

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO CAVACO DE MADEIRA PARA GERAÇÃO DE VAPOR NA INDÚSTRIA

Raissa Carolina Oliveira da Rosa Soares

Discente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, 2024, do Instituto Federal de Pernambuco, *campus* Cabo de Santo Agostinho.

Edilândia Farias Dantas

Professora do Instituto Federal de Pernambuco, *campus* Cabo de Santos Agostinho, Graduada em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande, Mestre e Doutora em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco.

Endereço: Rua Sebastião Jovêntino - Destilaria - Cabo de Santo Agostinho - Pernambuco - CEP: 54510-110 - Brasil - Tel: +55 (81) 3878-5801- e-mail: rcor@discente.ifpe.edu.br

RESUMO

O estudo avaliou o potencial calorífico de cavacos de madeira como fonte de energia renovável para geração de vapor em indústrias. Foram analisados três tipos de cavacos — cajueiro, eucalipto e um “*blend*” de espécies frutíferas (“rústica”) — quanto à composição química, teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico inferior. O cavaco de cajueiro destacou-se com maior teor de carbono e melhor desempenho calorífico. Os resultados revelaram que os altos teores de umidade prejudicam o desempenho energético, sugerindo a necessidade de práticas adequadas de armazenamento e secagem para aumentar a eficiência. Apesar das limitações, todas as espécies estudadas demonstraram viabilidade para uso industrial, com baixos teores de cinzas e impacto ambiental reduzido.

Palavras-chave: Biomassa, energia renovável, cajueiro, eucalipto.

ABSTRACT

The study evaluated the calorific potential of wood chips as a renewable energy source for steam generation in industries. Three types of wood chips — **cashew tree**, **eucalyptus**, and a “blend” of fruit tree species (“rustic”) — were analyzed for their chemical composition, moisture content, ash content, and lower heating value. Cashew tree chips stood out with a higher carbon content and better calorific performance. The results revealed that high moisture content negatively affects energy performance, suggesting the need for proper storage and drying practices to enhance efficiency. Despite limitations, all studied species demonstrated feasibility for industrial use, with low ash content and reduced environmental impact.

Autorizamos a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio, exclusivamente para fins de ensino e pesquisa, desde que citada a fonte, não haja modificações e não seja para fins comerciais. Este documento está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).



Keywords: Biomass, renewable energy, cashew tree, eucalyptus.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Balanço Energético Nacional (Brasil, 2014), o contexto global atual favorece significativamente a utilização de energias renováveis. Neste contexto observa-se a necessidade crescente da adoção de fontes de energia renovável por parte das indústrias para a produção de energia térmica. A biomassa, em particular, pode ser vista como uma fonte de energia promissora, tanto em termos de eficiência quanto de sustentabilidade.

De acordo com dados mais recentes do Brasil (2023), a fonte de energia predominante no Brasil ainda é proveniente do petróleo e seus derivados, que apresentam 35,1% da matriz energética. Em contrapartida a lenha e o carvão vegetal, que são o foco deste estudo, representam apenas 8,6% da matriz energética, demonstrando assim que se existe uma importância quanto o estudo sobre o potencial energético da biomassa, a fim de fazer com que o uso desta fonte de energia traga uma matriz energética brasileira mais diversificada e sustentável.

Conforme Nascimento e Biaggioni (2010), os resíduos de madeira tomam uma trajetória totalmente diferente na atualidade, pois uma vez que esses resíduos são utilizados como fonte energética, não trazem só exemplos de fonte de energias a serem adotados, mas também uma manutenção ao meio ambiente. São existentes a melhoria de diversos aspectos quanto ao uso do cavaco como fonte de energia, incluindo a redução da emissão de gases de efeito estufa, a busca pela sustentabilidade dos recursos florestais e o aproveitamento de resíduos da indústria madeireira. O aproveitamento desse tipo de energia pode se mostrar uma alternativa de alto custo-benefício em termos de eficiência e aproveitamento energético, podendo apresentar grande viabilidade econômica.

Além disso, conforme Ucella-Filho *et al.*(2022) A performance calorífica do cavaco de madeira dependerá de suas características. Os autores destacam que para fins energéticos, os cavacos devem possuir características que favoreçam sua eficiência, como uma maior área de superfície, uniformidade e maior capacidade de perda de umidade em comparação com a madeira em tora. É recomendada a utilização de materiais com alta densidade básica, maior concentração de lignina, carbono fixo e

poder calorífico, além de baixa umidade e baixos níveis de cinzas, pois essas propriedades resultam em melhor desempenho energético. Desta forma, é fundamental o estudo prévio do potencial calorífico do cavaco, permitindo mensurar a eficiência energética antes de sua aplicação em qualquer tipo de biomassa.

O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial calorífico do cavaco de madeira como fonte de energia renovável para geração de vapor em uma indústria de alimentos, verificando sua viabilidade técnica. Além disso, propor melhorias ou adaptações no processo de queima, com base nos resultados obtidos, visando aumentar a eficiência no uso da biomassa.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Matriz Energética e Sua Importância

De acordo com o Instituto de Defesa de Consumidores (Entenda [...], 2024), A matriz energética corresponde a todos os tipos de fontes de energia utilizadas por um país ou região, sendo elas não renováveis ou renováveis, com processos de obtenção distintos, onde algumas podem apresentar maiores impactos ambientais do que outras. Uma matriz energética mal planejada pode trazer danos ao bolso do consumidor, prejudicar o crescimento econômico de um país, assim como causar vários impactos ambientais.

Um debate a ser levantado é sobre a diferença entre matriz energética e elétrica, onde a primeira se trata dos tipos de fontes utilizados para gerar energia para as mais diversas atividades, sejam elas rotineiras ou até em processo industriais. A matriz elétrica está relacionada com a obtenção de eletricidade a partir de fontes específicas (Entenda [...], 2024).

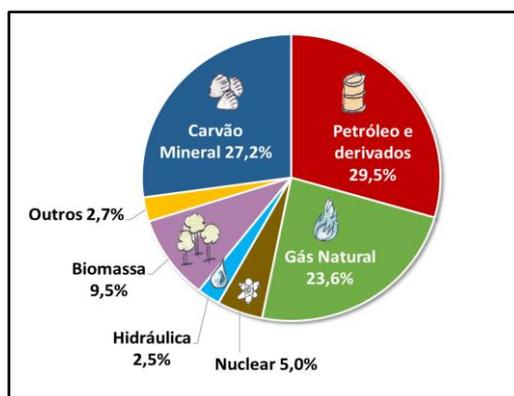
A importância da matriz energética está relacionada a necessidade de se obter a sua alta diversidade, assim garantindo fontes de energias suficientemente produtivas e sustentáveis, pois sabe-se que a dependência de uma única fonte de energia pode causar problemas de abastecimento, além do aumento da demanda de derivados de petróleo, causando alta em seus preços no mercado. No entanto, uma nação deve sempre optar por fontes renováveis em maior quantidade, pois estas causam menor emissão de gases de efeito estufa. (Silva, 2024).

2.1.1 Matriz Energética Mundial e Brasileira

A matriz energética mundial é composta por fontes de energia renováveis e não renováveis, sendo as fontes não renováveis, o petróleo, gás natural e o carvão mineral. Essas fontes sofreram reduções em seu uso, porém as fontes de energia renováveis adotadas, não conseguem desempenhar papéis cruciais na produção de energia como as não renováveis. As energias renováveis como hidrelétricas, energia solar, eólica, biomassa e geotérmica, estão sendo utilizadas em maior percentual na atualidade, porém as não renováveis dominam a matriz energética em termos de usabilidade (Souza, 2024).

Em termos de nacionalidade dos países, a China apresenta uma crescente na utilização de fontes renováveis, como solar e eólica, apesar de ter sua matriz energética ser dominada pelo carvão. Os Estados Unidos apresenta uma matriz energética mais diversificada, porém com predominância na produção de gás natural e petróleo. Em países da União Europeia, a matriz, também é diversificada, porém existe uma maior adoção de fontes de energia renováveis, principalmente eólica e solar (Souza, 2024). Na figura 1, é possível visualizar a matriz energética mundial referente ao ano de 2023. De acordo com a figura 1, as fontes de energia mais utilizadas são a de petróleo e seus derivados com 29,5% e a de carvão mineral com 27,2%.

Figura 1: Matriz Energética Mundial 2023



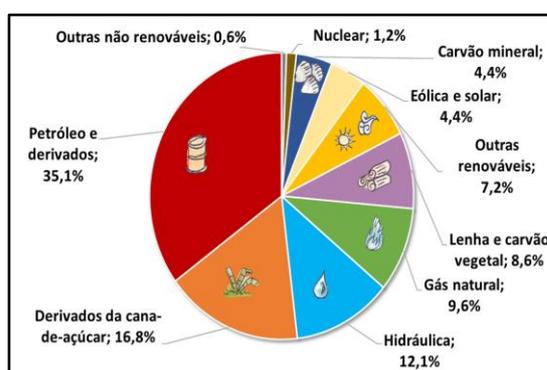
Fonte: Brasil (2023)

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), no Brasil, a matriz energética é predominante em fontes não renováveis apresentando cerca de

50,9%. Em contrapartida, utilizamos mais fontes renováveis que o resto do mundo, representado por 49,1% da matriz energética. Se dividirmos o que é emitido de gases de efeito estufa por habitantes no Brasil, será possível visualizar uma emissão menor que a maioria dos países do mundo.

A problemática que cerca a matriz energética brasileira, é a pouca diversificação das fontes de energia, que podem causar sobrecarga no serviço de fornecimento e resultar em uma má qualidade. A figura 2 (Brasil, 2024) dispõe um gráfico com os percentuais de cada tipo de fonte energética e sua atuação dentro da matriz energética brasileira. As mais utilizadas são a de petróleo e seus derivados com 35,1%, seguida de derivados de cana-de-açúcar com 16,8%.

Figura 2: Matriz Energética Brasileira 2023



Fonte: Brasil (2023)

2.1.3 Matriz Energética no Nordeste

O Nordeste brasileiro tem se destacado no ramo das energias renováveis, em especial na produção de energia eólica e solar. Essas tecnologias não dependem da ocorrência de chuvas, um fenômeno escasso em algumas regiões do nordeste. Por isso, são alternativas eficazes mesmo em períodos de seca (Fortes, 2024). A região nordeste também se destaca por ventos constantes e intensa radiação solar, fenômenos esses que favorecem a expansão dessas fontes de energia.

Na caatinga, bioma típico do sertão nordestino, uma prática energética comum é a utilização da lenha proveniente dessa vegetação como fonte de energia, sendo elas para uso doméstico ou industrial (Silva *et al.*, 2008). Nesta região, não ocorre a quantificação do que se é extraído desse bioma, sendo um problema ambiental não somente da região, mas também de todo nordeste. As estimativas de disponibilidade

e potencial de biomassa são praticamente imensuráveis, pois em grande parte a extração desse recurso não é realizada de maneira ambientalmente adequada (Junior, 2013). Embora as fontes renováveis sejam predominantes, o nordeste utiliza fontes como hidrelétricas e termelétricas, em proporções menores.

2.2 Potencial Energético da Biomassa Florestal

A biomassa pode ser definida como matéria orgânica, podendo ser de origem vegetal ou animal, capaz de fornecer energia (Saidur *et al.* 2011). A biomassa de origem florestal pode ser compreendida como sendo uma mistura de polímeros naturais, como a celulose, lignina, extrativos e cinzas, que fazem parte da estrutura da parede celular das plantas (Cortez; Lora; Gómez, 2008). Para a escolha de uma biomassa florestal de qualidade, especialmente os cavacos de madeira, recomenda-se materiais com maior concentração de lignina, carbono fixo e poder calorífico, como também baixa umidade e níveis de cinzas, pois essas características configuram um maior potencial energético (Ucella-Filho *et al.*, 2022).

Estudos conferem que o teor de umidade afeta diretamente a energia liberada pela madeira, visto que ocorre uma demanda de calor maior para a o material alcançar sua combustão, além disso, maior umidade também configura uma maior emissão de CO_2 , assim também aumentando o teor de cinzas. O teor de cinzas interfere no poder calorífico, o diminuindo, isto porque, este parâmetro pode estar relacionado com a quantidade de impurezas presentes no material (Bianchini, 2020).

Em alguns processos industriais, a secagem da biomassa pode ser necessária por meio de sistemas artificiais, visto que sua umidade é algo que depende do seu acondicionamento, além de que seu nível de particulado também irá interferir, já que estudos constatam que cavacos de madeira menores podem se tornar menos adequados para geração de energias por apresentar maiores teores de umidade (Bianchini, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido utilizando amostras de cavaco, que servem como fonte energética para caldeiras empregadas na indústria. Os cavacos são provenientes de diferentes espécies arbóreas: cajueiro (*Anacardium occidentale*),

eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill.*) e uma mistura denominada “rústica”, composta por um *blend* de árvores frutíferas, como mangueira (*Mangifera indica*) e aceroleira (*Malpighia emarginata*).

Figura 3. Tipos de cavacos de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O Autor (2024)

Para representação amostral, as análises foram realizadas com base em 3 tipos de cavaco, sendo 10 de cada espécie estudada: cajueiro (*Anacardium occidentale*), eucalipto (*Eucalyptus globulus Labill.*) e o *blend* denominado “rústica”, totalizando 30 amostras.

Para avaliar a eficiência energética da biomassa usada na caldeira, foram analisados os parâmetros químicos e físicos. Os parâmetros analisados foram a determinação da composição química, teor de umidade e o poder calorífico inferior. Além disso, optou-se pela realização de análises de cinzas, com o objetivo de estimar o resíduo pós incineração.

3.1. Avaliação da Composição Química do Cavaco

Para determinação da composição química dos diferentes cavacos, foi realizada uma revisão bibliográfica direcionada para os cavacos usados neste estudo. Essas informações são fundamentais para o cálculo do poder calorífico inferior, parâmetro essencial para estimativa da eficiência energética das amostras.

Para os cavacos de cajueiro, foram utilizados dados de um estudo específico que caracterizou a composição química desta espécie, determinando os teores de

carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio com base em ensaios padronizados pela *American Society for Testing and Materials*. Os métodos empregados foram: ASTM D 5373-02, para determinação de carbono, nitrogênio e hidrogênio; ASTM D 4239-04 para enxofre; e ASTM D 3176-89 para oxigênio. Os resultados médios indicaram 50,47% de teor de carbono, 6,42% de hidrogênio, 0,27% de nitrogênio, 0,02% de enxofre e 44,24 % de oxigênio (Dantas, 2018).

Para os cavacos de eucalipto, utilizaram-se dados médios genéricos da composição química desta espécie. Estes valores, obtidos na literatura, correspondem a 48% de carbono, 5,5 % de hidrogênio, 0,28% de nitrogênio, 0,07% de enxofre e 40% de oxigênio (Foelkel, 2015).

No caso dos cavacos tipos rústicas, por se tratar de um *blend* composto por diversas espécies de árvores frutíferas, foram considerados valores genéricos para biomassa florestal. Os teores médios utilizados foram 49,5% de carbono, 6% de hidrogênio, 0,6% de nitrogênio e 44,5% de oxigênio (Klock, 2013). Adotou-se um valor de 0,1% para o teor de enxofre, com base em estudos de Machado *et al.* (2016), que indicam que esse percentual é considerado adequado, uma vez que o enxofre presente na biomassa florestal normalmente se encontra em concentrações inferiores a 0,1.

Tornou-se necessário também a busca por valores dos percentuais de lignina das espécies citadas no estudo, para que se fosse possível realizar uma comparação da composição química das espécies, pois altos teores de lignina contribuem para o poder calorífico da biomassa, assim como os teores dos outros compostos químicos, como carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre (Araújo *et. al*, 2018). De acordo com Montenegro, Lima e Parente (2010), os valores de lignina presentes na espécie de cajueiro apresentaram o valor de 20,46 %, obtidos através de ensaios laboratoriais, utilizando o método de análise descrito da norma TAPPI 250 UM (Acid-Soluble Lignin in Wood and Pulp), já para as espécies de eucalipto, utilizou-se um valor genérico de 21,90 %.

Em relação às espécies do tipo rústica, o *blend* de espécies de árvores frutíferas, adotou-se o valor de 27,5%, que se refere a um valor genérico para espécies de madeiras de um modo geral, valor adotado devido a sua diversificação amostral (Foelkel, 2015).

3.2. Determinação do Teor de Umidade de Cavacos (Método por Secagem em estufa)

A determinação do teor de umidade dos cavacos de madeira seguiu as orientações da norma ABNT NBR 14929 (2017), que estabelece o método de secagem em estufa. Antes de realizar o ensaio, a coleta e o preparo de amostras seguiram as indicações da ABNT NBR 14660 (2004), que especifica os procedimentos de amostragem e preparação de amostra de madeira.

Inicialmente, pesou-se o recipiente vazio previamente seco para garantir a remoção de qualquer umidade residual. Em seguida, 200 gramas de cavacos são transferidos para o recipiente, e a massa total do recipiente com a amostra é registrada. O recipiente com os cavacos é colocado em uma estufa a 105 °C, onde permanece por um período de 16 a 24 horas, até que o peso se mantenha constante. Após essa etapa, retira-se o recipiente da estufa, resfria-se em um dessecador, e realiza-se a primeira pesagem para registrar a massa da amostra seca.

Para estabilização do peso, o recipiente com os cavacos é novamente colocado na estufa e secos por mais 2 horas. Após esse tempo a amostra é resfriada e pesada novamente. Esse ciclo de secagem, resfriamento e pesagem é repetido quantas vezes forem necessárias até que o peso da amostra se estabilize, considerando uma variação menor que 0,1% entre suas duas pesagens consecutivas.

Para o cálculo do teor de umidade, deve-se utilizar a equação 1:

$$U = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Eq.1}$$

Onde,

U é o teor de umidade (%)

m_1 é a massa do recipiente de secagem seco em estufa (g)

m_2 é a massa do recipiente com a amostra antes da secagem (g)

m_3 é a massa do recipiente com amostra após a secagem (g)

Para a realização do procedimento, utilizou-se dois recipientes distintos com funções específicas. O primeiro foi empregado para a pesagem inicial da massa do

material em uma balança semianalítica, sendo escolhido por sua adequação a pesagem precisa do material. O segundo recipiente, previamente tarado, foi utilizado na etapa de secagem em estufa. Este recipiente, por ser maior, permitiu que o material fosse disposto de forma espalhada, aumentando a área de contato entre o calor da estufa e o material, o que favoreceu a eficiência do processo de secagem.

Durante todo o processo, garantiu-se que não houve perda de massa durante a transferência do material de um recipiente pro outro. A disposição dos recipientes e suas respectivas funções estão representadas na Figura 2.

Figura 4. Pesagem de Amostras do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2024)

3.3. Determinação do Poder Calorífico Inferior

O poder calorífico está relacionado à quantidade de calor liberada durante a combustão completa de um combustível. O poder calorífico inferior consiste que parte da energia liberada durante o processo de combustão é consumida do processo de evaporação da água presente no combustível (Cortez; Lora; Gómez, 2008). Conhecer a quantidade de calor da madeira é essencial para determinar sua potência calorífica e sua melhor aplicabilidade em atividades industriais que envolvem a geração de energia.

Para determinação do poder calorífico inferior (PCI), é possível utilizar a umidade obtida por meio da análise do teor de umidade, assim como os teores da composição química das espécies de cavaco. Com os valores da umidade obtidos nos ensaios podemos calcular o poder calorífico inferior do cavaco, conforme metodologia de José (2004).

$$PCI = \left[7832 \times C + 28650 \times \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2065 \times S - 615 \times w \right] \times 4,18 \quad Eq.2$$

$$w = 9 \times H + U \quad Eq.3$$

Onde,

PCI é o poder calorífico inferior (kJ/ kg)

C é o teor de carbono [kg de C/(kg de combustível)]

H é o teor de Hidrogênio [kg de H/(kg de combustível)]

O é o teor de Oxigênio [kg de O/(kg de combustível)]

S é o teor de enxofre [kg de S/(kg de combustível)]

w é a água formada nos produtos (kg de combustível)

U é a umidade do combustível [kg de H_2O /(kg de combustível)]

Essa abordagem considera tanto a contribuição da água presente no material, que reduz o valor do poder calorífico, quanto a composição química do cavaco, que influencia diretamente a quantidade de energia liberada durante a combustão.

3.4. Determinação do Resíduo (cinzas) após incineração a 525 °C (Madeira).

A norma ABNT NBR 13999 (2017) especifica o método para a determinação de resíduos de cinzas após a incineração de papel, cartão, pasta celulósica e madeira, sendo aplicável a todos os tipos de amostras mencionadas e podemos calcular o percentual de teor de cinzas de uma amostra

O procedimento consiste em pesar uma porção da amostra e colocá-la em um cadinho resistente ao calor adequado para o ensaio. Após a pesagem a amostra é inserida em mufla a 525°C para ser incinerada. Simultaneamente, deve-se realizar a análise de teor de umidade, uma vez que o teor de cinzas é determinado com base na massa livre de umidade. Este valor é obtido a partir da diferença entre a massa de cinzas após a incineração e do teor de umidade da amostra.

A metodologia também especifica que, no caso de madeira, as cinzas não se apresentam brancas após a incineração. Por isso, é necessário incinerações sucessivas por períodos de 1 hora, até que a diferença entre duas pesagens não

exceda 5 miligramas. Este processo garante a completa combustão e precisão na medição da quantidade de cinzas presentes.

Figura 5. Pesagem de amostra do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2024)

Figura 6. Amostra Após Incineração do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2024)

Para calcular o percentual de teor de cinzas de uma amostra, utiliza-se a equação 4:

$$X = \frac{100 \times mr}{ms} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde,

X é o resíduo da incineração (%);

mr é a massa do resíduos expressa em gramas (g);

ms é a massa da amostra, base seca em estufa, expressa em gramas (g);

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Composição Química

A composição química dos cavacos de madeira é um fator essencial quando se trata da avaliação do poder calorífico das espécies, pois não só parâmetros como teor de umidade são de interesses quando se trata da análise da performance de geração de calor. Segundo Machado *et al.* (2016), o percentual de lignina e o teor de carbono são os componentes que mais interferem na performance calorífica das espécies de cavaco de madeira. Isto ocorre porque, quanto maior a proporção de lignina e de carbono, menor vai ser a proporção de oxigênio, aumentando, assim, o potencial energético da madeira.

Além disso, os teores de hidrogênio, nitrogênio e enxofre estão presentes na composição química em percentuais menores, apresentando impactos limitados devido a suas quantidades reduzidas. Embora o enxofre tenha potencial bastante elevado em termos de geração de energia térmica, é preferível que esteja em proporções reduzidas, pois sua combustão pode gerar o dióxido de enxofre (SO₂). Em condições atmosféricas, esse gás pode levar a formação de chuva ácida, um fenômeno prejudicial ao meio ambiente (Machado *et al.*, 2016).

Portanto, é essencial realizar um comparativo entre as espécies a fim de verificar qual das espécies utilizadas no estudo apresenta a melhor performance calorífica com base em sua composição química. Neste estudo, foram utilizados valores provenientes da literatura, conforme relatado anteriormente. Para melhor visualização, os valores da composição química das espécies analisadas - rústica (blend de espécies frutíferas), cajueiro e eucalipto - estão apresentados na tabela 1.

Tabela 1: Composição química do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria

Composição Química (%)				
Componentes	Rústica	Cajueiro	Eucalipto	Autores
Carbono (C)	49,50	50,47	48,00	Klock (2013); Dantas (2018); Foelkel (2015)
Oxigênio (O)	44,50	44,24	40,00	Klock (2013); Dantas (2018); Foelkel (2015)
Hidrogênio (H)	6,00	6,42	5,50	Klock (2013); Dantas (2018); Foelkel (2015)
Nitrogênio (N)	0,60	0,27	0,28	Klock (2013); Dantas (2018); Foelkel (2015)
Enxofre (S)	0,10	0,02	0,07	Machado <i>et al.</i> (2016); Dantas (2018); Foelkel (2015)
Lignina	27,50	20,46	21,90	Montenegro et al. (2015); Foelkel (2015)

Fonte: Adaptado de Klock (2013), Dantas (2018), Foelkel (2015), Santos (2016), Montenegro et al. (2015).

Ao analisar os valores obtidos na literatura, observa-se que a espécie do tipo rústica apresenta o maior percentual de lignina, o que poderia indicar um maior poder calorífico. No entanto, o teor de carbono puro é amplamente reconhecido como principal determinante do poder calorífico, pois o mesmo é o fator direto no cálculo do poder calorífico inferior. Neste aspecto, a espécie de cajueiro se destaca, apresentando maior concentração de carbono, o que sugere que entre as espécies analisadas, ela possui melhor performance calorífica.

Contudo, os percentuais apresentados pelas espécies se adequam a utilização para geração de energia térmica em indústrias, pois estas apresentam valores esperados para a composição, e em relação ao impacto ambiental, o cavaco de madeira pode ser considerado um combustível com pouco potencial poluente por apresentar baixo teor de enxofre (Monteiro, 1992).

4.2 Teor de Umidade

Para obtenção dos resultados de umidades, foram realizados os ensaios laboratoriais estabelecidos pela norma ABNT NBR 14929 (2017). Os valores finais foram calculados utilizando a Equação 1, e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 2, logo abaixo.

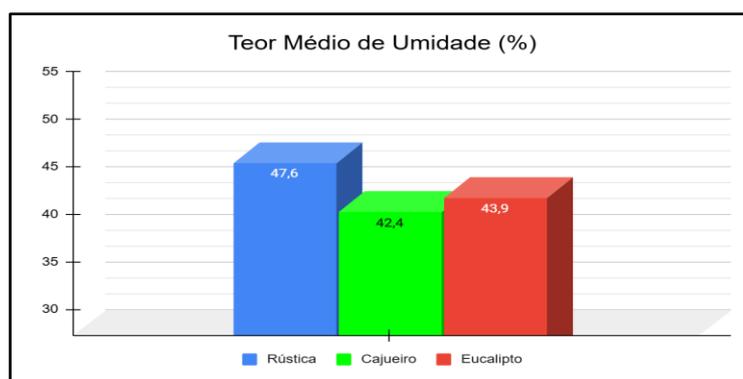
Tabela 2: Teor de Umidade do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria

Teor de Umidade (%)					
Rústica		Cajueiro		Eucalipto	
R1	43,0	C1	42,3	E1	46,7
R2	46,7	C2	38,9	E2	43,6
R3	42,5	C3	42,1	E3	46,8
R4	47,9	C4	41,3	E4	43,3
R5	51,8	C5	43,5	E5	42,0
R6	50,3	C6	45,0	E6	41,7
R7	48,4	C7	43,0	E7	45,5
R8	49,0	C8	41,5	E8	41,4
R9	46,8	C9	43,7	E9	42,0
R10	49,4	C10	42,8	E10	45,5
MÉDIA	47,6	MÉDIA	42,4	MÉDIA	43,9

Fonte: O autor

No total, foram realizadas 30 análises de umidade, sendo 10 de cada espécie. Para avaliação do teor de umidade, considerou-se o valor médio dessas umidades, permitindo a realização de um comparativo entre as espécies, conforme apresentado na figura 7.

Figura 7: Umidade Média das Espécies de Cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2025)

Ao comparar os valores de umidades médio de cada espécie, observa-se que o cajueiro apresenta menor umidade, o que sugere uma possível performance calorífica mais satisfatória em relação às outras espécies. Segundo estudos realizados por Deboni (2017), os cavacos florestais apresentaram, em média, 52,50% de umidade.

No entanto, o estudo aqui apresentado obteve melhor performance, pois, de acordo com a literatura, amostras com umidade mais próxima de 0% apresentam um melhor poder calorífico, em torno de 19.264 kJ/kg, enquanto amostras com umidade em torno de 50% possuem um poder calorífico de 10.078 kJ/kg. Isso demonstra que materiais mais secos apresentam melhor desempenho energético (Lima *et al.*, 2008).

Durante a visita ao local de estudo, foi possível observar a influência de intempéries, como ilustrado na Figura 8. O galpão, onde os cavacos são armazenados, é aberto e os materiais ficam expostos diretamente ao ambiente, sendo armazenados no piso do galpão. Isso evidencia a necessidade de práticas mais adequadas de armazenagem, já que a umidade é um fator constante em ambientes abertos. Além disso, uma possível solução seria a adoção de práticas de secagem do cavaco antes de serem submetidos ao processo de combustão, uma vez que a secagem da madeira aumenta a quantidade de energia disponível durante o processo de queima (Lima *et al.*, 2008).

Figura 8: Armazenamento do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2025)

4.3 Teor de Cinzas

Os ensaios de análises de cinzas foram realizados com base no procedimento estabelecido pela norma ABNT NBR 13999 (2017). Foram realizadas 30 análises, 10 de cada espécie (rústica, cajueiro e eucalipto). Os cálculos foram realizados utilizando a equação 4, e os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Teor de Cinzas do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria

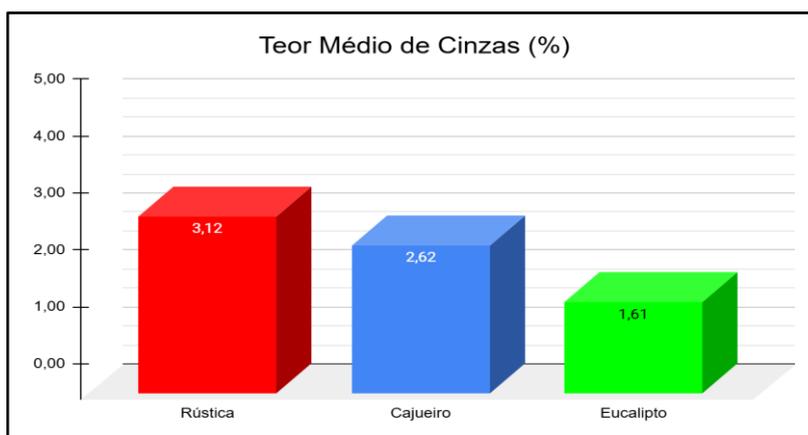
Teor de Cinzas (%)					
Rústica		Cajueiro		Eucalipto	
R1	4,20	C1	4,12	E1	1,45
R2	2,74	C2	1,84	E2	1,10
R3	3,22	C3	2,81	E3	1,12
R4	2,20	C4	1,65	E4	1,89
R5	3,19	C5	3,24	E5	1,56
R6	3,61	C6	2,88	E6	1,33
R7	4,40	C7	3,00	E7	1,69
R8	3,90	C8	2,51	E8	1,73
R9	2,10	C9	1,59	E9	2,44
R10	1,61	C10	2,51	E10	1,76
MÉDIA	3,12	MÉDIA	2,62	MÉDIA	1,61

Fonte: O autor

Ao observar os valores médios, presentes na figura 9, verifica-se que o cavaco com menor percentual de cinzas é o da espécie de eucalipto. Contudo, todas espécies analisadas neste estudo apresentaram boa performance em relação ao teor de cinzas, pois estão dentro dos limites desejáveis, não ultrapassando 30% do teor de cinzas. De acordo com a literatura, teores de cinzas acima deste limite podem acarretar em problemas operacionais em caldeiras. Além disso, uma quantidade elevada de cinzas pode indicar perdas significativas de calor durante o processo de queima dos cavacos (Amorim, 2021).

As cinzas são compostas por óxidos minerais formados a partir da combustão, e em madeiras, geralmente, estão presentes em teores entre de 0,1 % a 5%. Isso indica que a madeira é um combustível com baixo potencial poluidor devido a sua baixa concentração de cinzas (Lima *et al.*, 2008). Os valores deste estudo se aproximam dos valores obtidos por Deboni (2017), que ao realizar os ensaios para obtenção do teor de cinzas, encontrou um valor médio de 4,99% para cavacos florestais.

Figura 9: Valor Médio do Teor de cinzas do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2025)

4.4. Poder Calorífico Inferior

A ISO 17225 (*International Organization for Standardization*) estabelece as especificações gerais e classes de combustíveis sólidos derivados de biomassa.

Essas classes são definidas conforme a figura 10, permitindo classificar as espécies de cavacos analisadas neste estudo.

Figura 10: Classes de Combustíveis do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria

ISO 17225 - Especificação gerais e classes de combustíveis sólidos derivados de biomassa
Classe 1 - superior à 18000 k.J.kg
Classe 2 - entre de 16000 k.J.kg e 18000 k.J.kg (ideal para uso industrial)
Classe 3 - entre 12000 k.J.kg e 16000 k.J.kg (apresentam maior umidade)
Classe 4 - abaixo de 12000 k.J.kg (umidade bastante elevada)

Fonte: O autor

Os cálculos para se obter o poder calorífico inferior das espécies foram realizados utilizando as equações 2 e 3, assim adquirindo os resultados apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Poder Calorífico Inferior do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria

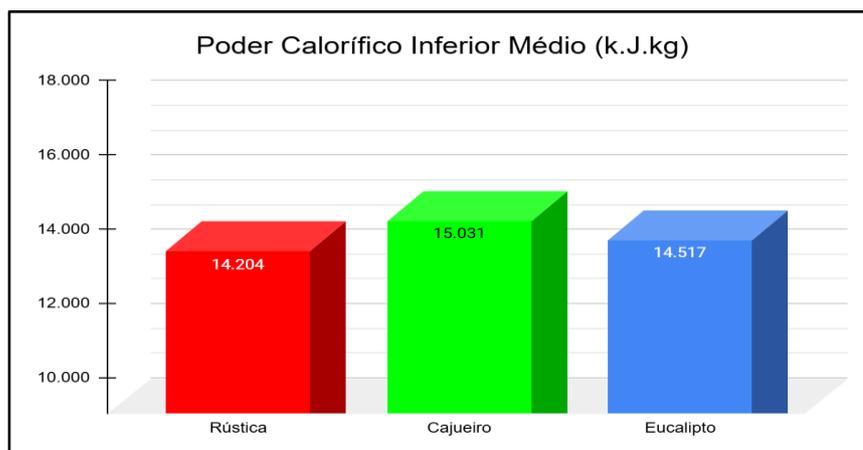
Poder Calorífico Inferior (k.J.kg)					
	Rústica		Cajueiro		Eucalipto
R1	14.322	C1	15.033	E1	14.444
R2	14.227	C2	15.121	E2	14.524
R3	14.335	C3	15.039	E3	14.442
R4	14.196	C4	15.059	E4	14.532
R5	14.096	C5	15.003	E5	14.565
R6	14.134	C6	14.964	E6	14.573
R7	14.183	C7	15.015	E7	14.475
R8	14.168	C8	15.054	E8	14.580
R9	14.224	C9	14.997	E9	14.565
R10	14.157	C10	15.021	E10	14.475
MÉDIA	14.204	MÉDIA	15.031	MÉDIA	14.517

Fonte: O autor (2025)

Os dados obtidos permitem concluir que a espécie com maior poder calorífico inferior é a de cajueiro, o que indica que essa espécie apresenta resultados mais satisfatórios para a geração de energia. Estudos sobre o poder calorífico do cavaco indicam valores em torno de 17.000 kJ/kg a 18.000 kJ/kg para o cavaco de madeira utilizado em caldeiras (Deboni, 2017). No entanto, nos resultados obtidos neste estudo, os valores estão na faixa de 14.000 kJ/kg a 16.000 kJ/kg, o que pode ser explicado pelo elevado teor de umidade das amostras, fator que exerce maior influência no poder calorífico.

Com relação à classificação estabelecida pela ISO 17225, como mostrado na Figura 11, observa-se que as espécies de cavaco estudadas, podem ser classificadas como de classe 3 (entre 12.000 k.J.kg e 16.000 k.J.kg). Essa classificação indica madeiras com umidade acima do desejável, enquanto as da classe 2 (entre de 16.000 k.J.kg e 18.000 k.J.kg) são as mais ideais para uso em processos industriais de geração de energia. Assim, torna-se necessário implementar técnicas de controle da umidade da madeira, que impactarão diretamente no poder calorífico apresentado pelas espécies.

Figura 11: Poder Calorífico Inferior Médio do cavaco de madeira para geração de vapor na indústria



Fonte: O autor (2025)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo confirmou o potencial dos cavacos de madeira como uma alternativa sustentável para geração de vapor em indústrias, especialmente no contexto da busca por fontes de energia renováveis. O cavaco de cajueiro se destacou

por seu melhor desempenho calorífico, graças ao seu maior teor de carbono e menor umidade, em comparação com as outras espécies analisadas, como o eucalipto e o “blend” denominado “rústica”. No entanto, a presença elevada de umidade nas amostras impactou negativamente na eficiência da combustão, evidenciando a necessidade de melhorar os processos de armazenamento e secagem antes da utilização dos cavacos, a fim de otimizar sua performance energética.

Além disso, os baixos teores de cinzas observados nas amostras reforçam o benefício ambiental da biomassa de madeira, com menor impacto poluente durante a queima. Isso a torna uma opção atraente em relação a combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Para tornar o uso dessa biomassa ainda mais eficiente, é fundamental implementar práticas de manejo e secagem adequadas. Com base nos resultados, pode-se concluir que os cavacos de madeira têm grande viabilidade como combustível renovável, especialmente se acompanhados de um melhor controle das condições de armazenamento e processamento.

REFERÊNCIAS

AMORIM, T. P.; PAULISTA, C. R. Análise do teor de umidade, cinzas e poder calorífico de cavaco de eucalipto utilizado como combustível em caldeira flamotubular. *In*: CONGRESSO ONLINE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2021. **Anais[...]**, 2021. ISBN 978-65-89908-00-5. Disponível em <https://eventos.congresse.me/engmatcon/resumos/11027.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2024.

ARAÚJO, A. C. de. Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, p. 1-10, jul. 2018. DOI: 10.4336/2018.pfb.38e201701546. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/34800>. Acesso em: 22 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13999**: Determinação de resíduos de cinzas após incineração a 525 °C - Papel, cartão, pasta celulósica e madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/37977/nbr13999-papel-cartao-pastas-celulosicas-e-madeira-determinacao-do-residuo-cinza-apos-a-incineracao-a-525-c>. Acesso em: 28 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14660**: Madeira - Procedimento para amostragem e preparação de amostra de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas->

tecnicas/38051/nbr14660-madeira-amostragem-e-preparacao-para-analise . Acesso em: 28 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/38090/nbr14929-madeira-determinacao-do-teor-de-umidade-de-cavacos-metodo-por-secagem-em-estufa>. Acesso em: 28 nov. 2024.

BIANCHINI, D. C. **Avaliação energética, econômica e ambiental do uso de cavaco de madeira para geração de energia térmica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, 2020. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2789/DISSERTA__O_DEBORA_CRIS_TINA_BIANCHINI___FINAL_16352606967183_2789.pdf. Acesso em: 30 nov. 2024.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2014**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2014. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2014>. Acesso em: 30 nov. 2024.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. Disponível em: https://issuu.com/editoraunicamp/docs/20pp-biomassa_para_energia2. Acesso em: 01 dez. 2024.

DANTAS, F. C. F. **Caracterização química e física do cajueiro (Anacardium occidentale L.)**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/5b9d0cf4-91cd-490f-9faf-5804b8bdf0ff/content> . Acesso em: 01 dez. 2024.

DEBONI, Tamires Liza. **Qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia por uma unidade cogeneradora em Lages-SC**. 2017. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Lages, 2017. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/1546/Disserta__o_Tamires_Liza_Deboni_15688143633326_1546.pdf. Acesso em: Acesso em: 01 dez. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>. Acesso em: 06 dez. 2024

ENTENDA a diferença entre matriz energética e matriz elétrica. **[Site] IDEC**. 2024. Disponível em: <https://idec.org.br/dicas-e-direitos/diferenca-entre-matriz-energetica-e-matriz-eletrica>. Acesso em: 22 nov. 2024.

FOELKEL, Celso. **Qualidade da biomassa florestal do eucalipto para fins energéticos**. Edição 49. 2015. Disponível em:

https://www.eucalyptus.com.br/artigos/news49_Biomassa_Florestal_Eucalipto.pdf. Acesso em: 06 dez. 2024.

FORTES, H. J. **Matriz energética atual, transição e perspectivas até 2050: desafios e oportunidades para a industrialização do Nordeste brasileiro a partir das energias renováveis**. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/77049>. Acesso em: 06 dez. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225: Classification of solid biofuels: Part 1: General requirements**. Genebra: ISO, 2021. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/76087/90afa1488d3c4a6c8fe87074bde8660c/ISO-17225-1-2021.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2025.

JOSÉ, H. J. **Combustão e combustíveis**: apostila química tecnológica geral. Florianópolis/SC: UFSC, 2004.

KLOCK, U. **Química da madeira**. 4 ed. Paraná: Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, 2013. Disponível em: <http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/quimicadamadeira/Quimica%20da%20Madeira%202013.pdf> . Acesso em: 12 dez. 2024.

LIMA, E. A. **Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira**. Colombo, PR: EMBRAPA, 2008. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/315901/1/comtec220.pdf> Acesso em: 4 jan. 2025.

LIMA JÚNIOR, Claudemiro. **Potencial de Aproveitamento Energético de Fontes de Biomassa no Nordeste do Brasil**. 2013. Tese (Doutorado) – Universidade de Pernambuco, Pernambuco, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10160>. Acesso em: 12 dez. 2024.

MACHADO, G. O. **Química da madeira no contexto energético**. 1. ed. São Carlos: EESC-USP, 2016. ISBN 978-85-8023-040-6. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/308890980_Quimica_da_Madeira_no_Contexto_Energetico#read. Acesso em: 12 dez. 2024.

MONTENEGRO, A. A. T. LIMA, C. R. PARENTE, J. I. G. Caracterização química da madeira do cajueiro (*Anacardium occidentale* L.). *In* : CONGRESSO E EXPOSIÇÃO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL, 43.. 2010, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel, 2010. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/870281> Acesso em: 7 fev. 2025.

MONTEIRO, A. L. F. B. P. A. **Ciências do ambiente: ecologia, poluição e impacto ambiental**. São Paulo: McGraw-Hill, 1992. Disponível em:

<https://acervo.ufrn.br/Record/oai:localhost:123456789-5746/Details> . Acesso em: 05 jan. 2025.

NASCIMENTO, Mario Donizeti do; BIAGGIONI, Marco Antonio Martin. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 3, p. 104-117, 2010. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/276567578_AVALIACAO_ENERGETICA_DO_USO_DE_LENHA_E_CAVACO_DE_MADEIRA_PARA_PRODUCAO_DE_ENERGIA_EM_AGROINDUSTRIA_SEROPEDICA. Acesso em: 05 jan. 2025.

SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2338-2353, 2011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111000578>. Acesso em: 05 jan. 2025.

SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 32, n. 3, p. 567-575, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000300017>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SILVA, R. Por que uma matriz energética diversificada e verde é importante?. **[Site] ECOA**. 2024. Disponível em: <https://ecoa.org.br/por-que-uma-matriz-energetica-diversificada-e-verde-e-importante/>. Acesso em: 10 Jan. 2025.

SOUZA, D. Matriz energética mundial: entenda sua importância. **[Site] Kartado**. 2024. Disponível em: <https://kartado.com.br/matriz-energetica-mundial/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

UCELLA-FILHO, J. G. M. *et al* . Cavacos de madeira: características, aplicações e avanços de pesquisa no Brasil. *In* .: **Open Science Research**. v. 7. [S.l]: Editora Científica Digital, 2022. Disponível em: <https://www.editoracientifica.com.br/books/chapter/221010665> Acesso em: 11 jan. 2025.