REVISTA DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES

# TRATAMENTO TÉRMICO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS COMO ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

# THERMAL TREATMENT OF AGRICULTURAL WASTE AS AN ALTERNATIVE FOR PRODUCING SOLID BIOFUELS

Recebido em: 23/12/2024
Reenviado em: 09/09/2024
Aceito em: 21/09/2024
Publicado em: 09/10/2024

Márcio Mendes Silva Diniz[1]
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Carine Tondo Alves[2]
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

Marcus Luciano Souza de Ferreira Bandeira[3]
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Allívia Rouse Carregosa Rabbani[4]
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

Allison Gonçalves Silva[5]
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia

**Resumo:** O Brasil se destaca na composição de sua matriz energética, tendo os biocombustíveis um papel importante, com diversas matérias-primas necessitando de estudo. Este artigo busca avaliar o efeito da aplicação de tratamento térmico em diferentes espécies de biomassa para melhorar suas características energéticas, através de análise de composição química imediata (padronizada pela *American Society for Testing and Materials*), espectroscopia na região do infravermelho, e termogravimetria. Este artigo detalha o potencial energético de cada biomassa, estabelecendo os processos de torrefação com melhor rendimento a partir de resíduos agrícolas de amendoim (*Arachis hypogaea* L.), cacau (*Theobroma cacao* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), coco (*Cocos nucifera* L.), óleo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) e mamão (*Carica papaya* L.). O tratamento térmico da biomassa mostrou-se eficaz na obtenção de um biocombustível sólido com maior poder calorífico, diagnosticado através de análises químicas imediatas.

**Palavras-chave:** Agricultura; Química; Potencial energético; Silvicultura; Resíduos.

**Abstract:** Brazil stands out in terms of the composition of its energy matrix, with biofuels playing an important role, with many different raw materials requiring study. This article seeks to evaluate thermal treatment's effect on

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), DIREN/ Bacharelado em Química, Campus Porto Seguro. E-mail: marciodiniz990@hotmail.com
[2] Professora da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), CETENS. Brasil, Bahia, Feira de Santana. E-mail: carine.alves@ufrb.edu.br
[3] Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), DIREN/PPGCTA. Campus Porto Seguro. E-mail: marcusbandeira@ifba.edu.br
[4] Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), DIREN/PPGCTA, Campus Porto Seguro. E-mail: alliviarouse@hotmail.com
[5] Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA), DIREN/PPGCTA, Campus Porto Seguro. E-mail: allisongoncalves@ifba.edu.br



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

different biomass species to improve their energy characteristics, through an analysis of immediate chemical composition (as standardized by the American Society for Testing and Materials), spectroscopy in the infrared region, and thermogravimetry. This paper details the energy potential for each biomass, establishing the torrefaction processes with the best yield from agricultural residue of peanuts (*Arachis hypogaea* L.), cacao (*Theobroma* cacao L.), sugarcane (*Saccharum* spp.), coconut (*Cocos nucifera* L.), palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.), and papaya (*Carica papaya* L.). The thermal treatment of biomass proved effective in obtaining a solid biofuel with a higher heating value, as diagnosed through immediate chemical analyses.

**Keyword:** Agriculture; Chemistry; Energy potential; Forestry; Residues.

## INTRODUÇÃO

A expansão drástica da demanda global por energia no último século, por meio do processo de globalização econômica associado ao uso abusivo de combustíveis fósseis, tem causado sérios problemas ambientais que afetam as condições climáticas e biológicas em todo o planeta. No entanto, as alternativas são crescentes e novas tecnologias estão sendo desenvolvidas (GUERRA, 2022; KHAN *et al.*, 2020*,* BUTT *et al.,* 2020*,* GRUBLER *et al*. 2018; OMER, 2008). A biomassa é uma fonte de energia renovável que pode ajudar a alcançar o ciclo neutro em carbono em países com uma política eficiente de proteção e uso dos recursos naturais (DINCER, 2000; FAVERO *et al.*, 2020).

O Brasil se destaca entre os países que possuem uma matriz energética composta majoritariamente por fontes renováveis (MME, 2020). Segundo o governo brasileiro, 48% da matriz energética é renovável, sendo que 61% desse total é composto por fontes de bioenergia (MME, 2021). A biomassa está entre as fontes mais promissoras de geração de energia em nível nacional e internacional, pois é considerada uma das principais alternativas para diversificar a produção de calor e energia (MAO *et al.*, 2018). De acordo com a Agência Internacional de Energia, espera-se um aumento de 16% na demanda mundial por energia renovável a partir da biomassa até 2028 (IEA, 2022).

A silvicultura e a agricultura são a forma predominante de utilização da terra em todo o mundo, abrangendo esforços econômicos, sociais e culturais significativos (TORRES *et al.*, 2022). No entanto, dentro desse esforço de aproveitamento da terra, ocorre a geração de resíduos. Isso demonstra a importância do desenvolvimento de procedimentos e tecnologias que melhorem o potencial energético desses resíduos, para contribuir da forma mais significativa possível para a matriz energética mundial.

Existem diferentes formas de utilizar a biomassa como matéria-prima para produzir energia. Os métodos mais antigos de redução térmica são a combustão e a pirólise. A combustão é uma reação de oxidação que transforma o combustível em gases, deixando o resíduo na forma



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

de cinzas. A pirólise é uma degradação controlada que ocorre entre 225°C e 500°C (MARTINS, 1980).

A torrefação é um tratamento térmico, com temperaturas variando entre 200°C e 300°C em um ambiente com ausência parcial ou completa de agentes oxidantes. Os benefícios desse tratamento estão associados ao aumento do potencial energético do biocombustível sólido e à homogeneização granulométrica e combustão em leito fluidizado. O processo permite a remoção dos componentes voláteis de maior valor térmico, sendo o produto composto principalmente por celulose, lignina e hemicelulose degradada. A hemicelulose degradada caracteriza os aspectos hidrofóbicos do biocombustível torrificado e promove resistência à degradação microbiana, permitindo maiores períodos de armazenamento (SILVA *et al.*, 2013; GIL *et al.*, 2015).

O processo de torrefação, que determina o potencial energético detalhado de cada biomassa, pode ajudar a identificar os produtos mais vantajosos por meio de uma técnica de análise térmica que analisa as propriedades físicas de uma substância e/ou de seus produtos, enquanto as amostras são submetidas a um regime de temperatura controlada. Existem duas abordagens básicas para estudos que aplicam técnicas de análise térmica: isotérmica e não-isotérmica ou dinâmica (IONASHIRO; GIOLITO, 1980).

Na análise térmica, as variações de massa são medidas usando termogravimetria (TG), enquanto as medidas de variações de energia formam a base técnica da calorimetria exploratória diferencial (DSC). TG fornece informações sobre a composição e estabilidade térmica e é aplicado para medir mudanças na massa resultantes de uma transformação física (sublimação, evaporação, condensação) ou química (degradação, decomposição, oxidação), em função da temperatura ou do tempo (MOHTÉ; AZEVEDO, 2002; MIRANDA, 2011).

O DSC é uma técnica em que a diferença de energia fornecida à substância e a um material de referência termicamente inerte é medida em função da temperatura, enquanto a substância e o material de referência são submetidos a um cronograma de temperatura controlado, mantendo tanto a amostra quanto a referência em condições isotérmicas (IONASHIRO; GIOLITO, 2004).

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial energético de resíduos de biomassa provenientes de amendoim (*Arachis hypogaea* L.), coco (*Cocos nucifera* L.), cacau (*Theobroma cacao* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), palmito (*Elaeis guineensis* Jacq.) e mamão (*Carica papaya* L.) por meio de análises térmicas e tratamentos de torrefação.



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional
REVISTA DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
ISSN 2674-8703
CEEINTER
CENTRO DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
www.portalceeinter.com.br

A inovação deste presente estudo reside na caracterização detalhada do comportamento termogravimétrico desses resíduos, explorando novas combinações de aglutinantes residuais, como glicerina e licor negro, para otimizar o rendimento energético dos biocombustíveis sólidos. Este enfoque busca não apenas aumentar o potencial energético dessas biomassas, mas também contribuir para a sustentabilidade, reduzindo o impacto ambiental de resíduos industriais. A aplicação prática poderá proporcionar alternativas viáveis e sustentáveis para a diversificação da matriz energética regional e nacional, atendendo às crescentes demandas globais por energia renovável.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi conduzida utilizando uma abordagem quantitativa, visando informações sobre bioenergia, como foco em resíduos agroindustriais, onde as amostras foram obtidas de empresas, feiras livres e barracas de praia na cidade de Porto Seguro, Brasil, no ano de 2022 e incluíram de cascas de amendoim, coco e cacau, bagaço de cana-de-açúcar, fibra de palma e mamão. As amostras foram coletadas e caracterizadas nos laboratórios do IFBA (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia). Para identificar o potencial energético de cada tipo de resíduo, foram realizadas as análises imediatas, como cinzas totais, materiais voláteis e carbono fixo e com base nestes dados, foram calculados para cada biomassa o poder calorífico superior (HHV, $MJKg^{-1}$), bem como o rendimento gravimétrico e os resíduos foram caracterizados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análise termogravimétrica (TA).

A abordagem metodológica foi experimental, foram utilizadas amostras *in natura*, que foram cortadas com facas em pedaços menores que 50 mm e colocadas na estufa a uma temperatura de 105°C por 24 horas, de acordo com a norma ASTM E 871-82 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2019a). Em seguida, as amostras foram retiradas do calor e resfriadas à temperatura ambiente. As biomassas secas foram então processadas no Willye Super®, modelo STAR FT-80. As biomassas processadas foram filtradas em granulometrias inferiores a 3,0 mm por meio de peneira.

O processo de torrefação, baseado em Cao *et al.* (2015), Zhang *et al.* (2018) e Silva *et al.* (2017), foi realizada em todas as amostras. Para tanto, foi utilizado um reator tipo mufla, com cilindro pressurizado de gás nitrogênio conectado ao reator. As amostras de biomassa foram torrificadas nas temperaturas de 230°C, 240°C e 250°C por 01 (uma) hora. Aproximadamente 10 g de biomassa fresca foram colocados em um cadinho de alumínio



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

previamente pesado. Após o período de aquecimento, as amostras foram resfriadas no interior do reator, em meio inerte, por aproximadamente 01 (uma) hora. Os produtos torrificados foram armazenados separadamente em frascos para posterior análise.

Foram realizadas quatro análises em linha com a ASTM (2019ab, 2021): medições de umidade (ASTM E 871-82), materiais voláteis (ASTM E 872-82), carbono fixo e cinzas totais (ASTM D 1102-84).

O HHV para as amostras em estudo foi estimado, em $MJKg^{-1}$, de acordo com Parikh *et al.* (2005), por meio do qual foi possível estimar o HHV de materiais que vão desde substâncias carbonáceas sólidas até todos os tipos de material de biomassa e carvão combustível derivado de resíduos, através de análise imediata. A análise de regressão foi utilizada para estimar a relação entre o teor de umidade e a concentração de material volátil; bem como a correlação entre o teor de carbono fixo e o maior valor de aquecimento da biomassa, utilizando o Excel® (MICROSOFT, 2023).

Os rendimentos gravimétricos do material sólido proveniente da torrefação foram obtidos calculando-se a razão entre a massa do material após o tratamento e a massa do material previamente seco.

Para a determinação da densidade energética, foi utilizada a metodologia proposta por Bergman *et al.* (2004), a qual é uma medida da energia potencial que um determinado volume de biomassa deve produzir. Esse conceito relaciona a densidade aparente com o valor de aquecimento do combustível e, assim, fornece a quantidade de energia em calorias ou joules que existe em um (1) metro cúbico ($MJm^{-3}$).

Para as análises de FTIR, foi utilizado o modelo Shidmazu® IRAffinity -1S, com análise realizada na faixa de 4000 a 400 $cm^{-1}$, com resolução de 4 $cm^{-1}$ e um total de 128 varreduras, sendo preparadas usando pastilhas de brometo de potássio (KBr) (1:300 mg, amostra KBr). Esta técnica foi utilizada para caracterizar as amostras de biomassa, principalmente no que diz respeito à identificação da hemicelulose, que diminui o poder de aquecimento dos resíduos estudados. As posições das bandas de absorção no infravermelho encontradas foram comparadas com as bandas já descritas na literatura (PANDEY, 2002). Os resultados foram tabulados utilizando-se o software *Origin*, versão 7.0 (EDWARDS, 2002).

Para a análise termogravimétrica do resíduo de biomassa, utilizou-se a seguinte metodologia. As amostras foram submetidas à pirólise em atmosfera de nitrogênio utilizando um Shidmazu® modelo H60, a uma temperatura de até 850ºC. Antes de cada procedimento, o sistema de análise térmica foi purgado com nitrogênio e a amostra foi pré-tratada aquecendo-a



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

até 110ºC por 30 minutos. Os resultados foram tabulados utilizando-se o software *Origin*, versão 7.0 (EDWARDS, 2002).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de umidade (M), o teor de matéria volátil (VM), o teor de cinzas (AC) e, consequentemente, o teor de carbono fixo (CF), foram determinados para as amostras *in natura* e torradas. Os valores obtidos para a análise química imediata da biomassa bruta e torrada, o aumento do poder calorífico superior de cada biomassa em função da temperatura de seus respectivos condicionamentos térmicos e o rendimento gravimétrico e energético das biomassas submetidas ao processo de torrefação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise química imediata da casca de amendoim (*Arachis hypogaea* L.)*, casca de cacau* (*Theobroma cacao* L.), bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), coco (*Cocos nucifera* L.), fibra de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) *e mamão* (*Carica papaya* L.) biomassa. M - teor de umidade; MV- teor de material volátil; AC - teor de cinzas; CF - teor fixo de carbono; $\eta_m$ - rendimento gravimétrico; ηe - rendimento energético; e HHV – maior valor de aquecimento.

| Resíduo vegetal | Calor (°C) | Variáveis (%) | | | | Desvio padrão | | | Coeficiente de variação (%) | | | $\eta_m$ (%) | ηe (%) | HHV ($MJkg^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | M | MV | AC | FC | M | MV | AC | M | MV | AC | | | |
| Amendoim | 0 | 12,23 | 79,26 | 2,33 | 18,41 | 0,91 | 1,89 | 0,32 | 7,44 | 2,39 | 13,84 | - | - | 18,90 |
| | 230 | 3,42 | 54,55 | 4,22 | 41,23 | 0,14 | 2,97 | 0,26 | 4,23 | 5,44 | 6,15 | 63,41 | 77,33 | 23,05 |
| | 240 | 3,21 | 52,94 | 5,02 | 42,04 | 0,08 | 0,67 | 0,38 | 2,61 | 1,27 | 7,64 | 58,75 | 71,74 | 23,08 |
| | 250 | 3,03 | 50,98 | 5,34 | 43,68 | 0,09 | 1,47 | 0,20 | 2,94 | 2,89 | 3,71 | 57,22 | 70,69 | 23,35 |
| Cacau | 0 | 9,35 | 71,14 | 6,02 | 22,83 | 0,09 | 10,21 | 1,29 | 0,97 | 14,35 | 21,47 | - | - | 19,11 |
| | 230 | 1,46 | 47,59 | 9,44 | 42,97 | 0,05 | 3,53 | 1,31 | 3,24 | 7,41 | 13,89 | 77,36 | 91,25 | 22,54 |
| | 240 | 1,41 | 41,01 | 9,57 | 49,42 | 0,03 | 7,33 | 0,63 | 2,45 | 17,87 | 6,54 | 68,51 | 85,29 | 23,79 |
| | 250 | 1,16 | 40,32 | 11,48 | 48,20 | 0,03 | 0,95 | 0,61 | 2,58 | 2,35 | 5,36 | 65,97 | 80,23 | 23,24 |
| Cana-de-açúcar | 0 | 16,75 | 87,34 | 0,93 | 11,73 | 1,07 | 4,17 | 0,51 | 6,41 | 4,78 | 54,36 | - | - | 17,75 |
| | 230 | 6,24 | 68,67 | 1,80 | 29,53 | 0,16 | 11,49 | 0,60 | 2,63 | 16,74 | 33,12 | 79,14 | 94,21 | 21,13 |
| | 240 | 5,87 | 51,50 | 2,11 | 46,39 | 0,22 | 11,16 | 0,88 | 3,77 | 21,67 | 41,56 | 66,38 | 91,29 | 24,41 |
| | 250 | 5,42 | 50,53 | 2,34 | 47,13 | 0,15 | 4,52 | 0,70 | 2,84 | 8,95 | 29,75 | 64,87 | 89,61 | 24,52 |
| Coco | 0 | 10,21 | 78,88 | 1,28 | 19,84 | 0,14 | 1,81 | 0,44 | 1,38 | 2,30 | 34,57 | - | - | 19,30 |
| | 230 | 4,98 | 58,50 | 3,23 | 38,27 | 0,27 | 4,36 | 0,36 | 5,46 | 7,45 | 11,26 | 76,08 | 89,21 | 22,63 |
| | 240 | 3,42 | 46,85 | 4,23 | 48,92 | 0,12 | 5,61 | 0,62 | 3,42 | 11,98 | 14,59 | 69,74 | 88,78 | 24,57 |
| | 250 | 3,20 | 46,16 | 4,55 | 49,29 | 0,09 | 3,17 | 0,31 | 2,90 | 6,87 | 6,78 | 64,05 | 81,61 | 24,59 |
| Palma | 0 | 9,42 | 79,87 | 3,24 | 16,89 | 0,44 | 5,69 | 1,12 | 4,72 | 7,12 | 34,52 | - | - | 18,39 |
| | 230 | 5,28 | 53,99 | 5,24 | 40,67 | 0,36 | 8,87 | 0,78 | 6,82 | 16,43 | 14,95 | 77,42 | 95,56 | 22,70 |
| | 240 | 3,91 | 53,16 | 5,41 | 41,43 | 0,06 | 5,19 | 0,41 | 1,64 | 9,76 | 7,64 | 75,70 | 94,22 | 22,89 |
| | 250 | 3,63 | 50,08 | 5,56 | 44,46 | 0,09 | 2,29 | 0,40 | 2,37 | 4,58 | 7,29 | 70,12 | 89,76 | 23,54 |
| Mamão | 0 | 16,44 | 78,79 | 6,49 | 14,72 | 1,02 | 10,60 | 1,37 | 6,23 | 13,46 | 21,17 | - | - | 17,44 |
| | 230 | 5,98 | 55,26 | 15,67 | 29,07 | 0,25 | 26,94 | 5,44 | 4,17 | 48,75 | 34,73 | 53,81 | 57,91 | 18,77 |
| | 240 | 5,71 | 53,24 | 16,29 | 30,47 | 0,49 | 16,72 | 1,13 | 8,62 | 31,40 | 6,92 | 51,49 | 55,92 | 18,94 |
| | 250 | 4,94 | 49,77 | 16,04 | 34,19 | 0,16 | 8,67 | 2,31 | 3,21 | 17,42 | 14,38 | 48,76 | 55,02 | 19,68 |

**Elaboração:** Dos autores, 2022.

À medida que a temperatura aumentava durante o condicionamento térmico desses materiais de biomassa, seu teor de umidade era progressivamente reduzido. Isso confirma a hipótese da degradação de componentes hidrofílicos (hemicelulose) da biomassa em função da temperatura. As amostras de biomassa, em média, perderam relativamente 67,9% da umidade total após o processo de torrefação em relação às suas respectivas biomassas *in natura*,



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703
CEEINTER CENTRO DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
www.portalceeinter.com.br

considerando as três temperaturas em que o tratamento térmico foi realizado. A maior perda foi observada para a casca do cacau, que teve uma redução média de umidade de 85,6%.

Consequentemente, a casca do cacau também foi a biomassa com maior perda relativa, com redução média de 39,6% na concentração final do produto torrificado, quando consideradas as três temperaturas. As reduções na concentração de materiais voláteis para as amostras de biomassa estudadas foram, em média, de 29,0%, 37,2% e 39,5% nas temperaturas de torrefação de 230°C, 240°C e 250°C, respectivamente. Os teores de materiais voláteis após tratamento térmico concordaram com os encontrados por Prins *et al.* (2006), que indicam uma diminuição na concentração de materiais voláteis de 80% para 60%, uma redução de aproximadamente 25% a uma temperatura de torrefação de 220°C.

Em geral, a natureza hidrofílica dos materiais voláteis pode ser observada na correlação entre o teor de material volátil e o teor de umidade. À medida que a matéria volátil é degradada durante o tratamento térmico, a umidade é reduzida exponencialmente, mostrando que o componente responsável pela adsorção de água, a hemicelulose, é degradado. É um constituinte de baixa densidade energética, devido à retenção de água no biocombustível, o que é indesejável para fins energéticos. Em termos práticos, isso significa que o aumento da degradação de compostos hidrofílicos não representa um ganho significativo em termos de prevenção da degradação microbiana da biomassa torrada, devido à água presente no material.

As médias de HHV obtidas foram consistentes com as encontradas na literatura (DOAT, 1985; ARIAS *et al.*, 2008; FELFLI *et al.*, 2005). O aumento do HHV deve-se à maior concentração de carbono fixo verificada na biomassa torrada (PARIKH *et al.*, 2005). O aumento do carbono fixo está intrinsecamente associado à redução de materiais voláteis. No entanto, o aumento progressivo da temperatura reduz gradativamente o rendimento gravimétrico e, consequentemente, reduz o rendimento energético final do biocombustível sólido, uma vez que aumenta a liberação de materiais constituintes voláteis da biomassa *in natura*. As perdas de matéria volátil em função da temperatura do tratamento térmico para as respectivas amostras de biomassa determinam o rendimento gravimétrico de cada procedimento.

O mamão foi a biomassa que apresentou pior rendimento gravimétrico resultante dos processos de torrefação. Um ligeiro aumento no HHV pode ser observado após o processo de torrefação, em função da concentração de carbono fixo. O aumento do HHV para biomassa torrada variou, em média, de 21,3% (casca de cacau) a 31,6% (bagaço de cana), enquanto o mamão apresentou aumento de apenas 9,7%. Esse mau resultado pode ser justificado por outro agravante, as altas concentrações de cinzas. O mamão foi a única biomassa a apresentar teor de



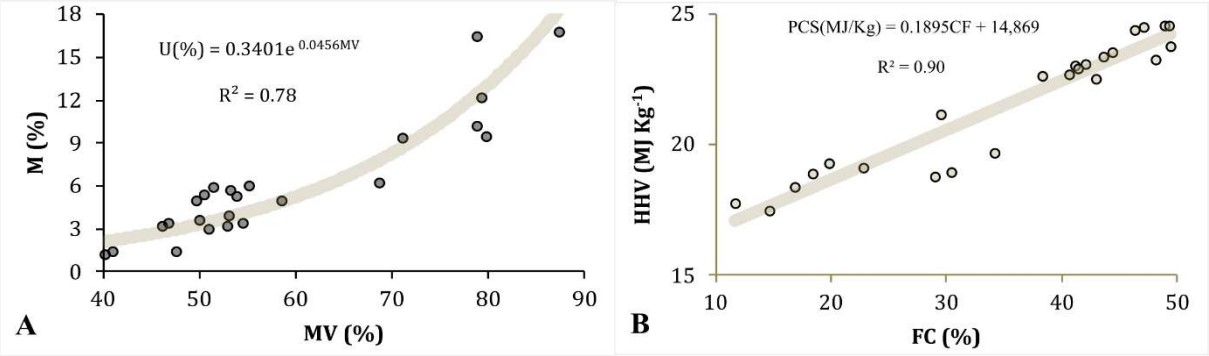
v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

cinzas superior a 15,0%, sendo o próximo início da casca do cacau a 250°C, com teor de cinzas de 11,5%.

A função obtida a partir da correlação entre carbono fixo e HHV (Figura 1), possibilita extrapolar o potencial energético das biomassas, dado seu alto coeficiente de determinação. A biomassa encontrada na natureza com teor fixo de carbono próximo a 5% teria um potencial energético relativo de 16,45 $MJKg^{-1}$, enquanto uma amostra climatizada termicamente que atingisse concentrações de carbono fixo próximas a 70% teria um potencial energético estimado em aproximadamente 28,00 $MJKg^{-1}$.

Figura 1 - (A) Correlação entre o teor de umidade (M) em função da concentração de material volátil (MV) e (B) Entre o teor de carbono fixo (FC) e o maior valor de aquecimento (HHV) da casca do amendoim (*Arachis hypogaea* L.), casca do cacau (*Theobroma cacao* L.), bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), coco (*Cocos nucifera* L.), fibra de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) e biomassa de mamão (*Carica papaya* L.).




**Elaboração:** Dos autores, 2022.

A eficiência de massa e a eficiência energética tendem a diminuir com o aumento da temperatura, com parte da energia dissipada pelos gases produzidos durante o processo de torrefação. Segundo Araújo (2004), a celulose é degradada em uma faixa de temperatura de 240°C a 400°C, causando a liberação de CO, $CO_2$ e $H_2O$.

A casca de coco e o bagaço de cana-de-açúcar apresentaram alterações semelhantes, com ganho significativo de HHV para a biomassa torrada a 240°C em relação àquela torrada a 230°C. Para o mamão e a fibra da palma, houve aumento do HHV quando a biomassa foi submetida ao tratamento térmico a 250°C. Ao contrário do que aconteceu com a casca de cacau, houve um aumento repentino na concentração de cinzas. Outra exceção para o mamão foi que o teor de minerais foi reduzido.



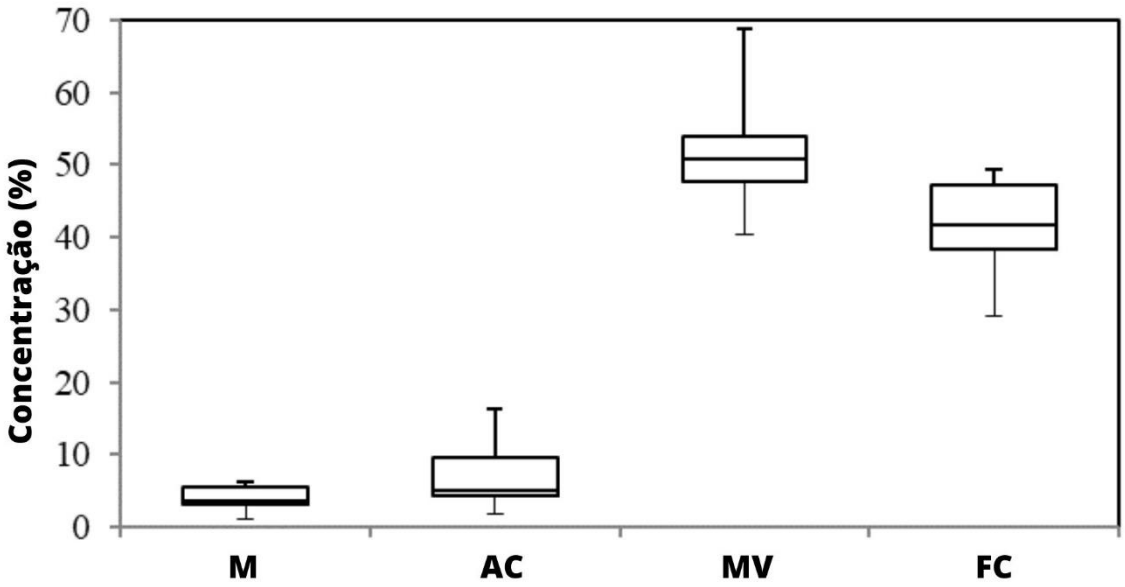
v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

O teor de cinzas aumentou após o processo de torrefação, sendo indesejáveis valores acima de 7%, pois podem causar alguns transtornos durante a combustão do combustível, como a queima parcial, o que pode fazer com que partículas sólidas se movimentem e aumentem as incrustações na parte interna da caldeira de combustível, reduzindo sua eficiência (VIEIRA, 2012). Neste estudo, a casca do cacau e o mamão apresentaram resultados insatisfatórios.

Os quartis correspondentes foram simétricos quanto à dispersão dos dados (Figura 2), com a dispersão aumentando para o valor mínimo, devido à maior degradação dos compostos da casca do cacau em altas temperaturas (240°C e 250°C) e, principalmente, para o valor máximo, onde foi registrada a maior discrepância entre as medidas, com o bagaço de cana-de-açúcar a 230°C retendo 68,7% de sua matéria volátil. Para entender o tamanho da discrepância, a segunda maior retenção foi encontrada para a casca de coco a 230°C, com teor de 58,5%.

Figura 2 - Dispersão dos dados das análises imediatas da biomassa torrada da casca de amendoim (*Arachis hypogaea* L.), casca de cacau (*Theobroma cacao* L.), bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), *coco* (Cocos nucifera L.), *fibra de palma* (*Elaeis guineensis* Jacq.) *e* mamão (*Carica papaya* L.). M - teor de umidade; MV- teor de material volátil; AC - teor de cinzas; CF - teor de carbono fixo.




**Elaboração:** Dos autores, 2022.

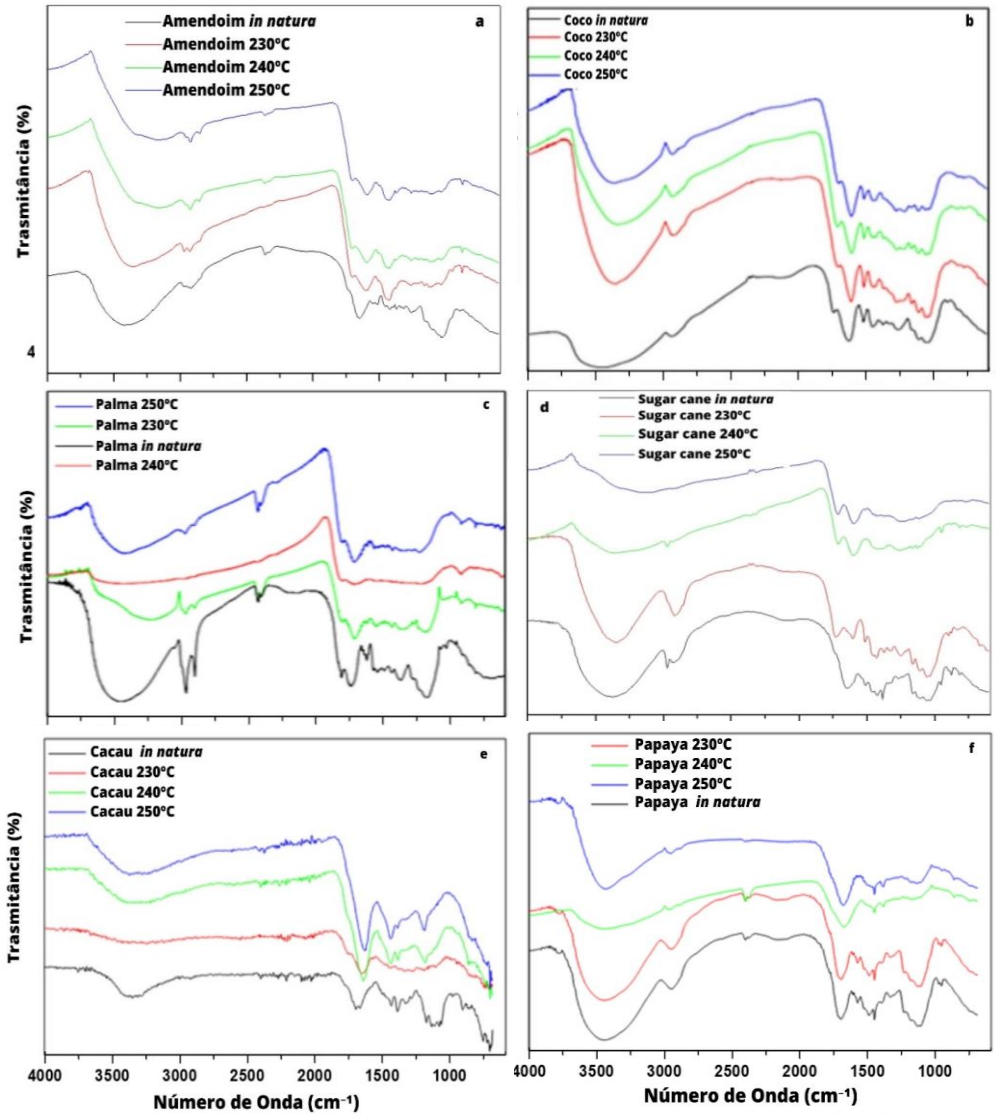
A degradação da hemicelulose durante o condicionamento térmico da biomassa pode ser verificada a partir dos espectros de absorção no infravermelho (Figura 3), observando-se suas respectivas mudanças estruturais e comparando-se as bandas nos espectros em diferentes temperaturas de torrefação. Nota-se diminuição significativa das bandas que remetem à hemicelulose (1075 $cm^{-1}$). A intensidade da transmitância aumenta com o aumento da temperatura de torra, sinalizando um aumento na degradação da hemicelulose.



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

Figura 3 - Espectroscopia no infravermelho (FTIR) de (a) cascas de amendoim (*Arachis hypogaea* L.), (b) coco (*Cocos nucifera* L.), (*c*) fibra de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), (d) bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), (*e*) casca de cacau (*Theobroma cacao* L.) e (f) mamão (*Carica papaya* L.).




**Elaboração:** Dos autores, 2022.

Outra banda que permite verificar a degradação da hemicelulose é a faixa de 3200 a 3500 $cm^{-1}$, que corresponde aos radicais hidroxila. Gonçalves *et al.* (2014) e Brígida *et al.* (2010) relataram perfis de transmitância para a fibra de coco verde semelhantes ao ilustrado na Figura 3, que também apresenta alguns dos picos destacados, com diferentes perfis relacionados a cada pré-tratamento. No comprimento de onda de 3348 $cm^{-1}$, ocorre a deformação axial do grupo (O-H), resultante da estreita vibração de celulose e lignina na fibra. Outros picos podem ser vistos em 2917 $cm^{-1}$, causados por vibrações de deformação axial do grupo (C-H); a 1727 $cm^{-1}$, relacionada às propriedades da carbonila (C=O) atribuídas à hemicelulose; e a 1243 $cm^{-}$



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional
REVISTA DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
ISSN 2674-8703
CEEINTER
CENTRO DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
www.portalceeinter.com.br

[1], devido às ligações (C-O) de ésteres, éteres e compostos fenólicos, como ceras ou extraíveis. A ausência de picos na região do comprimento de onda de 1370 a 1390 $cm^{-1}$ refere-se à estrutura simétrica e à deformação assimétrica da celulose e hemicelulose, indicando que celulose e hemicelulose estão mais expostas na superfície da fibra.

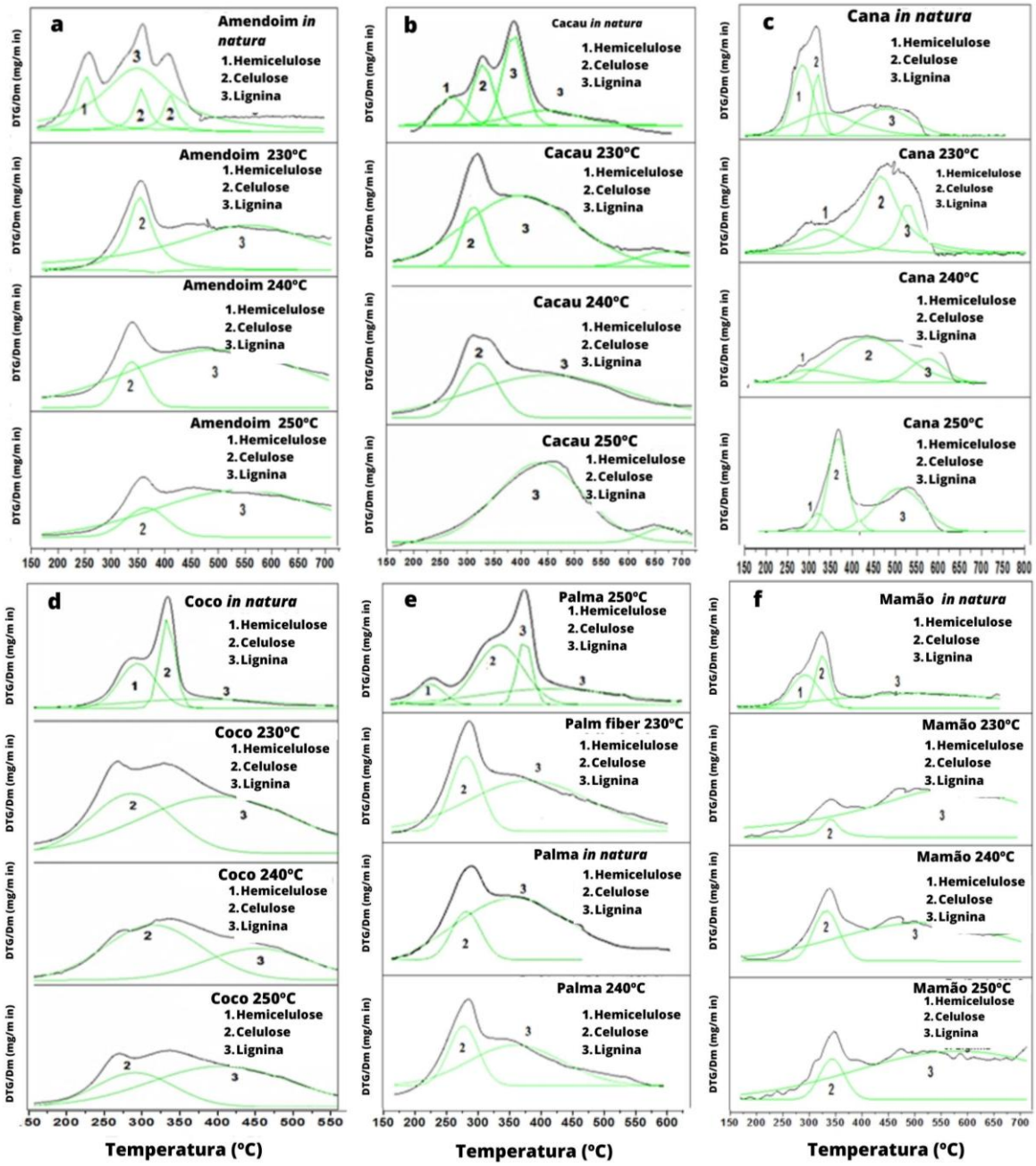
O único espectro não disponível para análise dos dados foi o das cascas de amendoim torradas a 250°C. Entretanto, a partir dos espectros obtidos das amostras nas temperaturas de 230°C e 240°C, é possível estimar maior transmitância nas bandas de 1075 $cm^{-1}$ e 1740 $cm^{-1}$, relacionada à degradação da hemicelulose.

A hemicelulose é formada a partir de polissacarídeos que contêm muitos grupos hidroxila e, devido à presença de ligações de hidrogênio nesses grupos, quanto mais hemicelulose for encontrada na composição da biomassa, maior será a absorção de água e menor será seu valor de aquecimento. As curvas TG (Figura 4) mostram as estimativas teóricas quanto à decomposição dos principais macrocomponentes das biomassas estudadas. Para todas as biomassas, a degradação da hemicelulose é representada pela curva 1, a celulose está associada à curva 2 e a lignina é representada pela curva 3.

Figura 4 - Termogravimetria derivada (DTG) e deconvolução (Dm) para amostras de resíduos de biomassa *in natura* e torrefeita de (a) casca de amendoim (*Arachis hypogaea* L.), (b) casca de cacau (*Theobroma cacao* L.), (*c*) bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), (d) coco (*Cocos nucifera* L.), (*e*) fibra de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.), e (f) mamão (*Carica papaya* L.) nas temperaturas de 230°C, 240°C e 250°C.



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional
REVISTA DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
ISSN 2674-8703
CEEINTER CENTRO DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
www.portalceeinter.com.br




**Elaboração:** Dos autores, 2022.

A estimativa de produtos de desvolatilização por meio de curvas de termogravimetria derivada (DTG) também aponta para uma diminuição na porcentagem de hemicelulose na biomassa após a torrefação, como esperado, mostrando mais uma vez que o tratamento térmico contribui para o aumento do HHV para os resíduos em estudo. De acordo com as curvas de deconvolução, os materiais de biomassa *in natura* apresentam os picos mais acentuados para hemicelulose. No entanto, após a torrefação a 230°C, os picos só são perceptíveis para o bagaço de cana-de-açúcar.



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional
REVISTA DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
ISSN 2674-8703
CEEINTER CENTRO DE ESTUDOS INTERDISCIPLINARES
www.portalceeinter.com.br

Os macrocomponentes (hemicelulose, celulose e lignina) foram quantificados por análise termogravimétrica. Depois da celulose, a lignina é a macromolécula mais abundante que existe na biosfera. É definida como uma substância hidrofóbica, com estrutura tridimensional, amorfa e altamente ramificada (SILVA, 2010). É o terceiro componente principal da parede celular vegetal, correspondendo entre 20 e 30% do material. A lignina é sintetizada a partir de três precursores monoméricos: álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-coumaringílico (NASCIMENTO, 2006).

Os dados obtidos a partir da integração sob as curvas dos gráficos suportam a tendência de degradação da hemicelulose, demonstrando que, em temperaturas mais elevadas, sua presença torna-se imperceptível. Isso possibilita identificar a temperatura de torrefação adequada para a obtenção de biocombustível sólido com o maior rendimento energético possível. Neste caso, temperaturas de torrefação de até 230°C mostraram-se suficientes para degradar toda a hemicelulose para a maioria das biomassas, com apenas uma exceção: o bagaço de cana-de-açúcar. Esse material, no entanto, confirmou a degradação da hemicelulose em função da temperatura de torra.

Arias *et al.* (2014) utilizaram a análise termogravimétrica para estudar a reatividade de amostras de biomassa no ar, tendo também encontrado apenas dois picos na curva para biomassa torrada. Chen e Kuo (2014) mencionaram as vantagens de analisar materiais torrificados por meio da termogravimetria, devido à grande precisão com que é possível medir a perda de peso da biomassa, o que foi altamente relevante para os autores, que estavam especialmente interessados no impacto dos processos de torrefação e pirólise sobre as estruturas lignocelulósicas das biomassas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A torrefação dos resíduos de biomassa apresentou-se como uma técnica eficiente para melhorar as características energéticas dos biocombustíveis sólidos, com destaque para o aumento do poder calorífico superior, identificado através de análises químicas imediatas. O estudo revelou que, além de otimizar o potencial energético, o tratamento térmico proporcionou uma redução significativa da hemicelulose, como confirmado pelas análises de termogravimetria e espectroscopia no infravermelho, tornando a biomassa mais resistente à degradação microbiana e, portanto, adequada para armazenamento prolongado.

Outro aspecto importante observado foi a viabilidade de utilização de resíduos agroindustriais amplamente disponíveis, como os estudados, para a geração de energia



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

renovável. Ao explorar essas biomassas residuais, o estudo abre caminho para uma abordagem sustentável e circular, onde materiais tradicionalmente descartados podem ser reaproveitados como fontes de energia limpa. Isso não apenas contribui para a diversificação da matriz energética, mas também mitiga o impacto ambiental, ao evitar a disposição inadequada de resíduos.

O desenvolvimento de biocombustíveis sólidos a partir dos resíduos, como utilizados nesta pesquisa, combinado ao uso de aglutinantes industriais como glicerina residual e licor negro, oferece uma oportunidade promissora de aumentar ainda mais o rendimento energético desses materiais. A aplicação de tais técnicas pode ampliar o uso de biomassa como uma alternativa viável e eficiente para os combustíveis fósseis, alinhando-se às metas globais de redução de emissões de gases de efeito estufa e promovendo uma transição para fontes de energia mais sustentáveis e menos poluentes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio material e financeiro obtido por meio dos programas institucionais promovidos pelo PRPGI/IFBA (Edital Nº 19/2020/PRPGI/IFBA e Edital N° 14/2022/PRPGI/IFBA), bem como ao PRPGI/IFBA/FAPESB pela concessão da bolsa PIBIC.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. V. C.; LEITE, J. A. N.; PAES, J. B. Estimativa da produção de biomassa de um povoamento de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret. com cinco anos de idade. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 347-352, 2004.

ARIAS, B. et al. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.09.002

ASTM - American Society For Testing and Materials. **ASTM, D. 1102-84**: Standard test method for ash solubility of wood. American Society for Testing and Materials. Estados Unidos da América. 2001. https://www.astm.org/d1102-84r21.html

ASTM - American Society For Testing and Materials. **ASTM, E. 871-82**: Standard Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. Estados Unidos da América. 2019a. https://www.astm.org/e0871-82r19.html

ASTM - American Society For Testing and Materials. **ASTM, E. 872-82**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. Estados Unidos da América. 2019b. Available at: https://www.astm.org/e0872-82r19.html



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

BUTT, O. M.; ZULQARNAIN, M.; BUTT, T. M. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 1, 2020. https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004

CAO, L. et al. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets. v. 185, p. 254–262, 2015. **Bioresource Technology**, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.045

DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 2, p. 157–175, 2000. https://doi.org/10.1016/s1364-0321(99)00011-8

EDWARDS, P. M. Origin 7.0: Scientific Graphing and Data Analysis Software. **Journal of Chemical Information and Computer Sciences**, v. 42, n. 5, p. 1270–1271, 2002. https://doi.org/10.1021/ci0255432

FAVERO, A.; DAIGNEAULT, A.; SOHNGEN, B. Forests: Carbon sequestration, biomass energy, or both? **Science Advances**, v. 6, n. 13, p. eaay6792, 2020. https://doi.org/10.1126/sciadv.aay6792

GIL, M. V. et al. Grindability and combustion behavior of coal and torrefied biomass blends. **Bioresource Technology**, v. 191, p. 205–212, 2015. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.117

GUERRA, P. J. C. A cana-de-açúcar e a sustentabilidade: desafios para a readequação do setor sucroenergético nos estados das antigas capitanias do norte. **Revista de Estudos Interdisciplinares**, v. 4, n. 5, p. 77–88, 2023. https://revistas.ceeinter.com.br/revistadeestudosinterdisciplinar/article/view/474.

GRUBLER, A. et al. A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. **Nature Energy**, v. 3, n. 6, p. 515–527, 2018. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6

IEA - International Energy Agency. **World Energy Outlook 2022**: Analysis. 2022. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022

IONASHIRO M, GIOLITO I**. Nomenclatura, padrões e apresentação dos resultados em análise térmica**. 1980. http://www.labcat.unb.br/images/PDF/Aulas/AnalisesTermicas-Nomenclatura-ABRATEC.pdf

KHAN, H.; KHAN, I.; BINH, T. T. The heterogeneity of renewable energy consumption, carbon emission and financial development in the globe: A panel quantile regression approach. **Energy Reports**, v. 6, p. 859–867, 2020. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.002

MAO, G. et al. Research on biomass energy and environment from the past to the future: A bibliometric analysis. **Science of The Total Environment**, v. 635, p. 1081–1090, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.173

MICROSOFT. Microsoft 365. **Excel**. 2023. https://www.microsoft.com/microsoft-365



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703

MME - Ministério de Minas e Energia. **Relatório Síntese** - Balanço Energético Nacional 2021. Sistema de Informações Energéticas (SIE Brasil). Ministério de Minas e Energia, Brasília, Brazil. 2021. https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/

MME - Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira**: oferta e demanda da energia, instalações elétricas, energia no mundo. MME, Brasília, Brazil. 2020. http://antigo.mme.gov.br/web/guest/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/resenha-energetica-brasileira

OMER, A. M. Energy, environment and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 12, n. 9, p. 2265–2300, 2008. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.05.001

PANDEY, K. K.; PITMAN, A. J. FTIR studies of the changes in wood chemistry following decay by brown-rot and white-rot fungi. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 52, n. 3, p. 151–160, 2003. https://doi.org/10.1016/s0964-8305(03)00052-0

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S.; GHOSAL, G. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487–494, 2005. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. More efficient biomass gasification via torrefaction. **Energy**, v. 31, n. 15, p. 3458–3470, 2006. https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.008

TORRES, G. A. L. et al. Exposure To Climate Risk: A Case Study For Coffee Farming In The Region Of Alta Mogiana, São Paulo. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, n. suppl 4, e2021137, 2022. https://doi.org/10.1590/0001-3765202220211379

SILVA, A. G. et al. Estudo do processo de torrefação de resíduos de biomassas para fins energéticos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)**, n. 45, p. 86–99, 2017. https://doi.org/10.5327/Z2176-947820170230

ZHANG, C. et al. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. **Applied Energy**, v. 220, p. 598–604, 2018. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.129



v. 6, n. 2, jan.-dez. 2024.
Esta obra está sob licença
Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional

ISSN 2674-8703