

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

MARINA PASSOS DE SOUZA

**USO DE NOVAS FONTES DE BIOMASSA NA FABRICAÇÃO DE
PELLETS AROMÁTICOS PARA A DEFUMAÇÃO DE
ALIMENTOS**

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2023

MARINA PASSOS DE SOUZA

**USO DE NOVAS FONTES DE BIOMASSA NA FABRICAÇÃO DE
PELLETS AROMÁTICOS PARA A DEFUMAÇÃO DE
ALIMENTOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2023

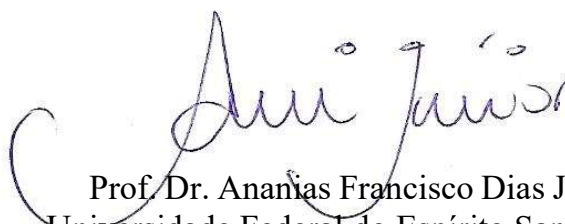
MARINA PASSOS DE SOUZA

**USO DE NOVAS FONTES DE BIOMASSA NA FABRICAÇÃO DE
PELLETS AROMÁTICOS PARA A DEFUMAÇÃO DE
ALIMENTOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 11 de dezembro de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente



GABRIELA FONTES MAYRINCK CUPERTINO
Data: 15/12/2023 21:20:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DSc's Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo

Documento assinado digitalmente



CARLOS ROGERIO ANDRADE
Data: 15/12/2023 20:53:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Rogério Andrade
Universidade Federal de Jataí

À minha família, Mafalda, Mariangela, Mauro e Mariana.

Com todo meu amor, dedico.

“São as nossas escolhas que revelam o que realmente somos, muito mais do que as nossas qualidades.”

(Alvo Dumbledore, J K Rowling)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por me dar forças e iluminar meu caminho durante a minha vida e a Nossa Senhora Aparecida por sempre passar à frente das minhas batalhas.

À minha família, em especial minha mãe Mariangela Passos, meu pai Mauro Luiz, minha avó Mafalda Orletti, minha irmã, Mariana Passos, e a minha prima Stefanny Buzetti, minha irmã do coração, por sempre acreditarem em mim, torcerem e me apoiarem em todos os momentos. Ao meu namorado, João Marcelo, por todo amor, apoio e parceria de todos os dias.

Aos melhores presentes que a graduação me deu, meus amigos. Ao meu trio de ouro, Gustavo e Paulo Roberto, por estarem comigo em todos os momentos, eu não seria a mesma sem a amizade de vocês. Às minhas grandes amigas e parceiras de graduação Mikaely e Tayná por dividirem comigo as duplas, os estudos, as noites mal dormidas, mas também o companheirismo, as risadas e os momentos de alegria. Aos meus grandes amigos Ricardo, Ana Flávia, Liliana, Brenno, Sabrina, Williana, João Pedro, Jéssica Terra, Maria Iasmin, à turma de Engenharia Florestal 2018/1 pela família que criamos, a turma de 2019/1 e aos demais amigos que fiz em minha passagem pela UFES. Lembrarei de todos.

À Floema Júnior, por ter sido uma das minhas experiências mais desafiadoras e gratificantes na graduação, e aos amigos que ela me proporcionou, em especial Lorrainy e Raul.

Às minhas amigas do coração, que mesmo longe se fizeram presentes a todo momento em minha vida, Ana Laura, Maria Eduarda, Ivana, Thammy, Josiane e Letícia. E também aos meus queridos Júlio e Bruno, por me acompanharem mesmo à distância.

A Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) campus de Alegre. Aos professores do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em especial ao meu orientador, professor Ananias Francisco Dias Júnior, agradeço pela orientação, dedicação e paciência. Seus ensinamentos e confiança foram essenciais para o meu crescimento.

Ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB) e os integrantes do grupo de pesquisa em Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal (BioEp) em especial Gabriela C., pela gentileza e acolhida de sempre, Álison, João U., Elias, Alfredo, Allana e todos os demais que me ajudaram tanto nessa caminhada. Os guardo afetivamente como melhor equipe e laboratório.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha trajetória.

Muito obrigada!

RESUMO

Na defumação, o alimento é exposto à fumaça resultante da combustão parcial da lenha, visando preservar e modificar certos aspectos sensoriais. Os pellets aromáticos são uma das alternativas à utilização de lenha para defumação, visto que resolvem algumas questões como a falta de homogeneidade e padrão no combustível e baixa densidade, além de facilitar a logística de carregamento, reduzindo os altos custos de transporte. A peletização da biomassa lignocelulósica representa uma fonte de combustível mais limpa e sustentável quando comparada à madeira em toras ou lascas, além de possibilitar o uso de matérias-primas pouco convencionais, como resíduos não madeireiros ou a mistura de diferentes espécies. Propriedades da matéria-prima, como a presença de extrativos ou materiais voláteis, podem conferir características únicas aos alimentos, como aroma, cor e sabor, além de elevado potencial energético. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo investigar as propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas de pellets produzidos a partir diferentes tipos de biomassa lignocelulósica pouco convencionais, as biomassas residuais de pericarpo de *Dipteryx alata* e bagaço de *Citrus sinensis* e as biomassas lenhosas de *Carya illinoensis*, *Citrus sinensis* e *Psidium guajava*, visando destiná-los à defumação de alimentos. Foram investigadas nos pellets as características de diâmetro, comprimento, densidade a granel, teor de umidade, composição química imediata e estrutural, dureza mecânica, durabilidade e porcentagem de finos, índice de combustibilidade, poder calorífico e densidade energética. Nos casos de diferenças significativas entre os tratamentos, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey. Foi observada elevada quantidade de carbono fixo (> 21%) e extrativos (> 38%) nas biomassas residuais não lenhosas, enquanto maior densidade energética foi observada nas biomassas lenhosas (> 11,5 GJ m³). Com relação ao teor de materiais voláteis, os teores variaram de 74,11% a 81,60%. As características observadas podem ser uma vantagem na busca por produtos diferenciados, pois podem conferir um sabor defumado único. Os pellets estudados demonstraram potencial para sua utilização como pellets aromáticos no processo de defumação.

Palavras-chave: Biomassa moderna; atributos sensoriais dos alimentos; fumaça, defumação.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1 Biomassa como fonte de energia	15
3.2 Pellets na defumação de alimentos	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1 Produção e avaliação dos pellets.....	19
4.2 Delineamento experimental e análise de dados	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
6. CONCLUSÃO.....	33
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
APÊNDICES	47
APÊNDICE A	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Médias das variáveis relacionadas às biomassas investigadas.	47
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Pellets produzidos a partir das biomassas investigadas.....	17
Figura 2. Propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas das biomassas investigadas.....	21
Figura 3. Matriz de correlação entre as propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas das biomassas investigadas.....	23
Figura 4. Densitometria de raio-X dos pellets avaliados	25
Figura 5. Relação entre a durabilidade mecânica e a produção de finos dos pellets investigados.....	27
Figura 6. Relação entre a máxima temperatura atingida e o ICOM dos pellets investigados.....	30

1. INTRODUÇÃO

A defumação de alimentos é uma das técnicas mais antigas do mundo para a preservação de alimentos, datada desde os primórdios da humanidade. O homem pré-histórico observou que a caça quando colocada próximo ao fogo, além de protegê-la de outros animais, demorava mais a se deteriorar, surgindo então a conservação por defumação (Dionysio *et al.*, 2008; Moreira, 2011). Neste método, os alimentos são expostos à fumaça aprisionada gerada a partir da degradação térmica da madeira, que ao passo em que reduz o teor de umidade, causando a desidratação, também confere aos alimentos a impregnação de componentes antioxidantes e antimicrobianos (Chang *et al.*, 2021; Chu *et al.*, 2019; Li *et al.*, 2018; Sivendiran *et al.*, 2018; Soladoye *et al.*, 2017). O efeito da fumaça na defumação é relevante devido à influência no sabor e aroma diferenciados instituídos aos alimentos, principalmente pela utilização de árvores frutíferas e madeiras que proporcionam sabores específicos (Hitzel *et al.*, 2013). Amplamente utilizada em carnes, queijos, peixes e temperos, a defumação proporciona características sensoriais únicas, como cor, aroma, sabor e textura aos alimentos (Ledesma *et al.*, 2017; Sokamte tegang *et al.*, 2020).

As características organolépticas adicionadas aos alimentos dependem do teor de umidade da madeira utilizada, da temperatura e do método de defumação e, mais importante, do tipo de madeira utilizada, visto que cada madeira gera um aroma específico, desde os mais adocicados aos pungentes ou amadeirados, proveniente de sua composição variada (Ledesma *et al.*, 2017; Saldaña, 2019; Sokamte tegang *et al.*, 2020). A utilização de toras e lascas de madeira foi, durante muito tempo, a única alternativa disponível para a prática de defumação. Contudo, à medida que a pesquisa avança, diversas fontes de biomassa passaram a ser exploradas para esse fim. Assim, é possível substituir a madeira sólida por combustíveis modernos compactados, produzidos tanto a partir de diferentes espécies de madeiras, quanto por resíduos não madeireiros, aproveitando mais propriedades como a presença de seus componentes químicos ou a mistura de diferentes materiais, que podem ou não receber um pré-tratamento (Lang *et al.*, 2023; Siwale *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023).

Entre os combustíveis compactos modernos, os pellets destacam-se. Esses são obtidos por meio do processo de peletização, que consiste na aplicação de alta temperatura e pressão em partículas finas de biomassa, resultando em um produto mais estável e uniforme, conhecido como pellet (Siyal *et al.*, 2021). A utilização de pellets na defumação resolve algumas das questões relacionadas à utilização de biomassa como fonte de combustível. Problemas como falta de homogeneidade, baixa densidade e tamanhos variados podem ser superados, além de a forma padronizada facilitar a logística de carregamento, reduzindo os altos custos de transporte (Acampora *et al.*, 2021).

Comparado à madeira, o pellet destaca-se pelo seu significativo potencial energético. Isso é atribuído ao menor teor de umidade e à alta densidade a granel, resultando na liberação de mais energia por unidade de volume. Consequentemente, isso não apenas aumenta a eficiência, mas também a usabilidade do pellet como combustível sólido (Stachowicz e Stolarski, 2023). Propriedades como poder calorífico, teor de carbono fixo, teor de cinzas e materiais voláteis presentes na biomassa possuem forte relação com o desempenho da queima, influenciando no calor gerado para cozimento e na fumaça gerada para a defumação. Com base nessas propriedades, a taxa de transferência de energia e o fluxo de calor podem variar, resultando em diferentes tempos necessários para que os produtos atinjam a temperatura ideal e o ponto de consumo para cada tipo de biomassa utilizada (Borowski *et al.*, 2017; Dias Júnior *et al.*, 2015).

Os pellets energéticos são frequentemente produzidos a partir de madeira de serraria, especialmente das espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, representando uma forma eficaz de aproveitar resíduos e agregar valor (Siwale *et al.*, 2022; Stolarski *et al.*, 2022). O Brasil se destaca pelo amplo potencial inovador em relação à matéria-prima para a produção de pellets, dado o considerável volume diário de resíduos agrícolas e florestais gerados no país, (Fortes, 2022), material que poderia ser mais bem aproveitado com sua densificação energética (García *et al.*, 2019; Nath *et al.*, 2023). Contudo, os pellets quando produzidos para fins comerciais precisam passar por diversos tipos de certificação como a *DINPlus* e *ENPlus*, em que as normas dividem os pellets em classes, de acordo com suas características física, químicas e energéticas. A certificação em uma

das normas, automaticamente atesta que os pellets estão dentro dos parâmetros da ISO 17225 – 2 (Rangel *et al.*, 2018), norma que descreve os limites de característica do produto, como exemplo o teor de umidade, que para ambas as certificações deve ser \leq 10% do peso total do pellet e a durabilidade mecânica \geq 97,5% (ISO, 2021).

A biomassa utilizada na produção de pellets pode ser combinada com outras matérias-primas de interesse para a indústria alimentícia (Jelonek *et al.*, 2021). Essa prática confere uma característica aromática às misturas, formando blends que proporcionam ao consumidor a opção de escolher entre diversas alternativas para intensificar as características desejadas do alimento. Isso inclui desde notas mais doces até sabores mais aromáticos, amadeirados e defumados, variando de acordo com a espécie utilizada como matéria-prima.

Diante deste cenário, surgem diversas oportunidades para variar as matérias-primas de biomassa utilizadas na produção de pellets. Tanto culturas destinadas à produção de energia quanto resíduos de processamento oferecem opções, permitindo manter uma qualidade superior e atender aos padrões internacionais (García *et al.*, 2019; Mack *et al.*, 2019; Resende, 2017; Souza *et al.*, 2020; Tsuchiya e Yoshida, 2017). Ademais, a utilização de biomassas não convencionais a exemplo do bagaço de laranja, garante a valoração e o aproveitamento de resíduos que ainda são subutilizados, bem como promove a economia circular e reduz os impactos negativos de toda uma cadeia produtiva (Fortes, 2022).

O Brasil é o maior produtor de suco de laranja do mundo (Moura, 2021), com 17 milhões de toneladas de laranjas produzidas em 2022, sendo o estado de São Paulo líder em produção, responsável por 76% desse total (IBGE, 2022). Devido a essa expressividade do setor muitos resíduos são gerados, desde as podas nos pomares de laranja (*Citrus sinensis*), quanto ao aproveitamento da polpa que gera de 50% a 60% do peso da laranja em resíduos de casca e bagaço (Gouveia, 2023; Porto *et al.*, 2021), sem uma destinação adequada.

A castanha de baru (*Dipteryx alata*) tem sido uma oportunidade de renda extra para comunidades da região do Centro-oeste do Brasil (Costa *et al.*, 2022; Vale e Olsen, 2013). No processo de extração da castanha, são gerados resíduos de processamento

numa proporção de aproximadamente 870 kg de resíduo para 1 tonelada de fruto, que são descartados sem um fim específico (Costa *et al.*, 2022).

O cultivo da noqueira pecan (*Carya illinoensis*) no Brasil tem como principal objetivo a obtenção de seu fruto, a noz pecan (Barros *et al.*, 2018). Contudo, para a garantia de um pomar produtivo, são necessárias podas periódicas, visando o equilíbrio entre a parte produtiva e vegetativa a fim de aumentar o número de frutos produzidos (Lima *et al.*, 2019), o que gera grande quantidade de resíduos que são descartados sem um aproveitamento adequado (Ribeiro *et al.*, 2022).

A produção de goiaba (*Psidium guajava*) no Brasil ocorre durante todo o ano, porém com os períodos de safra concentrados de janeiro a março (Maia, 2021). Para garantir a produção contínua ao longo do ano, é imprescindível que sejam feitas podas regulares após a colheita dos frutos, para garantir uma arquitetura adequada da árvore, mais baixas e arejadas, a fim de diminuir a incidência de pragas (Souza *et al.*, 2022). A técnica de poda gera uma quantidade considerável de resíduos, frequentemente utilizados apenas como lenha, sem ter seu potencial inteiramente explorado.

Neste contexto, os pellets aromáticos, produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa como as citadas acima para defumação, constituem uma fonte de combustível eficiente e limpa, proporcionando versatilidade e sabores distintos aos alimentos. Acredita-se que pellets apresentem alto desempenho energético aliado à melhoria das características físicas, químicas, tecnológicas e sensoriais dos alimentos, e ainda um melhor desempenho em produtividade, rendimento e sabor através da fumaça gerada. Com isso, este estudo teve como objetivo investigar as propriedades físicas, químicas e térmicas de pellets produzidos a partir das biomassas lenhosas de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava* e *Carya illinoensis*, e nas biomassas residuais de bagaço de *Citrus sinensis* e pericarpo de *Dipteryx alata*, a fim de avaliar seu potencial energético e a viabilidade de uso na defumação de alimentos.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar as propriedades dos pellets originados de variedades de biomassa lignocelulósica pouco convencionais, com o objetivo de direcioná-los para o processo de defumação de alimentos.

2.2 Objetivos específicos

- i. Produzir e avaliar pellets utilizando as biomassas lenhosas de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava* e *Carya illinoensis*, e os resíduos de processamentos bagaço de *Citrus sinensis* e pericarpo de *Dipteryx alata*.
- ii. Analisar as características físicas, químicas, térmicas e energéticas dos pellets e avaliar seu potencial aromático.
- iii. Contribuir com ações para incorporação das qualidades exigidas pelas normas internacionais ao sistema produtivo de pellets a ser destinado para uso na defumação de alimentos.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Biomassa como fonte de energia

A biomassa é uma das fontes de energia mais abundantes na natureza. A extensa cobertura florestal e as condições edafoclimáticas favoráveis que o Brasil possui favorecem a produção de biomassa vegetal no país, sem que esteja ligada exclusivamente à agricultura convencional, de forma a se tornar uma alternativa na substituição de combustíveis fósseis e ajuda a mitigar as emissões de gases do efeito estufa (Borges *et al.*, 2017; Camargo e Camargo, 2020; Fortaleza *et al.*, 2019; Gori *et al.*, 2013). Diversos recursos podem ser empregados como biomassa vegetal, tornando fundamental uma abordagem consciente em sua utilização. Buscar a preservação dos produtos lenhosos, dos serviços ambientais e a multifuncionalidade das florestas torna-se imperativo nesse processo (Sacchelli *et al.*, 2013).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023), a biomassa representa 8% da matriz elétrica brasileira, e cerca de 41% da energia utilizada pelas indústrias brasileiras em 2022 foi obtida através de biomassa, incluindo lenha, bagaço de cana, carvão vegetal e lixívia. Além das biomassas tradicionalmente utilizadas, existem outros recursos de alto valor energético com potencial para geração de energia, em sua maioria resíduos orgânicos como palha, folhas, gramíneas, tocos, galhos, casca de arroz e resíduos das madeireiras (Evaristo *et al.*, 2020; Gomes *et al.*, 2020; Pedroso *et al.*, 2018; Sousa *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2021b).

Dado seu papel de destaque nos setores agrícola e florestal, o Brasil detém um expressivo potencial na geração de resíduos lignocelulósicos, os quais podem ser eficazmente aproveitados como fonte de biomassa. Neste cenário, a valorização energética desses resíduos se torna indispensável, em vista do grande apelo ambiental e da eficiência econômica do processo produtivo, além de fomentar uma matriz energética mais limpa e renovável (Resende, 2017). Uma das formas de aproveitamento desses materiais é por meio de processos de compactação, como a briquetagem e a peletização, processos que permitem a utilização de biomassas não convencionais na sua produção.

A produção de pellets a partir de biomassa requer que a matéria prima receba um tratamento prévio. A biomassa deve ser seca ao sol ou em ambiente controlado, visando

um teor \leq 12% para madeiras, entre 8 e 15% para palhas e até 25% para herbáceas (Whittaker e Shield, 2017). Além disso, o tamanho das partículas influencia diretamente a qualidade do produto final, impactando na taxa de compactação e na porosidade do pellet, sendo ideal utilizar partículas menores que 3,0 mm (Sá, 2019).

3.2 Pellets na defumação de alimentos

A peletização é o processo de compactação da matéria-prima que tem como produto final os pellets, um dos combustíveis provenientes de biomassa mais utilizados no mundo, grande parte devido ao seu elevado poder calorífico e densidade aumentada (Toscano *et al.*, 2013; Arranz *et al.*, 2015). Os pellets são um tipo de biocombustível sólido, densificado, gerados a partir de partículas de madeira e outras biomassas como resíduos agroindustriais e florestais, com ou sem aditivos, geralmente com formato cilíndrico e comprimento entre 5 e 40 mm (Jakob e Steckel, 2014; Ríos-Badrán *et al.*, 2020). O adensamento da matéria-prima por meio do processo de peletização aumenta sua densidade, resultando na diminuição dos custos associados ao manuseio, armazenamento e transporte. Esse procedimento possibilita uma valoração mais eficiente dos resíduos, adequando a conversão de energia para atender tanto às necessidades industriais quanto residenciais (Camargo e Camargo, 2020; Nguyen *et al.*, 2015).

Uma das principais características dos pellets é sua durabilidade, que pode ser influenciada por diversos fatores, como as propriedades da matéria-prima, o nível de umidade, a redução do tamanho durante as etapas de pré-processamento e as variáveis nos parâmetros do processo de peletização, como a aplicação de ligantes, a combinação de diferentes matérias-primas, as temperaturas e as pressões da matriz produtiva (Alemán-Nava *et al.*, 2014). Além dos benefícios econômicos relacionados aos recursos para produção e transporte, é importante ressaltar que os pellets de biomassa oferecem uma vantagem adicional em termos de eficiência volumétrica. Isso ocorre porque os pellets podem ser fabricados a partir de resíduos facilmente disponíveis e proporcionam uma maior densidade de energia por unidade de volume.

O consumo de pellets como alternativa a combustíveis fósseis se acentuou devido à necessidade dos países em reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) (Cupertino, 2017) e ao aumento dos preços dos combustíveis fósseis no mercado global (ABIMCI, 2022). Conforme Estudo Setorial publicado pela Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI) em 2022, o mercado mundial produziu 43,7 MM ton de pellets em 2020, sendo os Estados Unidos o líder mundial em produção, com 19% do total produzido (8,3 MM ton). Com relação a consumo, o Reino Unido dominou o mercado com 24% do aproveitamento da produção (10,48 MM ton).

Embora a tecnologia dos pellets seja reconhecida globalmente, sua adoção ainda não atingiu uma ampla disseminação no Brasil, configurando-se como um setor em crescente ascensão (ABIMCI, 2022). Assim, indústria nacional de pellets se concentra majoritariamente onde a oferta de matéria-prima, principalmente resíduos como aparas, serragem e maravalha, são mais abundantes, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (ABIMCI, 2022). No mesmo estudo, a ABIMCI demonstrou que, em 2021, o Brasil produziu um total de 700 M ton de pellets, exportou cerca de 345 M ton, principalmente para Itália e Reino Unido, e consumiu 357 M ton do montante produzido. Boa parte do produzido foi consumido internamente, principalmente pelo setor de indústria do agronegócio, para aquecimento de aviários e secagem de grãos, bem como para aquecimento de piscinas, calefação e pela indústria alimentícia, nos fornos e caldeiras industriais (ABIMCI, 2022).

Após anos de pesquisa realizada pela CEE-242, Comissão de Estudos Especial de Pellets, a Associação Brasileira de Normas técnicas - ABNT publicou em 2022 as primeiras normas brasileiras sobre pellets, a NBR 17013-1:2022 - Pellets - Requisitos e classificação - Parte 1: Madeira de pinus e a NBR 17030:2022 - Pellets - Terminologia e método de ensaios (Lignum Latin America, 2022). As normas contam com orientações para produção e entrega dos produtos com qualidade, além de tratar sobre os requisitos e classificações dos pellets. A NBR 17013-1 (ABNT, 2022) divide os pellets em uso residencial e uso comercial, para equipamentos de pequeno e médio porte (Classe A1), e de médio e grande porte (Classe A2) e uso industrial em equipamentos de grande porte (Classe B), e traz demais parâmetros como umidade, dimensões, densidade a granel e

entre outras características. Contudo, focada apenas em pellets produzidos a partir de biomassa oriundas do gênero *Pinus*.

Por ser a maior fatia do mercado consumidor de pellets de madeira, a União Europeia instituiu alguns dos parâmetros internacionais de qualidade de pellets. Com o objetivo de padronizar as certificações de pellets no mercado europeu, em 2014 foi lançada a ISO 17225 – 2, que estabelece os padrões de qualidade para pellets oriundos de biomassa vegetal tanto para uso residencial como industrial (Garcia *et al.*, 2018). Existem certificações, com base na ISO 17225-2 como *DINPlus* e *ENPlus* (Rangel *et al.*, 2018), que atestam a qualidade dos pellets e o classificam de acordo com sua qualidade. Tanto a norma ISO quanto as certificações citadas anteriormente baseiam suas classificações nos seguintes parâmetros: diâmetro, comprimento, teor de umidade, teor de cinzas, durabilidade mecânica, teor de finos, poder calorífico inferior ou poder calorífico útil, densidade a granel, teor de nitrogênio, enxofre, cloro, arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco.

Além de servirem como material de combustão para a geração de energia, os pellets também possuem a versatilidade de serem utilizados também na defumação de carnes em churrascos e na cocção de outros tipos de alimentos em diferentes preparos. A propriedade para a defumação é intrínseca à matéria-prima utilizada na produção do pellet, possibilitando que diversos resíduos sejam incorporados ao processo de fabricação. Isso ocorre devido à presença de uma ou mais substâncias benéficas para a indústria alimentícia, como propriedades antioxidantes, exemplificadas pela noz pecan. Porém, a depender do tipo de biomassa de matéria-prima para sua produção, os pellets também podem possuir substâncias pouco benéficas, como a presença de aldeídos e acetonas, ou vir a produzir monóxido de carbono durante seu armazenamento (Arshadi *et al.*, 2019; Siwale *et al.*, 2022; Svedberg *et al.*, 2008). Assim, a inclusão de outros compostos e ácidos orgânicos agradáveis ao olfato humano durante o processo de peletização não apenas agrega valor ao material, mas também confere ao pellet a capacidade de impulsionar tanto o mercado nacional quanto o internacional (Benelli, 2010; Santos *et al.*, 2008).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Produção e avaliação dos pellets

Neste estudo foram investigadas as biomassas de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava*, *Carya illinoensis*, bagaço de *Citrus sinensis* e pericarpo de *Dipteryx alata* para a produção dos pellets avaliados (Figura 1).

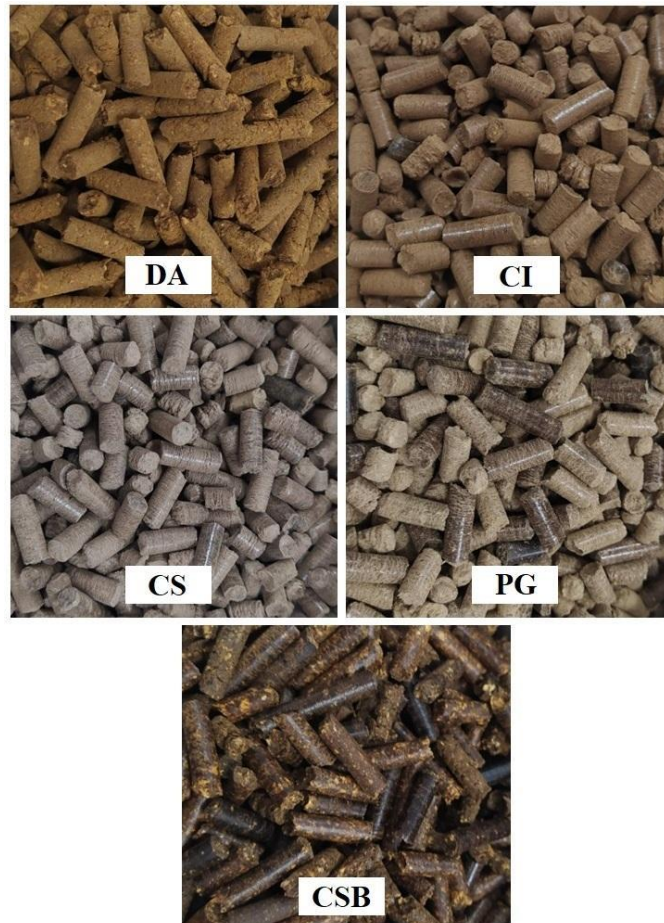


Figura 1. Pellets produzidos a partir das biomassas investigadas. Onde: DA: pericarpo de *Dipteryx alata*; CI: *Carya illinoensis*; CS: *Citrus sinensis*; PG: *Psidium guajava*; CSB: bagaço de *Citrus sinensis*. Fonte: a autora (2023).

Cada biomassa foi peletizada separadamente utilizando um peletizador de laboratório (Eng-Maq, modelo 0400 V, Brasil), potência de 40 HP, capacidade para produzir 400 kg/h, e matriz plana de 6 mm de diâmetro, em que foi retirado o limitador de tamanho dos pellets durante a produção. Foram realizadas análises detalhadas em relação aos cinco tipos de pellets produzidos, abrangendo características como composição química estrutural e imediata, teor de umidade, dimensões, densidade a

granel, microdensitometria, dureza mecânica, durabilidade e porcentagem de finos. Além disso, foram avaliados o poder calorífico, a densidade energética e o índice de combustibilidade, proporcionando uma abordagem abrangente para a caracterização desses materiais. A análise química imediata foi determinada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021a), para a determinação de teor de cinzas, carbono fixo e materiais voláteis das biomassas. Os teores de extrativos e lignina foram determinados de acordo com as normas TAPPI T 204 cm-97 (TAPPI, 2017) e ASTM D1106-21 (ASTM, 2021b), respectivamente, enquanto a holocelulose foi obtida utilizando a Equação 1.

$$HOL (\%) = 100 - (LIG + EXT) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: HOL = holocelulose (%); LIG = lignina total (%); EXT = extrativos totais (%).

A umidade dos materiais foi determinado seguindo a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021a). A dimensão dos pellets (comprimento e diâmetro), foi obtida de acordo com a norma ISO 17829 (ISO, 2015), e a densidade a granel foi medida com base na norma ASTM D5057-17 (ASTM, 2017).

A densitometria dos pellets foi obtida utilizando microdensitômetro de raio-X, com equipamento QMS modelo QDP-01X, com colimação de feixe inicial e final de 180 μm e 90 μm , respectivamente, amostrando cinco pellets por material, seguindo metodologia adaptada de Gonçalves e colaboradores (2018). A análise de dureza foi realizada utilizando um durômetro padrão Shore D, conforme a ASTM D2240-15 (ASTM, 2021c). A análise de durabilidade e porcentagem de finos foi realizada de acordo com a norma EN 15210-1 (DIN, 2010b), em que foram analisados $9,13 \pm 1,03$ g de material por tratamento, em intensidade de 40 rpm durante 12,5 minutos, utilizando um friabilímetro de comprimidos modelo SP-FR, SP Labor, com velocidade de 2 a 40 rpm. Nas Equações 2 e 3 estão ilustrados os cálculos para a determinação da durabilidade mecânica e da porcentagem de finos de cada material.

$$DM = \left(\frac{M_i}{M_f} * 100 \right) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: DM = Durabilidade mecânica (%); M_i = Massa inicial antes do ensaio (g); M_f = Massa final após o ensaio (g).

$$PF = \left(\frac{Mi - Mf}{Mf} * 100 \right) \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: PF = Porcentagem de finos (%); Mi = Massa inicial antes do ensaio (g); Mf = Massa final após o ensaio (g).

O poder calorífico superior (kcal kg⁻¹) dos materiais foi determinado utilizando uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA C2000, de acordo com a norma EN 14918 (DIN, 2010a). A partir desse resultado, o poder calorífico inferior e o poder calorífico útil foram calculados pela Equação 4 e 5, e a densidade energética pela equação 6.

$$PCI = (PCS - 304) \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: PCI = Poder calorífico superior (kcal kg⁻¹); 304 = energia de formação do vapor de água (utilizando o mesmo valor de H para as biomassas).

$$PCU = \left(PCI * \left(\frac{(100-U)}{100} - 6U \right) \right) * 4.1868E - 03 \quad (\text{Equação 5})$$

Em que: PCU = Poder calorífico útil (MJ kg⁻¹); PCI = Poder calorífico inferior (kcal kg⁻¹); U = teor de umidade em base úmida (%); 4.1868E-03 = fator de conversão de kcal kg⁻¹ em MJ kg⁻¹.

$$DE = \frac{PCU}{1000} * DG \quad (\text{Equação 6})$$

Em que: DE = densidade energética (GJ m⁻³); PCU= poder calorífico útil (MJ kg⁻¹); DG = densidade a granel (kg m⁻³).

O índice de combustibilidade (ICOM) dos tratamentos foi obtido por meio de metodologia estabelecida por Quirino e Brito (1991) e Dias Júnior e colaboradores (2015), utilizando um aparato composto por um combustor de 3,30 dm³, uma proteção de alumínio para reduzir a entrada de oxigênio no sistema, um termopar e uma balança digital Bel L16001. Foram utilizados 68,56 ± 3,52 g de cada tratamento de pellets, com o início do teste considerado a partir da ignição do material e o final a partir da combustão completa do material. A ignição do material foi feita com o auxílio de 3,5g de álcool etílico 95°. A temperatura e a massa consumida foram registradas com

intervalo de 1 minuto, a partir de ignição do material. O ICOM foi calculado conforme a Equação 7.

$$ICOM = \frac{A * B}{100 * C} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que: ICOM = Índice de combustibilidade; A = porcentagem do tempo de teste no qual a temperatura permaneceu acima de 150°C, tomada em relação ao tempo total (min) de combustão; B = porcentagem da temperatura máxima atingida no teste, em relação à temperatura de 150 °C; C = porcentagem da massa total consumida gerando temperaturas acima de 150°C.

4.2 Delineamento experimental e análise de dados

Os dados foram submetidos a testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e testes de homoscedasticidade (Bartlett). Posteriormente, os dados foram analisados por meio da matriz de correlação de Pearson. A análise de variância foi realizada em delineamento inteiramente casualizado, com cinco variáveis preditoras relacionadas ao tipo de biomassa utilizada na peletização (pericarpo de *Dipteryx alata*; *Carya illinoensis*; *Citrus sinensis*; *Psidium guajava*; bagaço de *Citrus sinensis*). Para o caso de diferenças significativas em alguma variável dependente, foi realizado o teste de comparação múltipla de médias de Tukey. Os testes foram realizados com nível de probabilidade de 95%. Medidas de dispersão, como erro padrão, foram fornecidas para melhor compreensão do intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. Para as análises foi utilizado o software R Core Team (R Core Team, 2023).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 estão apresentadas as características avaliadas nos pellets estudados.

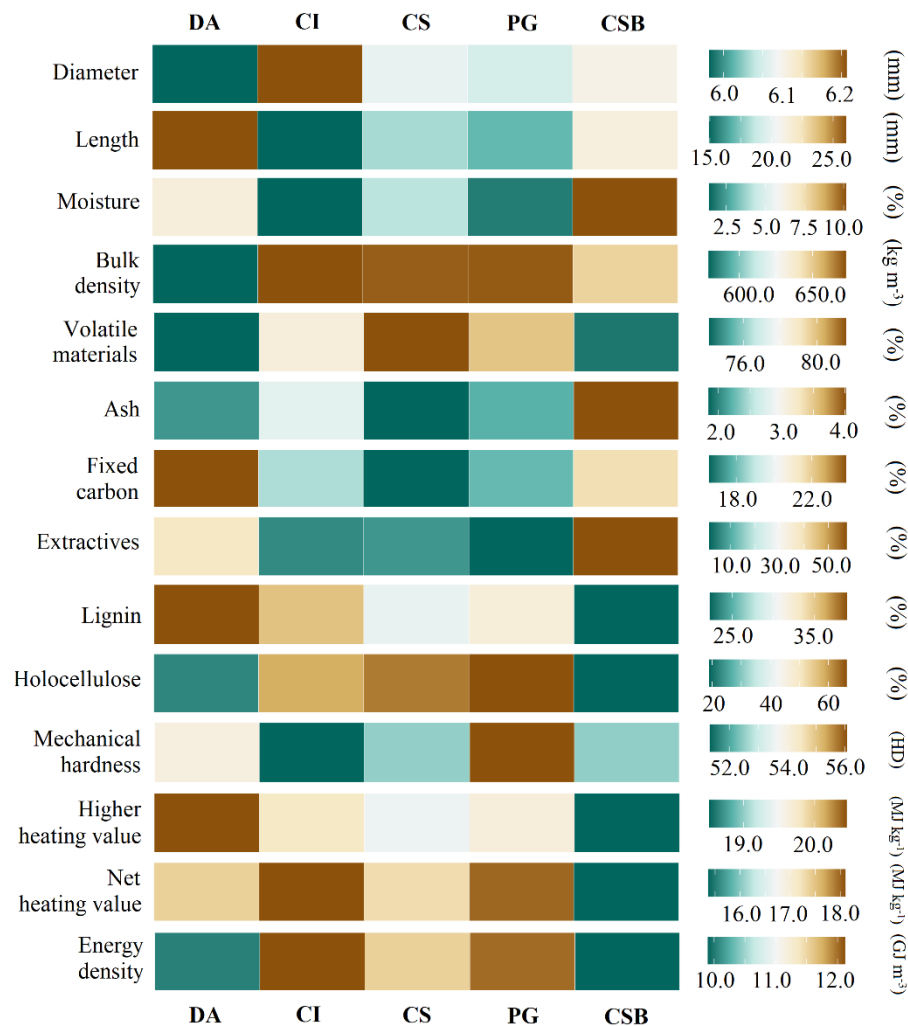


Figura 2. Propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas das biomassas investigadas. Onde: DA= pericarpo de *Dipteryx alata*; CI= *Carya illinoensis*; CS= *Citrus sinensis*; PG= *Psidium guajava*; CSB = Bagaço de *Citrus sinensis*. Fonte: Elaboração própria (2023).

De maneira geral, todas as espécies apresentaram resultados nas faixas de 25 a 35% para lignina, e 20 a 60% para holocelulose (Tabela 1 – Apêndice A). A biomassa lignocelulósica é composta por três componentes estruturais principais: celulose, hemicelulose e lignina, que variam em concentração e sofrem degradação térmica devido ao calor, gerando fumaça (Zhang *et al.*, 2020). A lignina, constituída por unidades fenólicas altamente condensadas, possui uma estrutura molecular altamente reticulada que proporciona alta resistência térmica, resultando em uma combustão mais

lenta e disponibilidade energética prolongada (Protásio *et al.*, 2019). Por outro lado, a holocelulose, que consiste em uma mistura de polissacarídeos lineares e ramificados com menor número de ligações C-C em sua composição, é mais sensível a altas temperaturas e apresenta baixa estabilidade térmica (Yang *et al.*, 2021). Para que as biomassas sejam mais eficientes, é desejável um equilíbrio adequado entre a quantidade de extrativos e lignina, minimizando o teor de holocelulose.

Em relação ao teor de extrativos, os pellets produzidos a partir do bagaço de *Citrus sinensis* e do pericarpo de *Dipteryx alata* destacaram-se pelo elevado teor de extrativos, 59,69% e 38,67%, respectivamente (Figura 2). Uma elevada quantidade de extrativos e materiais voláteis na biomassa pode ser uma vantagem na busca por produtos diferenciados, pois podem conferir um sabor defumado único, além da formação de uma crosta lisa que impede a ação bactericida (Ferreira, 2018). Os compostos liberados na fumaça transmitem características sensoriais únicas aos alimentos (Alves *et al.*, 2019), desde a alteração na cor do produto, ao cheiro, sabor, textura e efeito de conservação, permitindo ao consumidor desfrutar de experiências singulares com alimentos defumados (Moreira, 2011; Ferreira, 2018).

Os valores obtidos para o teor de materiais voláteis dos pellets estudados variaram de 74,11% (DA) a 81,60% (CS), enquanto os valores de carbono fixo variaram de 16,56% (CS) a 23,82% (DA), apresentados na Figura 2. Esses elementos têm um impacto direto na reação de oxidação durante o processo de combustão, influenciando consideravelmente a taxa de queima e a uniformidade da combustão (Lima *et al.*, 2020). De fato, a presença de valores mais elevados de materiais voláteis facilita a ignição do resíduo, tornando o processo mais eficiente (Lima *et al.*, 2020), enquanto maiores teores de carbono fixo impactam na disponibilidade contínua de energia durante o processo de combustão (Dias Junior *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2022). O maior teor de cinzas foi observado no tratamento CSB (4,01%). Altos teores de cinzas normalmente representam um problema para materiais usados em processos de queima direta. Além da limpeza constante, exigindo uma remoção regular e eficaz, a cinza é abrasiva e pode causar corrosão em elementos metálicos do defumador a longo prazo (Eufrade Junior *et al.*, 2018; Míguez *et al.*, 2021; Sette Júnior *et al.*, 2018). Outro grande problema que a

queima direta enfrenta, particularmente na biomassa, é o baixo ponto de fusão das cinzas, o que leva a uma significativa deposição de escória e formação de incrustações (Míguez *et al.*, 2021). Esses problemas reduzem a eficiência do sistema, geram custos adicionais de limpeza e manutenção e, em alguns casos, impedem o uso de certos tipos de biomassa vegetal para combustão completa ou parcial.

Quanto a umidade avaliada, os tratamentos analisados obtiveram resultados variando entre 1,42% a 10,17%, convergindo com os parâmetros das normas internacionais DIN 15270 (DIN, 2007) e ISO 17225 (ISO, 2021), em que os maiores valores observados foram nos tratamentos bagaço de *Citrus sinensis* e pericarpo de *Dipteryx alata*, com os respectivos valores de 10,17% e 6,56% (Figura 2). O teor de umidade observado pode ser atribuído ao fato de serem biomassas com maior teor de água em sua composição, convergindo com o valor encontrado em literatura para a umidade da semente de *Dipteryx alata*, de 6,10% de água (Lima *et al.*, 2017; Takemoto *et al.*, 2001; Vallilo *et al.*, 1990). O teor ideal de umidade da biomassa para produção de pellets é crucial para garantir sua estabilidade mecânica e durabilidade estrutural, visto que um menor teor de água na estrutura da biomassa propicia um melhor processamento da mesma (Beneroso *et al.*, 2017). Isso é importante para a peletização, pois biomassas com umidade acima do necessário para a plastificação da sua composição química tendem a produzir pellets com fraturas em sua estrutura (Kaliyan e Vance Morey, 2009; Silva, 2022). Porém, o valor ótimo para esta variável umidade varia dependendo da matéria-prima utilizada e dos parâmetros empregados na produção de pellets (Filbakk *et al.*, 2011; Frodeson *et al.*, 2019).

Na maioria dos combustíveis baseados em biomassa, a fumaça é composta de vapor d'água, gotículas líquidas, partículas sólidas e compostos gasosos (Chu *et al.*, 2019), em que os compostos químicos que compõem a fumaça variam entre álcoois, aldeídos, ésteres, piranos, ácidos, furfurais, fenóis, cetonas, e entre outros (Altgen *et al.*, 2016; Saldaña *et al.*, 2019; Sokamte tegang *et al.*, 2020). Esses compostos e seus derivados estão diretamente envolvidos no desenvolvimento de características organolépticas em alimentos defumados (Cardinal *et al.*, 2006; Pino, 2014), contribuindo para o sabor e aroma conferidos pela defumação. Os altos níveis de

Figura 3. Matriz de correlação entre as propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas das biomassas investigadas. Em que: Diam= diâmetro; Leng= comprimento; Mois= umidade; BD= densidade a granel; VM= materiais voláteis; FC= carbono fixo; Ext= extrativos; Lign= lignina; Holo= Holocelulose; MH= dureza mecânica; HHV= poder calorífico superior; NHV= poder calorífico útil; ED= densidade energética; X: não significativo ao nível de 95% de probabilidade. Fonte: Elaboração própria (2023).

A umidade presente na biomassa influenciou o comprimento dos pellets, bem como a densidade a granel (Figura 3). A presença de uma maior umidade, aliado à retirada do limitador durante a produção dos pellets, teve como consequência a formação de pellets mais extensos, resultando na redução da densidade a granel. Esse efeito decorre do aumento do volume ou da manifestação de irregularidades na superfície. Neste estudo as densidades a granel dos tratamentos variaram entre 579,20 kg.m⁻³ (DA) e 672,64 kg.m⁻³ (CI), valores próximos ou superiores a 600 kg.m⁻³, o limite para considerar um combustível de alta qualidade (Simeone *et al.*, 2018). Huang *et al.* (2017), em estudo sobre pellets produzidos com biomassa em diferentes níveis de umidade, observaram diferentes valores máximos de densidade e resistência do pellet dependendo do teor de umidade ideal para cada tipo de biomassa. A qualidade dos pellets é influenciada de maneira fundamental pela presença da água, que desempenha um papel crucial como aglutinante. A presença de umidade durante o processo de aglomeração, até o limite ideal (8 a 12% de umidade), aumenta as forças coesivas entre as partículas, resultando em maior resistência e dureza do pellet (Huang *et al.*, 2017; Kaliyan e Vance Morey, 2009; Lisowski *et al.*, 2017). Porém, a umidade excessiva pode causar problemas nos atributos mecânicos e estruturais.

Quanto à densidade energética, os pellets de *Carya illinoensis* e os de *Psidium guajava* exibiram os maiores valores entre os tratamentos analisados, com 12,02 Gcal.m⁻³ e 12,12 Gcal.m⁻³, respectivamente. A densidade energética é influenciada pela densidade a granel e pelo poder calorífico útil, além de ser afetada negativamente pela umidade (Oyebode e Ogunsuyi, 2021; Zhao *et al.*, 2021). O poder calorífico útil é inversamente proporcional a umidade da biomassa, pois parte da energia liberada durante a combustão é gasta na evaporação da água (Andrade *et al.*, 2017), o que diminui a produção geral de energia. Portanto, com a pré- secagem adequada da biomassa com

teor excessivo de umidade, este gasto energético poderia ser evitado e o sistema poderia utilizar a energia de forma mais eficiente, além de melhorar a combustão e a plastificação da lignina (Beneroso *et al.*, 2017). Neste trabalho, o poder calorífico útil dos tratamentos variou entre 15,36 MJ kg⁻¹ (CSB) e 18,10 MJ kg⁻¹ (CI). O limite inferior na norma ISO 17225 (ISO, 2021) é de 16,5 MJ kg⁻¹, dessa forma o tratamento CSB não alcançou o limite, entretanto, os valores dos demais tratamentos estão convergindo com a norma. Assim, uma maior densidade a granel e menor teor de umidade levam a maior densidade energética, conforme a mostrado na matriz de correlação.

Uma alta densidade energética dos pellets é essencial, pois indica que o material contém grande quantidade de energia por unidade de volume, resultando em um produto homogêneo e de maior qualidade (Carvalho *et al.*, 2021; Protásio *et al.*, 2014). No entanto, para o processo de defumação, além da importância da quantidade de calor gerado, a fumaça desempenha um papel crucial. Gerada a partir da combustão incompleta da biomassa, a quantidade e a qualidade da fumaça determinam a qualidade do produto resultante. A qualidade da fumaça está relacionada com seus componentes, sendo mais desejável que contenha menores teores de gases poluentes e cancerígenos (Silva *et al.*, 2022; Rodrigues, 2009). Nesse sentido, a fumaça líquida, defumação com aspersão da fumaça em estado líquido (Lingbeck *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2022), oferece aplicabilidade prática quanto à defumação tradicional, visto que na defumação tradicional não são controlados os compostos provenientes da fumaça (Patriolino *et al.*, 2021). Além disso, a quantidade de compostos cancerígenos, como os HPAs (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), pode ultrapassar os limites permitidos em processos em que ocorre tabagismo excessivo (Ledesma *et al.*, 2017). Em outro viés, a temperatura de defumação pode ser classificada como a quente (80 a 90°C) ou a frio (30 a 40°C), sendo um fator crítico na qualidade dos alimentos defumados e na sua classificação, pois confere diferentes características de sabor e aroma e estende seu prazo de validade (Ledesma *et al.*, 2017).

Os perfis de densidade, ilustrados na Figura 4, revelam que os pellets analisados exibem menor densidade em suas extremidades, pois estas representam os pontos mais frágeis da estrutura, constituindo a principal via de absorção de umidade, conforme destacado por Whittaker e Shield (2017).

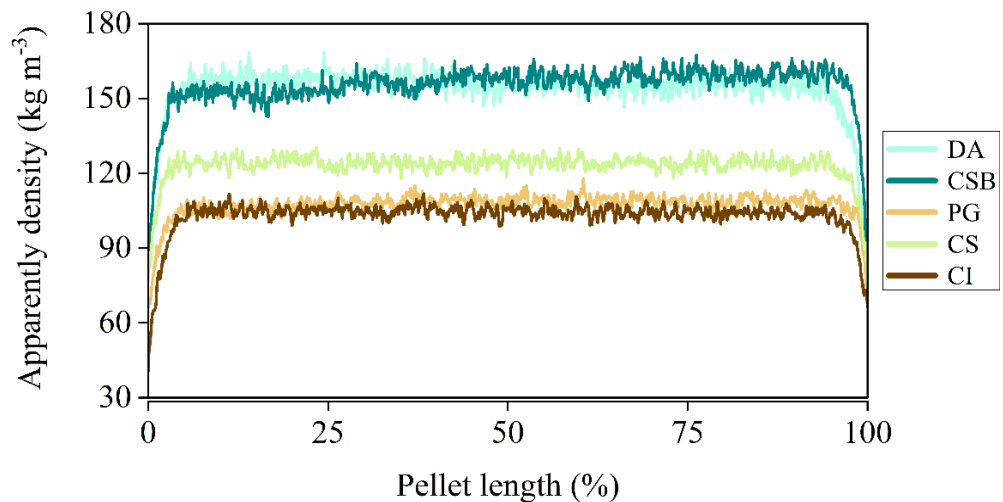


Figura 4. Densitometria de raio-X dos pellets avaliados. Em que: DA: pericarpo de *Dipteryx alata*; CI= *Carya illinoensis*; CS= *Citrus sinensis*; PG= *Psidium guajava*; CSB= Bagaço de *Citrus sinensis*. Fonte: Elaboração própria (2023).

A densitometria de raios-X é uma técnica usada para analisar a distribuição interna da densidade dos pellets. As maiores densidades são encontradas em posição próxima à região central dos pellets, onde a compactação é mais pronunciada devido à ação da lignina na coesão interna entre as partículas (Souza *et al.*, 2021a; Garcia *et al.*, 2016). Embora apresentem maior densidade a granel, os tratamentos pericarpo do *Dipteryx alata* e o bagaço de *Citrus sinensis* apresentam perfis de densidade aparente mais elevados, respectivamente, 153 e 155 kg m⁻³, enquanto *Psidium guajava* e *Carya illinoensis* apresentam perfis mais semelhantes entre si, com densidades médias mais baixas, 107,3 e 103,0 kg m⁻³, respectivamente. Já os pellets de *Citrus sinensis* apresenta densidade mediana em relação aos demais tratamentos (123 kg m⁻³). Individualmente, pellets mais coesos permitem maior comprimento, o que impacta a disposição entre os pellets e reduz sua densidade a granel.

Os valores de dureza Shore D observados nas amostras de biomassa foram semelhantes, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Pellets com maior dureza mecânica possuem melhor formação estrutural, são mais compactados e menos propensos à friabilidade, resultando em maior densidade a granel e, conseqüentemente, maior densidade energética. Com relação a durabilidade, os tratamentos pericarpo de *Dipteryx alata* e bagaço de *Citrus sinensis* indicaram, respectivamente, os valores 98,8%

e 99,1%. Os demais tratamentos obtiveram resultados entre 94 e 97% para durabilidade. Conseqüentemente, os tratamentos com maior durabilidade apresentaram menor geração de finos (Figura 5).

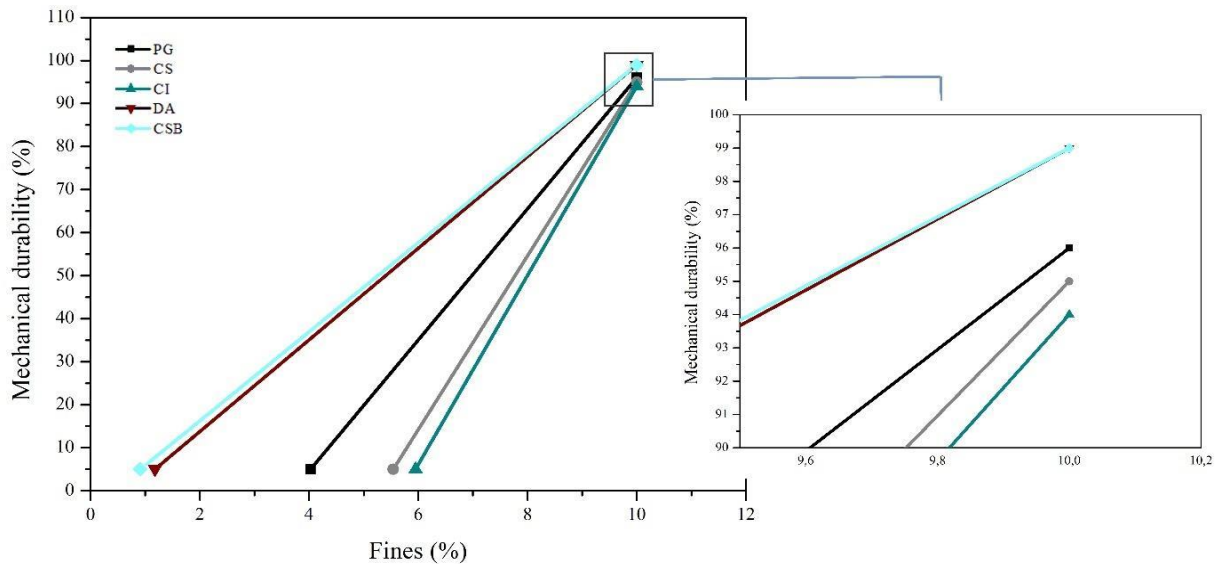


Figura 5. Relação entre a durabilidade mecânica e a produção de finos dos pellets investigados. Em que: DA = pericarpo de *Dipteryx alata*; CI = *Carya illinoensis*; CS = *Citrus sinensis*; PG = *Psidium guajava*; CSB = Bagaço de *Citrus sinensis*. Fonte: Elaboração própria (2023).

A durabilidade de um pellet ajuda a compreender o nível de resistência que esse produto possui para enfrentar os possíveis impactos que ocorrem durante os processos de armazenamento, manuseio e transporte (Tumuluru, 2010). De acordo com o Comitê Europeu de Normalização (CEN) (European Pellet Council, 2023), os pellets devem possuir uma durabilidade acima de 97,5% para serem adequados a transporte em longas distâncias e internacionalmente, para distâncias mais curtas uma durabilidade acima de 90% pode já ser suficiente. Quanto menor a durabilidade de um pellet maior será a chance de quebras e geração de finos durante o processo de logística de transporte, o que pode acarretar problemas de segurança como a combustão espontânea e maiores emissões de gases, bem como na diminuição da receita do produto comercializado (Tumuluru, 2010). O Pellet Fuel Institute (PFI), associação comercial norte-americana de fabricantes de pellets e apoiadores, estabelece classes para os pellets de acordo com os critérios de qualidade apresentados, para a melhor classificação (Premium), o pellet deve ter uma durabilidade acima de 96,5%, para as demais categorias Standard e Utility,

o valor base é 95% (Rangel, 2018; Pellet Fuel Institute, 2023). As espécies de melhor desempenho na durabilidade foram as com os maiores teor de umidade, isso ocorre, pois, teores de umidade mais elevados associados ao processo de peletização podem ativar alguns componentes da biomassa como a lignina, proteínas e amido, que atuam como ligantes naturais para manter unidas as partículas de biomassa (Tumuluru, 2016).

A relação entre o índice de combustibilidade e as temperaturas máximas obtidas por cada um dos tratamentos estão representadas na Figura 6.

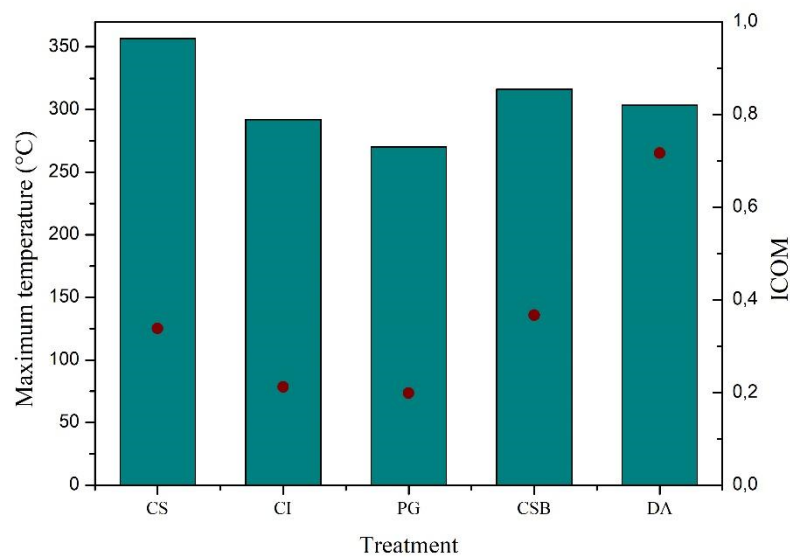


Figura 6. Relação entre a máxima temperatura atingida e o ICOM dos pellets investigados. Em que: ICOM = Índice de Combustibilidade; DA = pericarpo de *Dipteryx alata*; CI = *Carya illinoensis*; CS = *Citrus sinensis*; PG = *Psidium guajava*; CSB = Bagaço de *Citrus sinensis*. Equação de regressão: $ICOM = -0,06 + 0,0014 * TEMP MAX + 0,236$. Fonte: Elaboração própria (2023).

O índice de Combustibilidade (ICOM) ajuda a medir a eficiência da combustão do material, com relação a quantidade de energia liberada e a quantidade de massa consumida durante a queima. Nesse sentido, quanto maior for o ICOM, maior é o potencial gerador de calor do material (Dias Júnior *et al.*, 2017). O tratamento pericarpo de *Dipteryx alata* demonstrou o maior valor de ICOM, com 0,717, entretanto não obteve a maior temperatura atingida, ao passo em que o tratamento *Citrus sinensis* alcançou a maior temperatura (356 °C), mas obteve um ICOM de 0,338. Neste contexto, a quantidade de oxigênio da biomassa desempenha um papel crucial na combustão (Zhou

et al., 2019). Quando há maior coesão do material combustível, isso pode afetar a disponibilidade de oxigênio na proporção adequada, o que pode resultar em desafios na ignição e na manutenção da combustão completa.

Com base nas análises apresentadas, entende-se que as biomassas residuais não lenhosas possuem características mais peculiares quando comparadas com as demais estudadas e podem apresentar maior potencial de utilização na fabricação dos pellets aromáticos. Contudo, por ser um mercado incipiente no Brasil, são necessárias novos estudos e a instituição de normas específicas ao uso de pellets para defumação, com o estabelecimento de parâmetros de produção e consumo.

6. CONCLUSÃO

Os pellets produzidos a partir de biomassas pouco convencionais demonstraram potencialidade para o uso como pellets aromáticos durante o processo de defumação, visto o bom desempenho energético e os altos índices de materiais voláteis e extrativos verificados. Os pellets produzidos a partir de biomassas residuais não lenhosas, pericarpo de *Dipteryx alata* e bagaço de *Citrus sinensis* exibiram elevada quantidade de carbono fixo e extrativos, enquanto os pellets de biomassas lenhosas, *Carya illinoensis*, *Citrus sinensis* e *Psidium guajava* apresentaram as maiores densidades energéticas. No geral, os pellets apresentaram características que corroboram os parâmetros das normas internacionais para o desempenho energético, destaque para os tratamentos pericarpo de *Dipteryx alata* e bagaço de *Citrus sinensis* nas características de teor de umidade ideal e durabilidade mecânica. Entretanto, se fazem necessários estudos posteriores, principalmente acerca dos níveis de gases volatilizados a partir da combustão dos pellets produzidos e a análise sensorial de alimentos defumados com os pellets aromáticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acampora, A., Civitarese, V., Sperandio, G., Rezaei, N., 2021. Qualitative Characterization of the Pellet Obtained from Hazelnut and Olive Tree Pruning. **Energies** 2021, Vol. 14, Page 4083 14, 4083. <https://doi.org/10.3390/EN14144083>

Alemán-Nava, G. S.; Casiano-Flores, V. H.; Cárdenas-Chávez, D. L.; Díaz-Chavez, R.; Scarlat, N.; Mahlknecht, J.; Dallemand, J.; Parra, R. Renewable energy research progress in Mexico: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 32, p. 140-153, abr. 2014. Elsevier BV.

Altgen, M., Willems, W., Militz, H., 2016. Wood degradation affected by process conditions during thermal modification of European beech in a high-pressure reactor system. **European Journal of Wood and Wood Products** 74, 653–662. <https://doi.org/10.1007/S00107-016-1045-Y/METRICS>

Andrade, C. R., Brito, J. O., Dias Junior, A. F., Lana, A., Q. 2017. Changes caused by torrefaction on urban wooden waste. **Scientia Forestalis** 45, 275–284. <https://doi.org/10.18671/scifor.v45n114.04>

Arranz, J. I.; Miranda, M. T.; Montero, I.; Sepúlveda, F. J.; Rojas, C. V., 2015. Characterization and combustion behavior of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. *Fuel*, v. 142, p. 199-207.

Arshadi, M.; Geladi, P.; Gref, R.; Fjällström, P., 2009. Emission of volatile aldehydes and ketones from wood pellets under controlled conditions. **Annals of occupational hygiene**, 53(8), 797-805.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE, ABIMCI, 2022. **ESTUDO SETORIAL 2022**: Ano base 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, 2022. **NBR 17013-1:2022**: Pellets - Requisitos e classificação Parte 1: Madeira de Pinus. [S.I]: Abnt/Cee-242 Pellets.

ASTM, 2021a. **D1762-84**: standard test method for chemical analysis of wood charcoal – ASTM International. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM, 2021b. **D1106-96**: standard test method for acid-insoluble lignin in wood. West Conshohocken, PA, USA.

ASTM, 2021c. **D2240-15** Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness. ASTM: West Conshohocken, PA, USA.

ASTM, 2017. **D5057-17**: standard test method for screening apparent specific gravity and bulk density of waste. West Conshohocken, PA, USA.

Barros, J.; Hamann, J. J.; Bilharva, M. G.; Marco, R.; Martins, C. R., 2018. Cultivares de noqueira-pecã no Brasil. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 478). 43 p.

Benelli, P., 2012. **Agregação de valor ao bagaço de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck) mediante obtenção de extratos bioativos através de diferentes técnicas de extração**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. Florianópolis, SC.

Beneroso, D., Monti, T., Kostas, E.T., Robinson, J., 2017. Microwave pyrolysis of biomass for bio-oil production: Scalable processing concepts. **Chemical Engineering Journal** 316, 481–498. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2017.01.130>

Borges, A. C. P.; Silva, M. S.; Alves, C. T.; Torres, E. A. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 10, n. 2, p. 23-36, 2017.

Borowski, G., Stępniewski, W., Wójcik-Oliveira, K., 2017. Effect of starch binder on charcoal briquette properties. *Int Agrophys* 31, 571–574. <https://doi.org/10.1515/INTAG-2016-0077>

Camargo, B. S.; De Carvalho Camargo, S. K., 2019. Uma revisão sistemática da produção de pellets provenientes de resíduos agroflorestais para fins energéticos. **Revista Brasileira de Energia**. Vol, v. 25, n. 3.

Cardinal, M., Cornet, J., Sérot, T., Baron, R., 2006. Effects of the smoking process on odour characteristics of smoked herring (*Clupea harengus*) and relationships with phenolic compound content. **Food Chem** 96, 137–146. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.02.040>

Carvalho, N.R., de Barros, J.L., da Silva, D.A., Nakashima, G.T., Yamaji, F.M., 2021. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Quim Nova** 44, 35–40. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170663>

Chang, H.; Wang, Y.; Xia, Q.; Pan, D.; He, J.; Zhang, H.; Cao, J., 2021. Characterization of the physicochemical changes and volatile compound fingerprinting during the chicken sugar-smoking process. **Ciência avícola** , v. 100, n. 1, pág. 377-387, 2021.

Costa, E. B.; Gouvêa, A. F. G.; Gomes, C. M.; Silgueiro, J., M., L., D.; Câmara, A. P., 2022. Aproveitamento Energético Do Resíduo De Frutos Do Baru (*Dipteryx alata* Vog.). IN: **I Encontro Internacional De Bioeconomia, Empreendedorismo E Inovação No Pantanal**, v. 1, n. 1, 2022.

Chu, D., Zhang, X., Mu, J., Avramidis, S., Xue, L., Li, Y., 2019. A greener approach to byproducts from the production of heat-treated poplar wood: Analysis of volatile organic compound emissions and antimicrobial activities of its condensate. **Journal of Clean Production** 213, 521–527. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.163>

Cupertino, S. A., 2017. Pellets de Madeira como uma Alternativa para a Geração Termelétrica no Brasil. **Núcleo de Estudos e Pesquisas/CONLEG/ Senado**, Junho/2017 (Texto para Discussão no 235). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>

Dias Júnior, A.F., Andrade, C.R., Brito, J.O., Milan, M., 2015. Desdobramento da Função Qualidade (QFD) na Avaliação da Qualidade do Carvão Vegetal Utilizado para Cocção de Alimentos. **Floresta e Ambiente** 22, 262–270. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.105314>

Dias Júnior, A. F.; Anuto, R. B.; Andrade, C. R.; De Souza, N. D.; Takeshita, S.; Brito, J. O.; Nolasco, A. M. Influence of Eucalyptus wood addition to urban wood waste during combustion. **Cerne**, v. 23, n. 4, p. 455–464, 2017.

Dias Júnior, A. F.; Brito, J. O.; Andrade, C. R. Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. **Revista Árvore**, v. 39, n. 6, p. 1127–1133, 2015.

Dias Junior, A.F., Esteves, R.P., da Silva, Á.M., Sousa Júnior, A.D., Oliveira, M.P., Brito, J.O., Napoli, A., Braga, B.M., 2020. Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. **European Journal of Wood and Wood Products** 78, 193–204. <https://doi.org/10.1007/S00107-019-01489-6/FIGURES/10>

DIN, 1996. **EN 51731** Testing of solid fuels, compressed untreated wood. Requirements and testing. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.

DIN, 2007; **EN 15270**. Pellet burners for small heating boilers. Definitions, requirements, testing, marking. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany.

DIN, 2010a. **EN 14918**: Determination of calorific value - Deutsches Institut Für Normung. CEN, Berlin.

DIN, 2010b. **EN 15210- 1**: Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets - Deutsches Institut Für Normung. CEN, Berlin.

Dionysio, R. B.; Meirelles, F. V. P., 2003. Conservação de alimentos. **Sala de Leitura**.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. **Relatório Síntese 2023**: Ano base 2022, Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional (BEN-2023).

Eufrade Junior, H. de J., Guerra, S.P.S., Sansígolo, C.A., Ballarin, A.W., 2018. Management of Eucalyptus short-rotation coppice and its outcome on fuel quality. **Renewable Energy**, v 121, 309-314. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.033>

European Pellet Council; Associação Europeia de Biomassa. **Manual EN plus, parte 3 – Requisitos de Qualidade de Pellets**. Bélgica, Novembro de 2023. Disponível em: <https://www.enplus-pellets.eu/pt/recursos-pt-pt/documentacao-tecnica-pt-pt.html>

Evaristo, R. B. W.; Viana, N. A.; Guimarães, M. G.; Do Vale, A. T.; De Macedo, J. L.; Ghesti, G. F. Evaluation of waste biomass gasification for local community development in central region of Brazil. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.

Ferreira, A. S. F., 2018. Aspectos físico-químico, microbiológico e sensoriais do queijo de coalho defumado com borra de café. 82 f. : il. color. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Fortaleza.

Filbakk, T., Skjevraak, G., Høibø, O., Dibdiakova, J., Jirjis, R., 2011. The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical pellet properties and production parameters. **Fuel Processing Technology** 92, 871–878. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2010.12.001>

Fortaleza, A. P.; Nascimento Filho, J. J. P.; Ceretta, R. P. S.; Barros, D. S.; Silva, S. S. Biomassa de espécies florestais para produção de carvão vegetal. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 1436-1451, 30 set. 2019.

Fortes, M. M., 2022. **Recuperação Energética de Resíduos Agroflorestais por meio de peletização e torrefação**. Tese (Doutorado) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, DF, 93 p.

Frodeson, S., Henriksson, G., Berghel, J., 2019. Effects of moisture content during densification of biomass pellets, focusing on polysaccharide substances. **Biomass Bioenergy** 122, 322–330. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2019.01.048>

Garcia, D.P., Caraschi, J.C., Ventrorm, G., 2016. Decomposição Térmica De Pellets De Madeira Por Tga. **Holos** 1, 327–339. <https://doi.org/10.15628/holos.2016.3886>

Garcia, D.P., Caraschi, J.C. Ventorim, G. Prates, G. A. Protásio, T. P., 2018. Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. **Ciência da Madeira**. v.9. n.1. pg.45-53.

García, R.; Gil, M. V.; Rubiera, F.; Pevida, C., 2019. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. **Fuel**, v. 251, p. 739-753.

Gomes, L.; Miranda, H. S.; Soares-Filho, B.; Rodrigues, L.; Oliveira, U.; Bustamante, M. M. C., 2020. Responses of Plant Biomass in the Brazilian Savanna to Frequent Fires. **Frontiers in Forests and Global Change**, 3, 1–11.

Gonçalves, F. G.; Lelis, R. C. C.; Carvalho, A. M.; Tomazello Filho, M., 2018. Densitometria De Raios X Na Avaliação Da Densidade Em Painéis De Partículas. **Ciência Florestal** 28, 1151–1162. <https://doi.org/10.5902/1980509833382>

Gori, M., Bergfeldt, B., Reichelt, J., Sirini, P., 2013. Effect of natural ageing on volume stability of MSW and wood waste incineration residues. **Waste Manage**, v. 33, n. 4, p. 850-857.

Gouveia, D. F. D., 2023. Nível de Degradabilidade de Casca de Laranja e Resíduo de Poda para Produção de Composto Orgânico. **Pensar Acadêmico**, v. 21, n. 3, p. 1777-1794.

Hitzel, A., Pöhlmann, M., Schwägele, F., Speer, K., e Jira, W., 2013. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and phenolic substances in meat products smoked with different types of wood and smoking spices. **Química dos Alimentos**, v. 139, n. 1-4, pág. 955-962.

Huang, Y., Finell, M., Larsson, S., Wang, X., Zhang, J., Wei, R., Liu, L., 2017. Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass. **Biomass Bioenergy** 98, 8–14. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.01.002>

IBGE -INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. **Produção agropecuária: Laranja**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/laranja/br>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2023.

ISO, 2015. **17829: 2015**—Solid Biofuels—Determination of Length and Diameter of Pellets. The British Standards Institution: London, UK.

ISO, 2021. **17225–2: 2021**: Biocombustíveis sólidos — Especificações e classes de combustíveis — Parte 2: Pellets de madeira classificados. Comitê Técnico ISO/TC 238, Biocombustíveis Sólidos, Suíça.

Jägers, J., Wirtz, S., Scherer, V.; Behr, M., 2020. Experimental analysis of wood pellet degradation during pneumatic conveying processes. **Powder Technology**, v. 359, pág. 282-291.

Jakob, Michael & Steckel, Jan Christoph. How climate change mitigation could harm development in poor countries. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 5, n. 2, p. 161-168, 2014.

Jelonek, Z., Drobniak, A., Mastalerz, M., Jelonek, I., 2021. Emissions during grilling with wood pellets and chips. **Atmos Environ X** 12, 100140. <https://doi.org/10.1016/J.AEAOA.2021.100140>

Kaliyan, N., Vance Morey, R., 2009. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass Bioenergy** 33, 337–359. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2008.08.005>

Lang, Sen; Zhang, Shouyu; Cao, Zhongyao; Yang, Jifan; Zhou, Yi; Liu, Simeng; Xu, Jiaqing; Yang, Chuke., 2023. Improvement of hydrochar/biochar pellets prepared from cotton stalk by hydrothermal pretreatment process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, [S.L.], v. 176, p. 106263. **Elsevier BV**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106263>.

Ledesma, E., Rendueles, M., Díaz, M., 2017. Smoked Food. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering: Food and Beverages Industry* 201–243. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63666-9.00008-X>

Li, X., Zhu, J., Li, C., Ye, H., Wang, Z., Wu, X., Xu, B., 2018. Evolution of Volatile Compounds and Spoilage Bacteria in Smoked Bacon during Refrigeration Using an E-Nose and GC-MS Combined with Partial Least Squares Regression. **Molecules** 23. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES23123286>

LIGNUM LATIM AMERICA (Brasil). Malinovski. Pellets de madeira agora têm normatização da ABNT. 2022. Disponível em: <https://lignumlatinamerica.com/pellets-de-madeira-agora-tem-normatizacao-da-abnt/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

Lima, V. F.; De Fátima Araújo, L.; De Aguiar, E. M.; Coelho, R. R. P., 2017. Processos biotecnológicos aplicados ao bagaço de laranja para redução dos custos na alimentação animal. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 11, n. 2.

Lima, A. D. V.; Hellwig, C. G.; Souza, R. S.; Malgarim, M. B.; Martins, C. R., 2019. Influência da poda na frutificação de nogueira pecã. Influência da poda na frutificação de nogueira pecã. In: **ANAIS DO II SIMPÓSIO SUL-AMERICANO DA NOZ-PECÃ**.

Lima, M.D.R., Patrício, E.P.S., Barros Junior, U. de O., Assis, M.R., Xavier, C.N., Bufalino, L., Trugilho, P.F., Hein, P.R.G., Protásio, T. de P., 2020. Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. **Biomass Bioenergy** 140, 105660. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105660>

Lisowski, A., Dąbrowska-Salwin, M., Ostrowska-Ligęza, E., Nawrocka, A., Stasiak, M., Świętochowski, A., Klonowski, J., Sypuła, M., Lisowska, B., 2017. Effects of the biomass moisture content and pelleting temperature on the pressure-induced agglomeration process. **Biomass Bioenergy** 107, 376–383. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2017.10.029>

Mack, R., Kuptz, D., Schön, C., Hartmann, H., 2019. Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler. **Biomass and Bioenergy**, v. 125, p. 50-62.

Maia, F. **Goiaba: fruta da época é nativa do Brasil**. Disponível em: <https://www.cati.sp.gov.br/portal/imprensa/noticia/goiaba:-fruta-da-epoca-e-nativa-do-brasil>. Acesso em: 15 de dezembro de 2023.

Míguez, J.L., Porteiro, J., Behrendt, F., Blanco, D., Patiño, D., Dieguez-Alonso, A., 2021. Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 141, 110502. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110502>

Moreira, I. C., 2011. **FUMAÇA LÍQUIDA**: uma alternativa segura à defumação tradicional. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Tecnológica, Departamento de Química, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

Moura, S., 2021. Pesquisa da Escola Politécnica busca alternativas de aproveitamento mais eficiente de resíduo de laranja. **Jornal da USP Online**, São Paulo, 14 de dezembro de 2021. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/ciencias/pesquisa-da-escola-politecnica-busca-alternativas-de-aproveitamento-mais-eficiente-de-residuo-de-laranja/>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2023.

Nath, B., Chen, G., Bowtell, L., Graham, E., 2023. Kinetic mechanism of wheat straw pellets combustion process with a thermogravimetric analyser. **Heliyon**, v 9 p 10.

Nguyen, Q. N.; Cloutier, A.; Achim, A.; Stevanovic, T., 2015. Effect of process parameters and raw material characteristics on physical and mechanical properties of wood pellets made from sugar maple particles. **Biomass and bioenergy**, v. 80, p. 338-349.

Oliveira, P.R.S., Trugilho, P.F., Oliveira, T.J.P., 2022. Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. **Environmental Science and Pollution Research** 29, 8549–8558. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-15847-6/FIGURES/4>

ÖNORM, 2003. **ÖNORM, M 7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state, pellets and briquettes. Requirements and test specifications. Vienna, Austria: Österreichisches.

Oyebode, W.A., Ogunsuyi, H.O., 2021. Impact of torrefaction process temperature on the energy content and chemical composition of stool tree (*Alstonia congenisis* Engl) woody biomass. **Current Research in Green and Sustainable Chemistry** 4, 100115. <https://doi.org/10.1016/J.CRGSC.2021.100115>

Patriolino, F.; Miranda, K.; Nascimento, N.; Mendonça, M.; Nunes, M.; Silva, E. C., 2016. Filé de pargo defumado por fumaça líquida: avaliação físico-química e sensorial. **II Congresso Internacional De Gastronomia**.

Pedroso, L. L. A.; Da Silva, F. F.; Freitas Da Silva, F.; Melo, A. M.; Erthal Junior, M.; Shimoya, A. Current and future demands for biomass and renewable energy in Brazil and worldwide. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 5, Edição Especial p. 1980-1996, Curitiba, 2018.

Pellet Fuels Institute. Disponível em: <<http://www.pelletheat.org/joining-the-standards-program>>. Acesso em 22 de novembro de 2023.

Pino, J.A., 2014. Characterisation of volatile compounds in a smoke flavouring from rice husk. **Food Chem** 153, 81–86. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2013.12.041>

Porto, J., Foster-Carneiro, T., Sforça, B., & Buller, L. S., 2021. **VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE SUCO DE LARANJA CONGELADO CONCENTRADO**. In: Anais do XXIX Congresso de Iniciação Científica da UNICAMP.

Protásio, T. de P., Neves, T.A., dos Reis, A.A., Trugilho, P.F., 2014. Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de *Eucalyptus* spp visando à produção de bioenergia. **Ciência Florestal** 24, 465–477. <https://doi.org/10.5902/1980509814587>

Protásio, T. de P., Scatolino, M.V., Araújo, A.C.C., Oliveira, A.F.C.F., Figueiredo, I.C.R., Assis, M.R., Trugilho, P.F., 2019. Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior Eucalyptus Firewood. **Bioenergy Res** 12, 626–641. <https://doi.org/10.1007/S12155-019-10004-X/TABLES/11>

Quirino, W. F.; Brito, J. O., 1991. Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal. **IPEF**, Brasília.

R Core Team, 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rangel, I. C., Da Silva, F. F., SOUZA, C. L. M., Junior, M. E., de Amaral Gravina, G., & Shimoya, A., 2018. Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: Em breve o brasil terá a sua?. **Acta Biomedica Brasiliensia**, v. 9, n. 1, p. 17-35, 2018.

Resende, D. R., 2017. **Potencial energético de pellets produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos e finos de carvão vegetal**. 57 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais.

Ribeiro, W. M.; Ribeiro, F. V.; Vahl, H., 2022. CAPACIDADE ENERGÉTICA DE RESÍDUOS DA PODA DE NOGUEIRA PECAN. IN: **VI CIT - Congresso de Inovação Tecnológica**.

Ríos-Badrán, I. M.; Luzardo-Ocampo, I.; García-Trejo, J. F.; Santos-Cruz, J.; Gutiérrez-Antonio, C. Production and characterization of fuel pellets from rice husk and wheat straw. *Renewable Energy*, [S.L.], v. 145, p. 500-507, jan. 2020. **Elsevier BV**.

Rodrigues, P. R. E., 2009. Avaliação dos processos de cozimento e defumação líquida sobre aspectos físicos, sensoriais e de estabilidade do camarão regional (*Macrobrachium amazonicum*). Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Belém.

Sá, I. A., 2019. **Produção e caracterização de pellets de resíduos de madeiras amazônicas para fins energéticos visando o mercado internacional: conformidade com a norma ISO 17225-2**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília.

Sacchelli, S; De Meo, I.; Paletto, A. Bioenergy production and forest multifunctionality: a trade-off analysis using multiscale GIS model in a case study in Italy. **Applied Energy**, v. 104, p. 10-20, 2013.

Saldaña, E., Saldarriaga, L., Cabrera, J., Siche, R., Behrens, J.H., Selani, M.M., de Almeida, M.A., Silva, L.D., Silva Pinto, J.S., Contreras-Castillo, C.J., 2019. Relationship between volatile compounds and consumer-based sensory characteristics of bacon smoked with different Brazilian woods. **Food Research International** 119, 839–849. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2018.10.067>

Santos, L. V. D., Manica-Berto, R., Severo, J., Affonso, L. B., Rufato, A. D. R., & Silva, J. A. Teor de fenóis totais em noz pecan. **XVII Congresso de Iniciação Científica e X Encontro da Pós-graduação**, 2008.

Sette Júnior, C.R., Hansted, A.L.S., Novaes, E., Lima, P.A.F. e., Rodrigues, A.C., Santos, D.R. de S., Yamaji, F.M., 2018. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. **Ind Crops Prod** 122, 209–213. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2018.05.057>

Sikanen, L. e Vilppo, T. Experimentos piloto de combustão em pequena escala com pellets de madeira - o efeito do comprimento do pellet. *The Open Renewable Energy Journal*, v. 1, 2012.

Silva, C. M.; Macedo, I. M. E.; Oliveira Filho, P. R. C., 2022. Avaliação físico-química e microbiológica do camarão *Litopenaeus vannamei* submetido à defumação líquida em diferentes temperaturas e tempos de processamento. **Arquivo Ciência do Mar**, n. 55, v. 1, p. 116-126, Fortaleza.

Silva, G. K. R. **Parâmetros físicos da qualidade de formulações comerciais para bovinos leiteiros**. 30f. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Mato Grosso do Sul.

Simeone, M. L. F., da Costa Parrella, R. A., May, A., & Schaffert, R. E. Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, v. 2, n. 5, p. 1682-1695, 2018.

Sivendiran, T., Wang, L.M., Huang, S., Bohrer, B.M., 2018. The effect of bacon pump retention levels following thermal processing on bacon slice composition and sensory characteristics. **Meat Sci** 140, 128–133. <https://doi.org/10.1016/J.MEATSCI.2018.03.007>

Siwale, W.; Frodeson, S.; Berghel, J.; Henriksson, G.; Finell, M.; Arshadi, M.; Jonsson, C., 2022. Influence on off-gassing during storage of Scots pine wood pellets produced from sawdust with different extractive contents. *Biomass And Bioenergy*, [S.L.], v. 156, p. 106325. **Elsevier BV**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106325>.

Siyal, A. A.; Liu, Y.; Mao, X.; Ali, B.; Husaain, S.; Dai, J.; Zhang, T.; Fu, J.; Liu, G., 2021. Characterization and quality analysis of wood pellets: effect of pelletization and torrefaction process variables on quality of pellets. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 11, n. 5, p. 2201–2217.

Sokamte tegang, A., Mbougoueng, P.D., Sachindra, N.M., Douanla Nodem, N.F., Tatsadjieu Ngoune, L., 2020. Characterization of volatile compounds of liquid smoke flavourings from some tropical hardwoods. **Sci Afr** 8, e00443. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2020.E00443>

Soladoye, O.P., Shand, P., Dugan, M.E.R., Gariépy, C., Aalhus, J.L., Estévez, M., Juárez, M., 2017. Influence of cooking methods and storage time on lipid and protein oxidation and heterocyclic aromatic amines production in bacon. **Food Res Int** 99, 660–669. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2017.06.029>

Sousa, M. H.; Silva, A. S. F.; Correia, R. C.; Leite, N. P.; Bueno, C. E. G.; Dos Santos Pinheiro, R. L.; De Santana, J. S.; Da Silva, J. L.; Sales, A. T.; De Souza, C. C.; Da Silva Aquino, K. A.; De Souza, R. B.; Pinheiro, I. O.; Henríquez, J. R.; Schuler, A. R. P.; De Sá Barretto Sampaio, E. V.; Dutra, E. D.; Menezes, R. S. C., 2021. Valorizing municipal organic waste to produce biodiesel, biogas, organic fertilizer, and value-added chemicals: an integrated biorefinery approach. **Biomass Conversion and Biorefinery**.

Souza, H. J. P. L.; Arantes, M. D. C.; Vidaurre, G. B.; Andrade, C. R., Carneiro, A. D. C. O.; De Souza, D. P. L.; Protásio, T., 2020. Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. **Renewable Energy**, v. 149, p. 128-140.

Souza, L. A. F.; Ferrarezi Junior, E., 2022. Perspectivas Para o Mercado da Goiaba. **Revista Interface Tecnológica**, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 198-209, 30 jun. 2022. <http://dx.doi.org/10.31510/infa.v19i1.1348>

Souza, H.J.P.L., Muñoz, F., Mendonça, R.T., Sáez, K., Olave, R., Segura, C., de Souza, D.P.L., Protásio, T. de P., Rodríguez-Soalleiro, R., 2021a. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. **Renew Energy** 163, 1802–1816. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.065>

Souza, L. L. P.; Rajabi Hamedani, S.; Silva Lora, E. E.; Escobar Palacio, J. C.; Comodi, G.; Villarini, M.; Colantoni, A., 2021b. Theoretical and technical assessment of agroforestry residue potential for electricity generation in Brazil towards 2050. **Energy Reports**, 7, 2574–2587.

Stachowicz, P., Stolarski, M.J., 2023. Short rotation woody crops and forest biomass sawdust mixture pellet quality. **Ind Crops Prod** 197, 116604. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2023.116604>

Stolarski, M. J., Stachowicz, P.; Dudzic, P., 2022. Wood pellet quality depending on dendromass species. **Renewable Energy**, v. 199, pág. 498-508.

Svedberg, U.; Samuelsson, J.; Melin, S., 2008. Hazardous off-gassing of carbon monoxide and oxygen depletion during ocean transportation of wood pellets. **Annals of occupational hygiene**, v. 52, n. 4, p. 259-266, 2008.

TAPPI, 2017. **T 204 cm-97**: Solvent extractives of wood and pulp. Atlanta, GA, USA.

Takemoto, E.; Okada, I, A.; Garbelotti, M. L.;Tavares, M.; Aued Pimentel, S., 2001. Composição química da semente do óleo de baru nativo do Município de Pirenópolis, Estado de Goiás. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**. São Paulo, v.60, n.2, p.113-117.

Toscano, G.; Riva, G.; Pedretti, E. F.; Corinaldesi, F.; Mengarelli, C.; Duca, D., 2013. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. **Journal Biomass and Bioenergy**, Barking, Inglaterra, v. 56, p. 317-322.

Tsuchiya, Y.; Yoshida, T., 2017. Pelletization of brown coal and rice bran in Indonesia: characteristics of the mixture pellets including safety during transportation. **Fuel Processing Technology**, v. 156, p. 68-71.

Tumuluru, J. S., 2016 Consumo específico de energia e qualidade de pellets de madeira produzidos com moagem de pinheiro lodgepole com alto teor de umidade em uma peletizadora de matriz plana. **Pesquisa e Projeto em Engenharia Química** , v. 82-97.

Tumuluru, J.S., Sokhansanj, S., Lim, C. J., Bi, T., Lau, A., Melin, S., Sowlati, T.; Oveisi, E., 2010. Qualidade dos pellets de madeira produzidos na Colúmbia Britânica para exportação. **Engenharia Aplicada à Agricultura** v. 26, n. 6, p 1013-1020.

Vale, A. T.; Olsen, L. B., 2013. Produção de carvão vegetal de casca de Baru (*Dipteryx alata*) utilizando células de carbonização. **Revista FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 43, n. 1, p. 117 - 124.

Vallilo, M. I., Tavares, M.; Aued, S., 1990. Composição química da polpa e da semente do fruto do cumbaru (*Dipteyx alata* Vog.) – caracterização do óleo da semente. **Revista do Instituto Florestal**, 2: 115-125.

Whittaker, C., Shield, I., 2017. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 71, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>

Yang, W., Yang, F., Zhang, X., Zhu, P., Peng, H., Chen, Z., Che, L., Zhu, S., Wu, S., 2021. Investigation of holocellulose-lignin interactions during pyrolysis of wood meal by TGA-FTIR. **Biomass Convers Biorefin** 1–10. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01455-4/FIGURES/5>

Zhang, C.; Chen, W.; Ho, S.; Park, Y.; Wang, C.; Zhang, Y., 2023. Pelletization property analysis of raw and torrefied corn stalks for industrial application to achieve agricultural waste conversion. *Energy*, [S.L.], v. 285, p. 129463. **Elsevier BV**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2023.129463>.

Zhang, Y., Silcock, P., Jones, J.R., Eyres, G.T., 2020. Changes in wood smoke volatile composition by manipulating the smoke generation conditions. **J Anal Appl Pyrolysis** 148, 104769. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.104769>

Zhao, N., Li, B., Ahmad, R., Ding, F., Zhou, Y., Li, G., Zayan, A.M.I., Dong, R., 2021. Dynamic relationships between real-time fuel moisture content and combustion-emission-performance characteristics of wood pellets in a top-lit updraft cookstove. **Case Studies in Thermal Engineering** 28, 101484. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101484>

Zhou, A., Xu, H., Tu, Y., Zhao, F., Zheng, Z., Yang, W., 2019. Numerical investigation of the effect of air supply and oxygen enrichment on the biomass combustion in the grate boiler. **Appl Therm Eng** 156, 550–561. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2019.04.053>

APÊNDICES

APÊNDICE A – Médias utilizadas na Figura 2.

Tabela 1. Médias das variáveis relacionadas às biomassas investigadas.

Propriedades	Biomassa				
	DA	CI	CS	PG	CSB
Diâmetro	6,03 (±0,06) b	6,21 (±0,02) a	6,11 (±0,02) ab	6,1 (±0,03) ab	6,13 (±0,03) ab
Comprimento	26,05 (±0,90) a	14,94 (±0,46) d	18,09 (±0,42) c	16,92 (±0,28) cd	21,38 (±1,09) b
Teor de umidade	6,56 (±0,10) b	1,42 (±0,19) d	4,17 (±0,05) c	1,86 (±0,22) d	10,17 (±0,05) a
Densidade a granel	579,20 (±6,96) c	672,64 (±3,55) a	670,56 (±7,15) a	671,04 (±3,39) a	647,52 (±3,86) b
Materiais Voláteis	74,11 (±0,39) c	78,53 (±0,35) b	81,60 (±0,32) a	79,92 (±0,44) b	74,39 (±0,27) c
Cinzas	2,07 (±0,04) d	2,79 (±0,02) b	1,84 (±0,03) e	2,20 (±0,02) c	4,01 (±0,02) a
Carbono fixo	23,82 (±0,38) a	18,68 (±0,35) c	16,56 (±0,31) d	17,88 (±0,45) cd	21,60 (±0,29) b
Extrativos	38,67 (±0,06) b	5,95 (±0,09) d	7,39 (±0,28) c	1,56 (±0,13) e	57,48 (±0,11) a
Lignina	38,94 (±0,41) a	35,37 (±0,61) b	29,79 (±0,17) d	32,16 (±0,27) c	22,27 (±0,74) e
Holocelulose	22,40 (±0,46) d	58,69 (±0,53) c	62,82 (±0,42) b	66,28 (±0,18) a	19,05 (±0,81) e
Dureza mecânica	54,05 (±1,63)	51,33 (±2,22)	52,51 (±2,12)	56,08 (±3,03)	52,50 (±3,52)
Poder calorífico superior	20,45 (±0,09) a	19,79 (±0,15) ab	19,43 (±0,19) b	19,66 (±0,20) b	18,52 (±0,03) c
Poder calorífico inferior	19,17 (±0,09) a	18,52 (±0,15) ab	18,15 (±0,19) b	18,39 (±0,20) b	17,25 (±0,03) c
Poder calorífico útil	17,39 (±0,08) bc	18,10 (±0,15) a	17,29 (±0,19) c	18,00 (±0,20) ab	15,36 (±0,03) d
Densidade energética	10,03 (±0,05) c	12,12 (±0,10) a	11,54 (±0,12) b	12,02 (±0,13) a	9,90 (±0,02) c

Médias seguidas pela mesma letra, na mesma linha, não diferem significativamente ao nível de significância de 5% pelo teste de Tukey. (): erro padrão. Fonte: a autora (2023).