desenvolvimento da metodologia foram: quatro pontos fatoriais (-1 e $+1$), quatro pontos axiais ($-\alpha$ e $+\alpha$) e três pontos centrais (0) totalizando 11 ensaios. O valor de α será calculado em função do número de variáveis independentes ($n = 2$).

Para a determinação dos valores máximos e mínimos foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre briquetagem do bagaço de cana de açúcar, onde os valores encontrados foram: para pressão 5MPa e 13MPa, mínimo e máximo, respectivamente e para o tempo em minuto, 3 e 8, sendo tempo mínimo e máximo, respectivamente, chegando aos valores expressos na Tabela 1. Como variável dependente deste planejamento experimental, foi considerada a expansão longitudinal dos briquetes.

Tabela 1 – Valores codificados e decodificados do DCCR

Variáveis independentes	Células codificadas e normais				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Pressão (tf)	15,57	17,23	21,23	25,23	26,89
Tempo (min)	1,97	3,0	5,5	8,0	9,04

Fonte: dados da pesquisa

O valor de α foi calculado em função do número de variáveis independentes ($n=2$) através da Equação 1:

$$\alpha = (2^n)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

2.1.1 Trituração dos resíduos

Após o levantamento de dados e a coleta do resíduo orgânico em feira livre, os resíduos foram direcionados para o triturador do *campus*, para reduzir o volume de forma a facilitar o processo de secagem na estufa e o ponto de compactação das partículas, segundo Pang *et al.* (2019).

2.1.2 Secagem do resíduo após a tritura

Posteriormente, com o material parcialmente triturado, ele foi seco a 60 °C por 24 horas (Gonçalves; Sartori; Leão, 2009), em estufa com circulação forçada de ar, com o intuito de reduzir a umidade da biomassa que é excessiva no processo de briquetagem, em seguida foram levados ao Laboratório de Solos do Instituto Federal do Pará – *campus* Castanhal para serem moídos em partículas menores.

2.1.3 Moagem do material

Neste procedimento, utilizou-se um moedor de facas equipado com peneira de 35 mesh. Ressalta-se que, devido à equivalência da abertura dessa peneira em relação à peneira utilizada no granulômetro, a etapa de análise granulométrica foi suprimida, visando à otimização do processo e à redução do tempo e do esforço experimental. A redução adequada do tamanho das partículas obtida nessa etapa contribui diretamente para uma melhor compactação dos briquetes, favorecendo a coesão entre as partículas e o aumento da densidade do produto final.

Nesta etapa, também foi realizado o balanço de massa (Equação 2), que deve ajustar o teor de umidade da biomassa a variar entre 10% e 15%, influenciando diretamente na resistência mecânica e na densidade energética do produto (Gonçalves; Sartori; Leão, 2009).

$$W = \frac{((f \cdot x_f) - (a \cdot x_a) + (b \cdot x_b))}{(x_w - x_p)} \quad (2)$$

Em que:

W = Massa de água adicionada.

f = Massa total inicial do material;
 x_f = Fração de Umidade do material final;
 a = Massa corrente a;
 x_a = Fração de umidade do material;
 b = Massa corrente b;
 x_b = Fração de umidade do material b;
 x_w = Umidade de saturação;

2.1.4 Prensagem

Na etapa de prensagem os briquetes foram produzidos com base nas combinações de tempo (minutos) e pressão (toneladas-força) definidas pelo delineamento experimental, utilizando 100% da matéria-prima previamente preparada. Por meio da utilização de uma prensa hidráulica e um molde cilindro de ferro com dimensões de 4 cm de diâmetro e 30 cm de altura. O molde possuía reforço em suas extremidades, composto por duas chapas esféricas, com a finalidade de manter a integridade e o formato do cilindro durante o processo de compactação.

O processo de prensagem foi conduzido em regime contínuo, utilizando-se 40 g de massa depositada em cada molde. A compactação foi realizada por meio de um cilindro de ferro com 3,8 cm de diâmetro e 15 cm de altura, garantindo a aplicação uniforme da pressão sobre todo o material. Os parâmetros de tempo e pressão foram definidos previamente por meio de um modelo estatístico, permitindo a otimização da densidade e da integridade estrutural dos briquetes. Essa abordagem assegura a uniformidade dimensional e reduz a ocorrência de microfissuras, fatores críticos para a estabilidade mecânica e o desempenho energético do combustível sólido obtido.

Após a moldagem, os briquetes foram devidamente identificados conforme as condições estabelecidas no planejamento experimental e, em seguida, acondicionados em condições controladas até a realização das análises, efetuadas em triplicata.

2.1.5 Expansão longitudinal

Após a fabricação dos briquetes, procedeu-se à análise da expansão longitudinal, seguindo a metodologia descrita por Masullo *et al.* (2018). As dimensões dos briquetes, especificamente altura e diâmetro, foram mensuradas utilizando paquímetro com precisão adequada, em intervalos de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h, 24 h e 48 h. Essa abordagem permitiu a avaliação detalhada da variação dimensional ao longo do tempo, fornecendo informações críticas sobre a estabilidade física e a integridade estrutural dos briquetes durante o período inicial pós-fabricação.

2.2 Análises físico-químicas dos briquetes

Após a etapa de fabricação, os briquetes foram submetidos a um período de estabilização de 48 horas, destinado à avaliação da expansão longitudinal. Esse intervalo é essencial para garantir a acomodação interna das partículas e a liberação de tensões residuais geradas durante o processo de prensagem. Concluída essa fase, os briquetes foram devidamente acondicionados em ambiente controlado e posteriormente encaminhados ao Laboratório de Físico-Química, onde foram realizadas análises voltadas à verificação de sua integridade energética, assegurando que as condições de compactação e secagem não tenham comprometido a estabilidade do material.

2.2.1 Umidade

Para a determinação da umidade foi coletado ~1,0 g do produto e disposto no determinador por infravermelho. O valor expresso pelo aparelho foi utilizado para obter o cálculo de balanço de massa e assim avaliar a umidade.

2.2.2 Cinzas

Para esta análise, 5,0 g da amostra de briquete em um cadinho de porcelana foram queimados em forno mufla (Zezimac 2000-F) a 525 °C por 4 horas, resfriados em dessecador até atingir a temperatura ambiente e pesados para calcular o teor de cinzas pela massa residual, segundo a Equação 3.

$$Tc = \frac{mca - mc}{ma} * 100 \quad (3)$$

Onde:

Tc : Teor de cinzas (%)

mca : massa do cadinho + amostra

mc : massa do cadinho vazio

ma : massa da amostra

2.2.3 Material volátil

Foi pesada ~1,0 g de amostra seca em um cadinho de porcelana tampado, que passou por aquecimento em forno mufla (Zezimac 2000-F) a 950 °C. O processo foi realizado em três etapas: primeiro, o cadinho foi colocado sobre a porta aberta da mufla por dois minutos (~300 °C); depois, na borda da abertura por mais três minutos (~500 °C); e, por fim, inserido completamente com a porta fechada por seis minutos. Após o aquecimento, a mufla foi desligada e aguardaram-se 15 minutos para o início do resfriamento, seguido de mais 15 minutos antes da retirada do cadinho. Este foi transferido para um dessecador até atingir a temperatura ambiente. Em seguida, realizou-se a pesagem final e o teor de material volátil foi calculado com base na Equação 4.

$$Tv = \frac{mi - mf}{mf} * 100 \quad (4)$$

Onde:

Tv : Teor de voláteis em porcentagem

mi : massa inicial da amostra (g)

mf : massa da amostra após aquecimento na mufla (g).

2.2.4 Carbono fixo

A determinação do carbono fixo é realizada por diferença, a partir dos resultados obtidos para as porcentagens de umidade, cinzas e material volátil. A porcentagem de carbono fixo corresponde à função dos fatores estudados, contribuindo para a identificação das condições operacionais mais adequadas à produção dos briquetes diferença entre 100% e a soma dessas três porcentagens. Esse cálculo é representado pela Equação 5.

$$Tcf = 100 - (Tv - Tc) \quad (5)$$

Onde:

Tcf : Teor de carbono fixo

Tv : Teor de voláteis

Tc : Teor de cinza

3 Resultados e discussões

Os resultados e discussões a seguir detalham o desempenho da biomassa processada sob diferentes condições operacionais. Inicialmente, aborda-se o delineamento experimental utilizado para otimizar os parâmetros de produção, seguido pelas análises das propriedades físico-químicas que definem a qualidade do produto final.

3.1 Delineamento do composto central rotacional

Os ensaios experimentais pelo DCCR analisaram os efeitos do tempo (X1) de prensagem (min) e da pressão (X2) em (toneladas-força) de compactação nas características físicas dos briquetes Y1 = altura e Y2 = diâmetro. A Tabela 2 apresenta os valores codificados e não codificados e usados no planejamento experimental para os 11 ensaios. Posteriormente, modelos matemáticos sugeridos pelo delineamento são ajustados para ajudar a identificar as condições operacionais ideais para a produção.

Tabela 2 – Valores codificados e decodificados

Pontos	Ensaio	Codificadas		Descodificadas	
		Tempo (X1)	Pressão (X2)	Tempo (min)	Pressão (tf)
Axial	8	-1,41	0	1,9	21,23
Fatorial	1	-1	-1	3	17,23
Fatorial	3	-1	1	3	25,23
Axial	10	0	-1,41	5,5	15,57
Central	5	0	0	5,5	21,23
Central	6	0	0	5,5	21,23
Central	7	0	0	5,5	21,23
Axial	11	0	1,41	5,5	26,89
Fatorial	4	1	-1	8	17,23
Fatorial	2	1	1	8	25,23
Axial	9	1,41	0	9,0	21,23

Fonte: dados da pesquisa

Os ensaios foram realizados de forma aleatória para reduzir o viés experimental conforme recomendado pela metodologia estatística do DCCR. Foi realizada a prensagem nos parâmetros descritos na Tabela 2, para pressão e tempo, em seguida realizada a análise de expansão longitudinal, obtendo os resultados expressos na Tabela 3, onde considerou primordialmente para o estudo os resultados do tempo de 48 horas após a prensagem, com o resultado consegue-se obter a análise de regressão e a equação quadrática. Além disso, utilizou-se o software RStudio para a elaboração e visualização gráfica dos resultados obtidos, permitindo representar de forma clara e precisa as curvas de deformação correspondentes a cada ponto experimental. O uso dessa ferramenta possibilitou a análise visual das tendências e variações nos dados, bem como a verificação da consistência dos modelos ajustados, contribuindo para uma interpretação mais robusta do comportamento mecânico dos briquetes sob diferentes condições de prensagem.

Tabela 3 – Resultado da análise de expansão

Expansão inicial (Tempo 0 h)		Expansão final (Tempo 48 h)	
Altura	Diâmetro	Altura	Diâmetro
5,5	4	6	4,2
6	4	6,8	4,3
5,7	4	6	4,3
5,9	4	6	4,1
6	4	6	4,1

6	4	6	4,1
6	4	6	4,1
5,5	4	5,8	4,1
6	4	6,4	4,4
5,5	4	5,9	4,3
5,7	4	6	4,1

Fonte: dados da pesquisa

Para a fase experimental em 0 horas para a variável altura, após o processo de fabricação dos briquetes, ajustou-se aos dados codificados uma equação preditiva (Equação 6) com 95,99% de explicabilidade para o rendimento em altura (Y_1), em relação a Tempo (X_1) e Pressão (X_2).

$$Y_1 = 6.000 + 0.176X_1 + 0.073X_2 - 0.025X_1X_2 - 0.100X_1^2 - 0.175X_2^2 \quad (6)$$

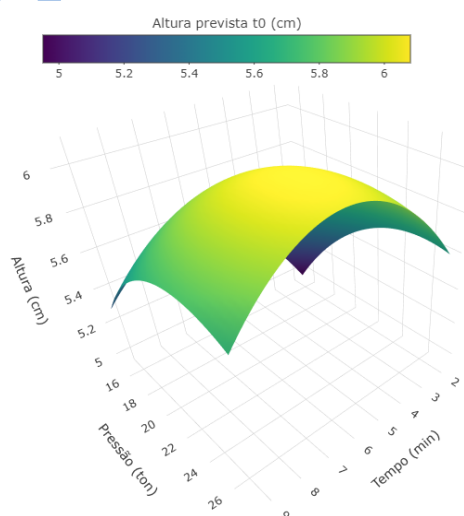
Com base nos pontos centrais e alfas obtidos, a equação de previsão de mudança de compactação para variável altura no tempo de 0 horas pós fabricação foi ajustada, conforme a Equação 7.

$$Y_1 = 6.0000 + 0.0704 * (t - 5.50) + 0.0182 * (p - 21.24) - 0.0160 \quad (7)$$

Onde, p e t são valores observados das variáveis pressão e tempo, respectivamente. Segundo Nunes *et al.* (2022), os termos quadráticos negativos (pressão² e tempo²) revelam a presença de um máximo local, com diminuição da altura após certo ponto, o que é típico de uma superfície de resposta com curvatura.

A Figura 1, representativa da Equação 6, evidencia uma superfície não plana, indicando efeitos quadráticos importantes, como demonstrados anteriormente, além de demonstrar uma região de mudança na compactação ótima e bem delimitada, confirmando os efeitos negativos dos termos quadráticos. Já as bordas da superfície mostram queda na variável altura, indicando que tanto tempos quanto pressões extremas são prejudiciais à expansão vertical imediata dos briquetes. Dessa forma, tal morfologia expressa no gráfico é típica de processos com comportamento parabólico negativo, conforme descrito por Silva, Mantese e Florian (2023) e Nunes *et al.* (2022).

Figura 1 – Morfologia 3D do comportamento da altura (Y_1) no tempo 0



Fonte: elaborada pelos autores

Para a fase experimental em 48 horas para a variável altura, após o processo de fabricação dos briquetes, ajustou-se a Equação 8 para os dados codificados, com 85,09% de explicabilidade.

$$Y_1 = 6.000 + 0.206X_1 + 0.118X_2 + 0.200X_1X_2 + 0.094X_1^2 + 0.188X_2^2 \quad (8)$$

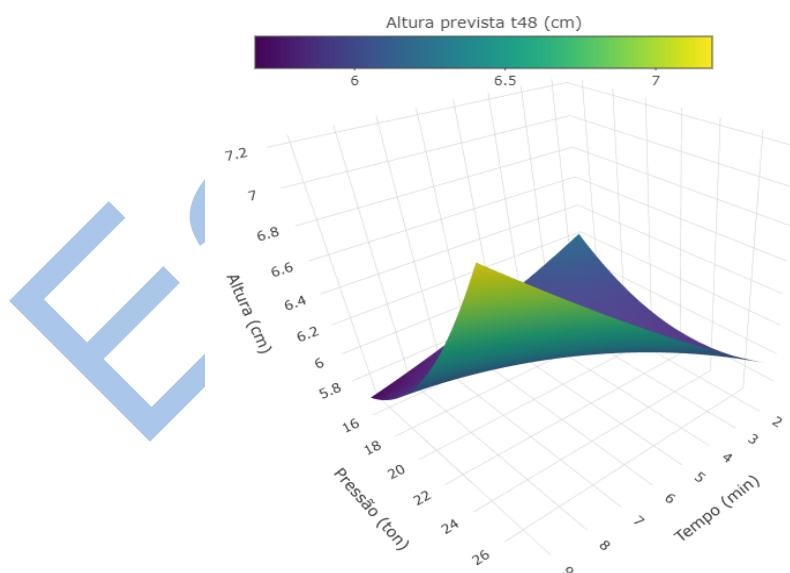
Com base nos pontos centrais e deltas obtidos, a equação de previsão da mudança de compactação para variável altura decodificada no tempo 48 horas pós fabricação foi ajustada, conforme a Equação 9.

$$Y_1 = 6.0000 + 0.0824 * (t - 5.50) + 0.0294 * (p - 21.24) - 0.0150 * (t - 5.50)^2 - 0.0050 * (p - 21.24)^2 - 0.0001 * (t - 5.50) * (p - 21.24) \quad (9)$$

Em que p e t são valores observados das variáveis pressão e tempo, respectivamente. Vale observar que os termos quadráticos seguem negativos, confirmando o comportamento de um local máximo. Cidade e Palombini (2023) falam sobre a interação negativa na compactação de resíduos lignocelulósicos, onde na equação apresentada a interação é -0,0200, sugerindo novamente uma zona ótima, onde o aumento simultâneo de tempo e pressão não é vantajoso além de determinado ponto.

A Figura 2 indica que o ponto ótimo de fabricação dos briquetes ocorre em níveis intermediários, com queda acentuada em altas pressões. A curvatura da superfície sugere que, ao longo do tempo, a pressão passa a ter maior influência nas dimensões dos briquetes. Dessa forma, visualmente, a forma côncava com um “platô” mais estreito indica uma zona de estabilidade menor do que no tempo 0h, o que pode estar relacionado a processos de relaxamento interno da biomassa pós-prensagem, como discutido por Fernandes *et al.* (2020).

Figura 2 – Morfologia 3D do comportamento da altura (Y_1) no tempo de 48 horas



Fonte: elaborada pelos autores

Para a fase experimental em 48 horas para a variável diâmetro (Y_2), após o processo de fabricação dos briquetes, ajustou-se a seguinte Equação 10 para os dados codificados, com 40,49% de explicabilidade, sugerindo que a resposta do diâmetro é mais sensível a variáveis não modeladas.

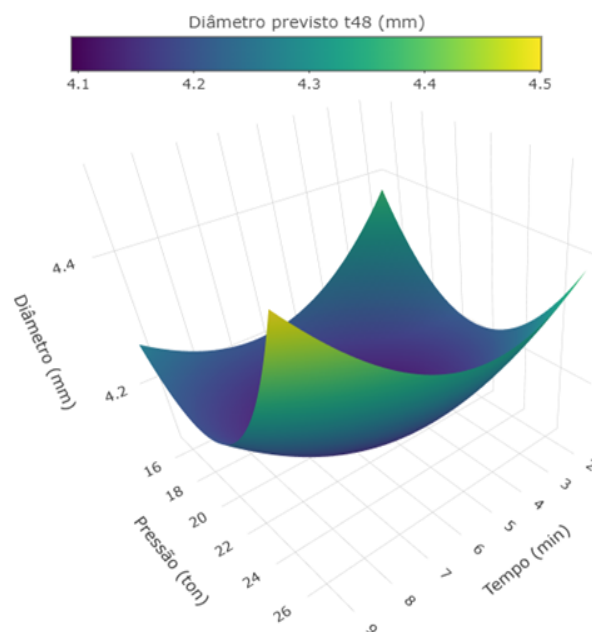
$$Y_2 = 4.100 + 0.041X_1 + 0.002X_2 + 0.025X_1X_2 + 0.075X_1^2 + 0.050X_2^2 \quad (10)$$

Com base nos pontos centrais e deltas obtidos, a equação de previsão da mudança de compactação para variável diâmetro descodificada no tempo 48 horas pós fabricação foi ajustada, conforme a Equação 11.

$$Y_2 = 4.1000 + 0.0162 * (t - 5.50) + 0.0005 * (p - 21.24) - 0.0120 \quad (11)$$

A Equação 11 e a Figura 3 indicam que o tempo exerce uma leve influência positiva (+ 0,0162), porém superior à da pressão, na variação do diâmetro dos briquetes. No entanto, a presença de termos quadráticos negativos e a ausência de um ponto de máximo claro revelam a baixa capacidade preditiva do modelo. Esse comportamento, conforme discutido por Paiva (2022), pode estar relacionado à influência de microdefeitos ou de variáveis não controladas, como umidade, tipo de biomassa e velocidade de descompressão.

Figura 3 – Morfologia 3D do comportamento do diâmetro previsto (Y_2) no tempo de 48 horas



Fonte: elaborada pelos autores

Para a fase experimental correspondente a mudança de compactação em altura dos briquetes, após o processo de fabricação, ajustou-se a Equação 12 para os dados codificados, com 91,12% de explicabilidade.

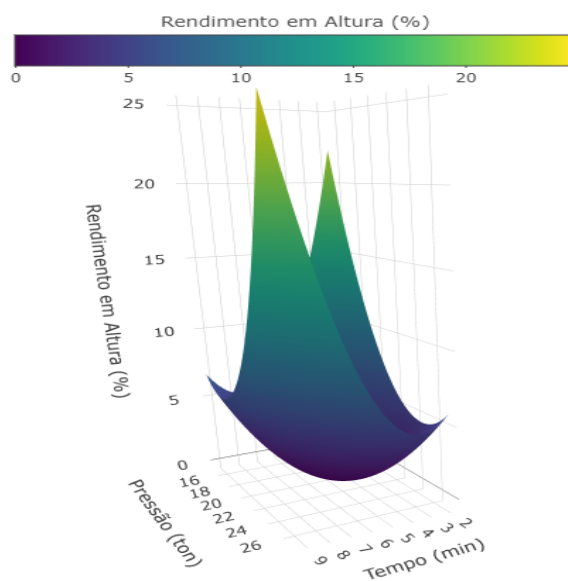
$$Y_1 = 0.0000 + 0.287X_1 + 0.571X_2 + 3.850X_1X_2 + 3.263X_1^2 + 3.263X_2^2 \quad (12)$$

Com base nos pontos centrais e deltas obtidos, a equação de previsão da mudança de compactação para variável altura decodificada foi ajustada a Equação 13.

$$Y_1 = 0.0000 + 0.1149 * (t - 5.50) + 0.1429 * (p - 21.24) - 0.5220 * (\quad) \quad (13)$$

Segundo Bomfim *et al.* (2024), o comportamento observado é típico de sistemas com efeito combinatório, onde o desempenho depende da coordenação sinérgica dos fatores. A estrutura do gráfico apresentado na Figura 4 deste modelo é classicamente parabólica e reforça o comportamento sinérgico entre os fatores, como abordado por Bomfim *et al.* (2024). Este gráfico permite, inclusive, a extração visual da região ótima operacional, sendo um excelente suporte à tomada de decisão industrial.

Figura 4 – Morfologia 3D do rendimento em altura (Y_1) dos briquetes



Fonte: elaborada pelos autores

Dessa forma, para uma análise a nível de variáveis codificadas, tem-se que os efeitos lineares em X_1 e X_2 , apresentaram efeito positivo considerável sobre o rendimento percentual em diâmetro dos briquetes, em que para ($X_1 = 0.287$), sugere-se que aumento no tempo tendem a elevar a altura do briquete em até certo ponto. Em termos do efeito linear X_2 , observa-se que a pressão possui efeito muito baixo, na ordem de ($X_2 = 0.571$) sobre o rendimento percentual do diâmetro dos briquetes. Sugerindo, que a pressão apresenta efeito expressivo no aumento da altura dos briquetes.

Quanto ao efeito da interação X_1X_2 (tempo/pressão) na ordem de 3,850, sugere que o efeito entre o tempo e a pressão aplicada ou vice e versa, indica uma sinergia relevante entre essas variáveis.

Quanto aos efeitos quadráticos $X_1^2 = 3.263$ e $X_2^2 = 3.263$, sugerem existência de curvatura acentuada, com rendimento maior próximo do centro do planejamento (tempo e pressão moderados) e redução nas bordas.

Nos efeitos lineares, a altura aumenta com o tempo (+0.1149) e com a pressão (+0.1429), embora a pressão tenha impacto ligeiramente maior. Para os efeitos quadráticos decodificados, sugere-se presença de máximos locais: após certo ponto, o aumento excessivo de tempo ou pressão reduz a altura dos briquetes. Para a interação negativa, observa-se um reforço sobre a teoria que a curvatura da superfície, sugerindo que alturas maiores estão em uma faixa intermediária de tempo e pressão. Graficamente, observa-se que não há efeito isolado puro de tempo ou pressão, mas sim um efeito conjunto ideal.

O modelo ajustado possui elevada explicabilidade, na ordem de ($R^2 = 91,12\%$) e bem ajustado, com destaque para o efeito de interação e curvatura. Neste sentido, a equação descodificada permite prever com precisão a altura dos briquetes com base no tempo (minutos) e pressão (toneladas) reais. Graficamente, por meio da superfície ajustada pode-se o pesquisador identificar a região ótima operacional.

Para a fase experimental a variável rendimento em diâmetro % (Y_2) dos briquetes, ajustou-se a seguinte Equação 14 para os dados codificados, com 40,49% de explicabilidade. Dessa forma, caracteriza-se a justificativa da explicabilidade diâmetro menor em relação a X_1 e X_2 , onde a equação demonstra valores mais sensíveis ao tempo (0,405) em relação a pressão (0,013) e possui interação negativa (-0,063) o que indica que o aumento de valores não é vantajoso para o experimento.

$$Y_2 = 2.500 + 1.013X_1 + 0.054X_2 + 0.625X_1X_2 + 1.875X_1^2 + 1.250X_2^2 \quad (14)$$

3.2 Análises físico-químicas

O resultado obtido referente a umidade conforme a Tabela 4 foi de 12,33%, valor que está dentro da faixa ideal para compactação eficiente de materiais lignocelulósicos na confecção de briquetes (Aló *et al.*, 2017; Tumuluru, 2019; Saeed *et al.*, 2021). Tal percentual é fundamental para garantir a ativação da lignina como aglutinante natural e a resistência mecânica do briquete (Kaliyan; Morey, 2009).

Tabela 4 – Resultados das análises imediatas dos briquetes (%)

Umidade	Cinzas	Material volátil	Carbono fixo
12,33 ± 2,52	0,96 ± 0,02	2,17 ± 0,26	84,54 ± 0,26

Fonte: elaborada pelos autores

A redução do teor de umidade exerce influência direta sobre a contração volumétrica do bagaço, uma vez que a diminuição dos espaços vazios internos favorece a compactação e a acomodação do material na matriz do briquete (Silva; Lima, 2020).

Ademais, a diminuição da umidade residual resulta em substancial melhora na capacidade de combustão, pois eleva significativamente a eficiência do poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar (Silva *et al.*, 2015). Tal característica é fundamental para aplicações energéticas, nas quais a densidade energética e a estabilidade da queima são parâmetros críticos de desempenho (Silva; Lima, 2020).

O teor de cinzas de $0,96 \pm 0,02$ % nos briquetes indica baixo conteúdo de resíduos inorgânicos, favorecendo a eficiência da combustão e reduzindo emissões de monóxido de carbono, já que altos teores de cinzas formam camadas que limitam a reação com oxigênio, causando queima incompleta (Nganko *et al.*, 2025). Para Puri, Hu e Naterer (2024), os briquetes, por apresentarem menor teor de cinzas que a madeira (1% a 2%), demonstram melhor desempenho energético e reduzem riscos operacionais em sistemas térmicos, podendo ser considerados uma alternativa promissora e eficiente para substituição energética.

No presente estudo, os briquetes analisados apresentaram um teor de material volátil de $2,17 \pm 0,26\%$, valor consideravelmente inferior ao relatado em outras pesquisas apontadas por Nganko *et al.* (2025), onde observaram que briquetes com teores de voláteis entre 70% e 75% alcançaram taxas de combustão de 7 g/min a 9 g/min, enquanto aqueles com 18% a 20% de voláteis resultaram em taxas entre 2,9 g/min e 3,2 g/min. Em comparação, as taxas médias de queima de $5,130 \pm 0,070$ g/min e $5,830 \pm 0,077$ g/min, verificadas para briquetes de carvão e biocombustível, respectivamente, estão entre essas faixas. Assim, os briquetes analisados neste estudo, por conterem baixos teores voláteis, tendem a apresentar desempenho mais estável e previsível em sistemas de combustão, sendo adequados para uso em equipamentos que exigem queima lenta e constante.

A análise de carbono fixo indica a parte que realmente fornece energia para a combustão, ou seja, após a combustão é ele que fica quando umidade e material volátil são liberados, sendo a parte final da combustão (Liberato *et al.*, 2023). Valores de carbono alto indica queima longa e constante, alta densidade energética e menor formação de fumaça (Reis *et al.*, 2023). O briquete analisado apresentou um teor de carbono fixo de 84%, valor elevado em comparação com a maioria das biomassas não carbonizadas, indicando excelente qualidade como biocombustível sólido. Esse alto teor sugere que o briquete possui grande capacidade de manter uma combustão prolongada e estável, liberando calor de forma eficiente, o que o torna ideal para aplicações térmicas em caldeiras e fornos.

Além disso, os baixos teores de voláteis (2,17%) e cinzas (0,96%) complementam o desempenho energético positivo, reduzindo a emissão de gases e a geração de resíduos sólidos. Para fins comparativos, briquetes feitos com resíduos de madeira (*Pinus* spp.) apresentam teores de carbono fixo entre 61,7% e 68,5% (Vieira *et al.*, 2018), enquanto briquetes de palha de carnaúba apresentam cerca de 20,9% (Fernandes *et al.*, 2020). Assim, o resultado de 84% está em patamar semelhante ao de briquetes parcialmente carbonizados, o que reforça a alta eficiência térmica do material estudado.

4 Conclusão

Os resultados obtidos no DCCR, auxiliam na previsão dos níveis de mudança de compactação com base nas variáveis tempo e pressão aplicados. Observa-se que o tempo de compressão possui papel mais relevante que a pressão aplicada na estruturação do diâmetro dos briquetes produzidos na fase experimental. Graficamente e por meio das equações ajustadas (Equações 7, 9, 11 e 13), verificam-se a existência de uma zona de rendimento ótimo em níveis intermediários a altos de tempo na ordem de 9 minutos e pressão moderada aproximada na ordem de 21 tonelada-força (tf).

Já os resultados obtidos na análise físico-química, demonstram que o briquete produzido apresenta características físico-químicas altamente favoráveis para uso energético. O teor de umidade de 12,33% está dentro da faixa ideal para briquetagem, favorecendo a compactação, a estabilidade estrutural e o desempenho térmico do material. O baixo teor de cinzas (0,96%) indica elevada pureza e menor geração de resíduos sólidos durante a queima, enquanto o teor reduzido de voláteis (2,17%) sugere uma combustão mais estável e prolongada, embora com ignição mais lenta.

O destaque da análise recai sobre o elevado teor de carbono fixo (84%), o qual supera os valores normalmente encontrados em biomassas não carbonizadas e se aproxima dos níveis de briquetes parcialmente carbonizados. Esse parâmetro reflete uma alta densidade energética, com queima longa e eficiente, sendo ideal para aplicações que demandam calor contínuo e uniforme, como em caldeiras e sistemas industriais. Dessa forma, os briquetes analisados se apresentam como uma alternativa energética promissora e de alta qualidade, capazes de substituir fontes fósseis ou lenhosas convencionais com eficiência térmica e menor impacto ambiental, sua fabricação integra princípios de economia circular, agregando valor aos resíduos e incentivando o desenvolvimento de tecnologias limpas e empregos em comunidades rurais (Masullo *et al.*, 2018). A combustão dos briquetes apresenta maior eficiência térmica e menor geração de poluentes atmosféricos, preservando recursos naturais e promovendo uso responsável da biomassa (Silva *et al.*, 2022). Dessa forma, os briquetes representam não apenas uma solução energética de baixo impacto ambiental, mas também uma estratégia de sustentabilidade industrial e social.

Por fim, recomenda-se que estudos futuros sejam conduzidos com o objetivo de aprofundar a avaliação do desempenho dos briquetes, contemplando análises complementares, como determinação do poder calorífico, ensaios de resistência à quebra, testes de empilhamento e avaliação da durabilidade mecânica. Além disso, sugere-se a realização de investigações específicas para verificar se a supressão da etapa de análise granulométrica (decorrente da equivalência entre as peneiras utilizadas), pode ter influenciado na formação de microfissuras ou na instabilidade da compactação dos briquetes, de modo a assegurar a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados obtidos.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Contribuições ao artigo

SANTOS, F. H. D.: concepção do estudo; obtenção de dados. **LOPES, E. J. S.:** obtenção de dados; análise e interpretação dos dados. **MIRANDA, R. M.:** concepção do estudo; revisão final. **FIGUEIREDO, C. A.:** concepção do estudo; revisão final. **SILVA, F. L.:** análise e interpretação dos dados; suporte técnico. **SILVA, G. B.:** concepção do estudo; revisão final e supervisão. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ALÓ, L. L.; KONISHI, P. A.; BELINI, G. B.; SILVA, J. P.; MARTINS, M. P.; NAKASHIMA, G. T.; CARASCHI, J. C.; YAMAJI, F. M. Briquetes de bagaço de cana-de-açúcar e pó de lixa *Eucalyptus* spp: caracterização e equilíbrio higroscópico. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 2, p. 774-785, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170048>.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Despacho nº 3.080, de 10 de outubro de 2024. Fixa o valor do custo médio da energia e potência comercializadas pelos agentes de distribuição no Ambiente de Contratação Regulada – ACRmed em R\$ 307,29/MWh para o ano civil de 2025. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 162, n. 199, p. 83, 14 out. 2024. Disponível em:

<https://www.in.gov.br/web/dou/-/despacho-n-3.080-de-10-de-outubro-de-2024-589782432>.

Acesso em: 4 jun. 2025.

BOMFIM, A. P.; ORTOLAN, S. A.; ROMÃO JÚNIOR, J. M.; ANTUNES NETO, J. M. F.; FRACAROLLI, R. L. A aplicação de tecnologias emergentes na otimização de processos industriais: revisão bibliográfica. **Prospectus**, v. 6, n. 2, p. 440-472, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.5281/zenodo.13997778>.

CARVALHO-GONÇALVES, L. C. T. (ed.). **Introdução à tecnologia sucroalcooleira**. João Pessoa: Editora UFPB, 2021. Disponível em:

<https://www.editora.ufpb.br/press5/index.php/UFPB/catalog/book/670>. Acesso em: 4 jun. 2025.

CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L. Experimental projects with problematic materials in jewelry education. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO, 11., 2023. Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2023. p. 362-375. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/246981>. Acesso em: 8 fev. 2026.

COGEN – ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. **Evolução da Capacidade Instalada de Biomassas**. São Paulo: COGEN, 2025. Disponível em:

<https://www.cogen.com.br/cogeracao/cogeracao-no-brasil/biomassa>. Acesso em: 4 jun. 2025.

COSTA, E. V. S.; PEREIRA, M. P. C. F.; SILVA, C. M. S.; PEREIRA, B. L. C.; ROCHA, M. F. V.; CARNEIRO, A. C. O. Torrefied briquettes of sugar cane bagasse and eucalyptus. **Revista Árvore**, v. 43, n. 1, e430101, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882019000100001>.

FERNANDES, P. H. G.; NAKASHIMA, G. T.; PADILLA, E. R. D.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M. Propriedades físico-mecânicas de briquetes produzidos com palha de

cana-de-açúcar em alta temperatura. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 953-961, 2020. Disponível em: <https://rvq-sub.sbg.org.br/index.php/rvq/article/view/3353>. Acesso em: 20 jun. 2025.

FERREIRA, W.; FURTADO, A. C. Dos combustíveis fósseis às fontes renováveis de energia: uma breve revisão. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 12, e12965, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.12-305>.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. 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. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500021>.

GROTTO, C. G. L.; COSTA, A. M. F.; COLARES, C. J. G.; PEREIRA, D. H. Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **ForScience**, v. 9, n. 1, e00928, 2021. Disponível em: <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscience/article/view/928>. Acesso em: 23 fev. 2026.

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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>.

LIBERATO, L. F.; ARTHUR, M. M.; BALISTA, B. Z.; ARRUDA, N. L. F. V.; GUERRA, S. P. S. Caracterização física, química e energética de biomassas florestais e residuais para caldeiras. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, p. 404-408, 2023. DOI: <https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.080>.

MASULLO, L. S.; SANT'ANNA ALESI, L.; QUADROS, T. M. C.; SILVA, D. A.; PÁDUA, F. A.; YAMAJI, F. M. Uso de blendas contendo diferentes proporções de palha e bagaço de cana-de-açúcar para produção de briquete. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, p. 641-654, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180047>.

NGANKO, J. M.; KOFFI, E. P. M.; TOURE, A. O.; GBAHA, P.; TIOGUE, C. T.; NDIAYE, B.; BA, K.; YAO, K. B. Comparative assessment of pollutant emissions between biofuel briquettes and charcoal: implications for domestic cooking fuel selection. **Carbon Research**, v. 4, 15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44246-024-00177-2>.

NUNES, J. V. S.; NOGUEIRA, K. M. V.; DEUS, E. P.; RIOS, M. A. S. Desenvolvimento de molde para produção de briquetes em escala de bancada. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 1, e26997, 2022. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2022.v39.26997>.

NUNES, J. V. S.; NOGUEIRA, K. M. V.; MALVEIRA, J. Q.; BARTHOLOMEU, R. A.; RIOS, M. A. S. Análise da influência da pressão de compactação no poder calorífico e densidade em briquetes de bagaço de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA, 47.; SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA DA ABENGE, 2., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: ABENGE, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/60554>. Acesso em: 20 jun. 2025.

OSHIRO, T. L. **Produção e caracterização de briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/12055/3/LD_COEAM_2016_1_16.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

- PAIVA, M. V. **Tecnologia de produção de briquetes de resíduos de fruta para geração de energia**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) –Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36250/1/TecnologiaProdu%c3%a7%c3%a3oBriquetes.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.
- PANG, L.; YANG, Y.; WU, L.; WANG, F.; MENG, H. Effect of particle sizes on the physical and mechanical properties of briquettes. **Energies**, v. 12, n. 19, 3618, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12193618>.
- PURI, L.; HU, Y.; NATERER, G. Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. **Frontiers in Fuels**, v. 2, 1378361, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361>.
- REIS, G. M. F.; MARCHESAN, R.; SARAIVA, K. F.; SILVA, R. C.; COLARES, C. J. G.; MORAES, C. B.; OLIVEIRA, G. G.; MORAES, T. P. E. Qualidade energética da madeira e do carvão vegetal do fuste e galho de *Eucalyptus urophylla* aos seis anos de idade. **Observatorio de la Economía Latinoamericana**, v. 21, n. 8, p. 8735-8752, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv21n8-050>.
- SAEED, A. A. H.; HARUN, N. Y.; BILAD, M. R.; AFZAL, M. T.; PARVEZ, A. M.; ROSLAN, F. A. S.; RAHIM, S. A.; VINAYAGAM, V. D.; AFOLABI, H. K. Moisture content impact on properties of briquette produced from rice husk waste. **Sustainability**, v. 13, n. 6, 3069, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13063069>.
- SILVA, C. E. S.; BATALHA, L. A. R.; CARVALHO, A. M.; OLIVEIRA, V. B. L. G.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. C. O.; GOMES, F. J. B. Avaliação de lignina kraft e resíduos de serraria para produção de briquetes. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, e202102186, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e202102186>.
- SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; BARROS, J. L.; RÓZ, A. L.; YAMAJI, F. M. Caracterização de biomassas para a briquetagem. **Revista Floresta**, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.39700>.
- SILVA, N. C.; CONTI, C.; PADILLA, E. R. D.; CONTI, A. C. Caracterização e densificação energética de blendas de resíduos agroindustriais. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 6, p. 1251-1256, 2021. DOI: <https://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210074>.
- SILVA, R. B.; MANTESE, M. A.; FLORIAN, F. O bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia. **RECIMA21 – Revista Científica Multidisciplinar**, v. 4, n. 1, e414526, 2023. DOI: <https://doi.org/10.47820/recima21.v4i1.4526>.
- SILVA, R. N.; LIMA, F. E. Estudo do impacto do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar em sistemas de cogeração. **Revista GEAMA – Ciências Ambientais e Biotecnologia**, v. 6, n. 2, p. 25-33, 2020. Disponível em: <https://www.journals.ufpe.br/index.php/geama/article/view/3029/482483745>. Acesso em: 23 maio 2025.
- SMITH, A. K. G.; ALESI, L. S.; VARANDA, L. D.; SILVA, D. A.; SANTOS, L. R. O.; YAMAJI, F. M. Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 138-143, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>.

SOUZA, C. O.; ARANTES, M. D. C.; PINTO, J. A.; SILVA, J. G. M.; CARNEIRO, M. F.; LIMA, A. C. B.; PASSOS, R. R. Qualidade dos resíduos madeireiros de mogno-africano e eucalipto para briquetagem. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 2, p. 637-652, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509843299>.

TORRES, V. A.; LANGE, L. C. Rotas tecnológicas, desafios e potencial para valoração energética de resíduo sólido urbano por coprocessamento no Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 3-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220210221>.

TUMULURU, J. S. Effect of moisture content and hammer mill screen size on the briquetting characteristics of woody and herbaceous biomass. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 36, p. 241-251, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14356/kona.2019009>.

VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26 p. (Documentos, 31). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1126255/aproveitamento-de-residuo-s-agroindustriais-uma-abordagem-sustentavel>. Acesso em: 20 maio 2025.

VIEIRA, A. T. O.; NASCIMENTO, A. M.; ANDRADE, A. M.; DIAS JÚNIOR, A. F. Propriedades termoquímicas de briquetes produzidos com finos de carvão vegetal e resíduos de *Pinus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 119, p. 483-493, 2018. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr119/cap15.pdf>. Acesso em: 24 maio 2025.

ZARGO, V. C. P.; BARROS, R. T. V. Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 2, p. 219-228, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>.