UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

SABRINA MENDES INÁCIO

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS NA PIRÓLISE CATALÍTICA COM ÓXIDO DE ZINCO

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2024

SABRINA MENDES INÁCIO

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS NA PIRÓLISE CATALÍTICA COM ÓXIDO DE ZINCO

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

Conselheira: Msc. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2024

SABRINA MENDES INÁCIO

AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DOS PRODUTOS GERADOS NA PIRÓLISE CATALÍTICA COM ÓXIDO DE ZINCO

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 30 de setembro de 2024.

COMISSÃO EXAMINADORA

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

Eng. Florestal Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo

Engª. Florestal Allana Katiussya Silva Pereira
Universidade de São Paulo

"Afinal, aquilo que amamos sempre será parte de nós."

- Sirius Black, Harry Potter.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e sobre todas as coisas, agradeço à Deus, por sua infinita bondade e misericórdia, e a Nossa Senhora de Aparecida por sua intercessão e proteção.

Agradeço à minha fortaleza, minha melhor amiga e a base de tudo: minha mãe, Sirlene. Meu orgulho e admiração por ter me criado diante de tantas dificuldades, sempre acreditando em mim, mesmo quando eu não conseguia acreditar.

Aos meus avós, Mário e Lurdes que faleceram durante a graduação. Escrevo com lágrimas de muitas saudades e carinho, amarei vocês eternamente e sempre serão lembrados por todo amor e cuidado que me proporcionaram.

À minha irmã Sharllenne e ao meu sobrinho e afilhado, Guilherme, que enche meu coração de amor e alegria.

Agradeço aos meus grandes amigos, Brenno e Bruno, que estiveram comigo nos piores e melhores momentos, que me acolheram como família, com quem tive as melhores histórias, e que são os maiores presentes que ganhei da faculdade.

Ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB), ao meu professor e orientador, Ananias Francisco Dias Júnior, agradeço pela orientação e paciência. A Allana Katiussya, pelas valiosas contribuições, e em especial à Gabriela Cupertino, cuja paciência, dedicação e inteligência admiráveis foram fundamentais para que eu pudesse concluir este trabalho.

Às minhas amigas de Muriaé, Isadora e Gabriella, que apesar da distância, sempre estiveram presentes.

À Dani, Márcio e Paloma, que chegaram no último ano de faculdade e se tornaram grandes amigos.

À minha madrinha Nádia, ao meu tio César, à minha querida tia Hélida e a toda a sua família, que sempre me acolheu com muito carinho.

Em especial, aos amigos Marina, Duda, Carlos, Amanda, Karoline, Gabrieli, Beatriz, Maressa, Ana Flávia e José, pelos momentos de alegria, que tornaram mais leve a caminhada.

E por fim, à todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram com minha trajetória.

Muito obrigada!

RESUMO

A pirólise catalítica emerge como uma estratégia promissora para a produção de biocombustíveis de alta qualidade. O uso estratégico de catalisadores, como o ZnO, tem mostrado melhorar a eficiência da co-pirólise e aumentar o rendimento de hidrocarbonetos aromáticos no bio-óleo. Neste estudo, investigamos o impacto de diferentes proporções de catalisador ZnO na pirólise da biomassa de *Eucalyptus spp.*, visando entender suas influências nos produtos finais. Utilizamos a biomassa de *Eucalyptus* spp., realizando análises detalhadas de suas propriedades físico-químicas. Os catalisadores ZnO foram caracterizados previamente antes da aplicação na pirólise catalítica. Foram adicionados 0%, 10%, 20% e 30% de ZnO à biomassa durante o processo, conduzindo as pirólises em atmosfera com baixa presença de oxigênio, sem adição de gases. A temperatura final foi mantida em 600°C, com taxa de aquecimento de 5°C/min e tempo de residência de uma hora. Os bio-óleos foram submetidos a análises abrangentes de pH, densidade, viscosidade, teor de sólidos e poder calorífico para compreender suas características. Os chars resultantes, foram avaliados quanto a propriedades químicas, físicas, energéticas e estruturais, oferecendo uma visão completa da pirólise catalítica. Com base nos resultados, visamos impulsionar o potencial da co-pirólise catalítica como uma abordagem inovadora na produção de biocombustíveis, buscando otimizar eficiência e sustentabilidade na geração de energia renovável e limpa.

Palavras-chave: catalisador; biocombustíveis; caracterização do bio-óleo*;* ZnO

ABSTRACT

Catalytic pyrolysis emerges as a promising strategy for the production of high-quality biofuels. The strategic use of catalysts, such as ZnO, has been shown to improve the efficiency of co-pyrolysis and increase the yield of aromatic hydrocarbons in bio-oil. In this study, we investigated the impact of different proportions of ZnO catalyst on the pyrolysis of *Eucalyptus* spp. biomass, aiming to understand its influence on the final products. *Eucalyptus* spp. biomass was used, and detailed analyses of its physicochemical properties were conducted. The ZnO catalysts were characterized prior to their application in catalytic pyrolysis. We added 0%, 10%, 20%, and 30% of ZnO to the biomass during the process, conducting pyrolysis under a low-oxygen atmosphere, without the addition of gases. The final temperature was maintained at 600°C, with a heating rate of 5°C/min and a residence time of one hour. The bio-oils underwent comprehensive analyses of pH, density, viscosity, solids content, and calorific value to assess their characteristics. The resulting chars were evaluated for their chemical, physical, energy, and structural properties, providing a complete overview of catalytic pyrolysis. Based on the results, we aim to enhance the potential of catalytic co-pyrolysis as an innovative approach to biofuel production, seeking to optimize efficiency and sustainability in the generation of renewable and clean energy.

Keywords: catalytic pyrolysis; biofuels; *Eucalyptus* spp.; ZnO

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 9

1. INTRODUÇÃO 10

2. OBJETIVOS 12

2.1 Objetivo geral 12

2.2 Objetivos específicos 12

3. REFERENCIAL TEÓRICO 13

3.1 Pirólise Catalítica e óxido de zinco como catalisador 13

3.2 Produtos da pirólise catalítica e suas aplicabilidades 14

4. MATERIAL E MÉTODOS 16

4.1 Obtenção e caracterização das matérias-primas 16

4.2 Obtenção do char e bio-óleo através da pirólise catalítica 16

4.3 Caracterização do char e bio-óelo da pirólise catalítica 18

4.4 Análise de dados 18

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 19

5.1. Caracterização da biomassa 19

5.2. Rendimento da pirólise catalítica.....20

5.3. Caracterização do char.....21

5.4. Caracterização do bio-óleo 25

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de co-pirólise catalítica. Em que: (A) Reator fixo utilizado no processo de co-pirólise catalítica; (B) Vista interna do forno tipo mufla envolvido no processo de co-pirólise catalítica; (C) Sistema de coleta de bio-óleo utilizado no processo de co-pirólise catalítica. Fonte: Adaptado de Cupertino et al. (2024).....17

Figura 2: A: Rendimento em líquido pirolenhoso. Equação: RLP (%) = 47,2334 – 0,6145 CAT; R^2 = 0,902; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). B: Rendimento em carvão vegetal. Equação: RCV (%) = 26,7598 + 0,5778 CAT; R^2 = 0,8482; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024). 20

Figura 3: Caracterização do char. Em que A: Materiais voláteis. Equação: MV (%) = 12,12101 – 0,09845 CAT; R^2 = 0,2579; p-valor < 0,05. Fonte: Elaboração própria (2024). B: Cinzas. Equação: CZ (%) = 6,499 – 1,499 CAT; R^2 = 0,8915; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). C: Carbono fixo. Equação: CF (%) = 85,9818 – 2,8803 CAT + 0,0492 CAT^2; R^2 = 0,9729; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024).....22

Figura 4: Propriedades energéticas do carvão co-pirólitico. A: Poder calorífico inferior. Equação: PCI = 7784,08 – 76,09 CAT; R^2 = 0,5926; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). B: Poder calorífico superior. Equação: PCS = 8108,08 – 76,09 CAT; R^2 = 0,5926; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). C: Poder calorífico útil. Equação: PCU = 7440,96 – 75,28 CAT; R^2 = 0,6095; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024). 23

Figura 5: pH do carvão vegetal. Equação: pH = 9,006 – 0,6333 + 0,055910 CAT^2 - 0,001236 CAT^3; R^2 = 0,9959; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024). 25

Figura 6: Viscosidade do líquido pirolenhoso. Equação: VL (cP) = 115,6816 – 0,2482 CAT; R^2 = 0,5469; p-valor < 0,01.Fonte: A Autora (2024). 26

Figura 7: pH Líquido. Equação: pH = 2,4088750 + 0,0074625 CAT – 0,0001712 CAT^2; R^2 = 0,7731; p-valor < 0,01. Fonte: A Autora (2024). 28

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia está em constante ampliação, devido ao contínuo crescimento da industrialização e da população global. Diante desse cenário, torna-se essencial a exploração de novas alternativas energéticas para complementar os recursos tradicionais, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Nesse contexto, a biomassa surge como uma opção fundamental, reconhecida por sua renovabilidade, acessibilidade econômica e preocupação ambiental (Zhou *et al.*, 2013). A biomassa, composta por celulose, hemiceluloses e lignina, representa uma matéria-prima versátil, capaz de ser convertida em combustíveis e produtos químicos valiosos em uma única unidade de produção (IQBAL et al., 2011; Kumar et al., 2009). Ao ser utilizada na geração de calor e energia, a biomassa desempenha um papel relevante na mitigação das emissões de gases de efeito estufa, por meio de processos de regeneração e combustão que ajudam a reduzir os impactos ambientais (Huber, Iborra e Corma, 2006).

Entre os diversos processos de conversão termoquímica disponíveis, quatro opções se destacam: pirólise, gaseificação, combustão direta e liquefação. A pirólise é um processo no qual a matéria-prima orgânica é aquecida na ausência total ou parcial de oxigênio, levando à decomposição térmica da mesma em produtos como gases, líquidos e carvão vegetal (Cupertino *et al.*, 2024). Esse método é amplamente utilizado na produção de biocombustíveis e na obtenção de produtos químicos a partir de resíduos agrícolas, florestais e urbanos. A pirólise catalítica é uma variante da pirólise que ocorre na presença de um catalisador, que acelera a quebra das ligações químicas dos materiais orgânicos, resultando na formação de produtos desejados, como gases, líquidos e sólidos carbonizados (Cai *et al.*, 2024). Esse processo é especialmente interessante porque pode aumentar a eficiência da conversão da matéria-prima em produtos úteis, além de possibilitar uma maior seletividade na obtenção desses produtos. O catalisador utilizado na pirólise catalítica pode ser de diferentes tipos, como óxidos metálicos, zeólitas, metais suportados e outros materiais (Chen *et al.*, 2024).

O óxido de zinco (ZnO) é um exemplo comum de catalisador empregado nesse processo devido à sua alta atividade catalítica e estabilidade térmica (Hernando *et al.*, 2017). Estudos revelam que os resultados mais promissores têm sido alcançados com o emprego do ZnO nesse processo (Nokkosma Èki *et al.*, [s.d.]; Nokkosmäki *et al.*,

2000a). O ZnO foi aplicado em um processo de pirólise flash catalítica de pressão atmosférica, realizado em uma única etapa e em atmosfera de hidrogênio, visando à produção de hidrocarbonetos (Nokkosmäki *et al.*, 2000a). Nesse contexto, o catalisador substituiu a areia fluidizada. Além disso, pesquisas sobre a reforma catalítica a vapor de oxigenados derivados de biomassa têm explorado o uso do óxido de zinco para a produção de hidrogênio.

A quantidade de catalisador ZnO empregada na pirólise catalítica pode afetar significativamente o rendimento e as propriedades químicas e físicas dos produtos obtidos (Liou e Huang, 2013). Aumentar a quantidade de ZnO pode acelerar a taxa de reação e a conversão da matéria-prima em produtos desejados. No entanto, é essencial encontrar um equilíbrio adequado na quantidade de catalisador utilizado, pois o excesso de ZnO pode resultar na formação de subprodutos indesejados ou na redução da seletividade para os produtos desejados. Portanto, ao compreender como diferentes proporções de ZnO afetam o processo de pirólise da biomassa de *Eucalyptus* spp., podemos otimizá-lo para maximizar o rendimento e a qualidade dos biocombustíveis, produtos químicos e materiais obtidos, contribuindo assim para a produção sustentável a partir de recursos renováveis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar o efeito de várias proporções do catalisador ZnO na pirólise da biomassa proveniente de *Eucalyptus* spp. e compreender como essas variações influenciam os produtos resultantes.

2.2 Objetivos específicos

(i) Avaliar o desempenho da pirólise da biomassa de *Eucalyptus* spp. em diferentes proporções do catalisador ZnO;

(ii) Investigar as características químicas e físicas do bio-óleo e do char produzidos através da pirólise catalítica da biomassa de *Eucalyptus* spp. com diferentes proporções do catalisador ZnO;

(iii) Comparar as eficiências de conversão da biomassa de *Eucalyptus* spp. em produtos úteis em diferentes condições catalíticas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Pirólise Catalítica e óxido de zinco como catalisador

No campo da conversão termoquímica de biomassa, a pirólise destaca-se como um processo central, ao lado de métodos como gaseificação, liquefação, carbonização e combustão. Esses processos oferecem diferentes caminhos para a conversão de biomassa em produtos de valor agregado, como biocombustíveis e biochar. A pirólise, em particular, distingue-se pela sua flexibilidade e pelo potencial de aplicação em diversas escalas. Assim, compreender detalhadamente os mecanismos envolvidos na pirólise é essencial para otimizar os processos de conversão e melhorar a eficiência dessas tecnologias. Esse conhecimento é vital para o desenvolvimento de aplicações em engenharia, especialmente no que tange à análise cinética, que permite prever o comportamento da pirólise e projetar reatores de grande escala com maior eficiência (Papari; Hawboldt, 2015).

A pirólise catalítica, por sua vez, envolve a decomposição de materiais orgânicos na presença de um catalisador, que desempenha um papel fundamental na aceleração das reações e na modificação dos produtos obtidos, como biocombustíveis e produtos químicos. O catalisador facilita a quebra de polímeros complexos em moléculas menores, influenciando diretamente a composição final dos produtos (Uzun; Varol; Putun, 2016). Identificar as combinações ideais de catalisadores e biomassa, além de desenvolver catalisadores capazes de influenciar positivamente a decomposição dos mais de 300 compostos orgânicos voláteis formados, são alguns dos principais desafios enfrentados pela pirólise catalítica (Dickerson e Soria, 2013). As propriedades ácidas e a estrutura porosa dos catalisadores desempenham um papel crucial na modificação dos produtos finais (Lima e Perez-Lopez, 2018).

O óxido de zinco (ZnO), amplamente utilizado como catalisador, destaca-se por sua eficiência na pirólise catalítica. Este composto, um pó branco de alta transparência à luz visível, é conhecido por sua condutividade elétrica e por facilitar a decomposição da biomassa em temperaturas mais baixas (Nokkosmäki et al., 2000b). Catalisadores à base de óxidos, como o ZnO, apresentam vantagens importantes, como a facilidade de

reutilização, maior tolerância à presença de água e ácidos graxos, e uma vida útil prolongada (Olutoye; Hameed, 2013). Essas características tornam o ZnO uma escolha promissora para otimizar o processo e melhorar a qualidade dos produtos obtidos (Durigon e Silva, 2018).

3.2. Influência de diferentes proporções de catalisadores nos rendimentos e propriedades dos produtos gerados

3.3 Produtos da pirólise catalítica e suas aplicabilidades

Os produtos gerados pela pirólise catalítica variam significativamente conforme os materiais de entrada, as condições de reação (temperatura e pressão) e o catalisador empregado. Em termos gerais, os produtos são divididos em três frações: gasosa, líquida e sólida, cada uma com características e aplicações distintas. O bio-óleo, também conhecido como óleo de pirólise, é uma mistura complexa de compostos orgânicos, incluindo ácidos, fenóis, álcoois e hidrocarbonetos aromáticos. Sua composição química é fortemente influenciada pelas condições de reação, pela biomassa utilizada e pelos catalisadores aplicados (Akubo, Nahil, & Williams, 2019). No entanto, sua alta acidez e instabilidade representam grandes desafios para seu uso direto como combustível. A utilização de catalisadores metálicos, como zeólitas e óxidos de metais (por exemplo, Ni, Fe, Zn), tem mostrado resultados promissores ao promover a desoxigenação do bio-óleo, melhorando sua estabilidade e tornando-o mais adequado para uso como biocombustível (Akubo, Nahil, & Williams, 2019; Wang et al., 2022).

A pirólise catalítica com catalisadores à base de zeólitas resulta em bio-óleos com menor teor de oxigênio e maior concentração de compostos aromáticos, altamente valorizados na indústria petroquímica. Além disso, a co-pirólise — que combina biomassa com plásticos ou resíduos agroindustriais — surge como uma estratégia promissora para aumentar o rendimento de hidrocarbonetos leves e melhorar o potencial energético do bio-óleo (Wang et al., 2022). Outro subproduto importante da pirólise catalítica é o biochar (carvão ativado), que possui grande relevância em aplicações

ambientais. O biochar resultante da pirólise de biomassa possui uma estrutura porosa e alta área superficial, o que lhe confere uma capacidade elevada de adsorção de poluentes orgânicos e metais pesados presentes na água e no ar (Tan et al., 2015). Além disso, o biochar tem um papel significativo na captura e armazenamento de carbono (CCS), contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas ao adsorver CO_2. O carvão ativado resultante da pirólise também pode ser utilizado para remover poluentes atmosféricos, oferecendo uma solução sustentável para a adsorção de compostos tóxicos (Wang et al., 2022).

A fração gasosa da pirólise catalítica é composta por gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e hidrogênio (H_2), sendo uma fonte de valor energético considerável. O syngas gerado pode ser usado como combustível em processos industriais ou convertido em combustíveis líquidos por meio da síntese Fischer-Tropsch (Akubo, Nahil, & Williams, 2019). A aplicação de catalisadores metálicos durante a pirólise catalítica aumenta a produção de gases como o hidrogênio, otimizando a eficiência energética do processo (Wang et al., 2022).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Obtenção e caracterização das matérias-primas

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi utilizada biomassa (madeira) de *Eucalyptus* spp. proveniente de um plantio experimental localizado no Espírito Santo – Brasil. Em seguida, foi determinada a química imediata da biomassa, através do teor de materiais voláteis, teor de cinzas (ASTM, 2021) e carbono fixo. O ZnO envolvido no processo de pirólise catalítica foi fornecido pela empresa PQ Sílicas. Antes dos experimentos, o catalisador foi calcinado em um forno mufla a 800 °C por 2 h para remoção do molde e resíduos (Fermoso *et al.*, 2016). Após a caracterização das matérias-primas envolvidas no processo, a biomassa foi moída em um moinho de facas para obtenção da serragem composta com granulometria entre 40 e 60 mesh. Para avaliar a influência do catalisador ZnO no bio-óleo e no char produzidos, utilizou-se o método de catálise *in situ*. Foram adicionados 0%, 10%, 20% e 30% de catalisador em relação ao peso da biomassa, com as amostras sendo homogeneizadas e identificadas.

4.2 Obtenção do char e bio-óleo através da pirólise catalítica

As pirólises catalíticas foram conduzidas em um reator de leito fixo (Figura 1A, B). Este formato de reator é reconhecido como uma tecnologia eficaz e amplamente utilizada para o processamento de partículas de matéria-prima sólida de tamanho uniforme (Wang et al., 2021a). Para cada teste, 300 g de matéria-prima (conforme as proporções descritas anteriormente) foram introduzidos em um reator metálico fechado (com 8 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento) dentro de um forno mufla. Os experimentos foram conduzidos em uma atmosfera com baixo teor de oxigênio, sem entrada de gás adicional, com taxa de aquecimento de $5^{o}C.min^{-1}$ e a temperatura final do forno foi mantida a 600°C por 60 minutos. Um condensador de gás, resfriado com água e gelo, foi conectado à mufla (Dias Junior et al., 2020), e o bio-óleo (produto líquido) foi coletado em um kitassato (Figura 1C).

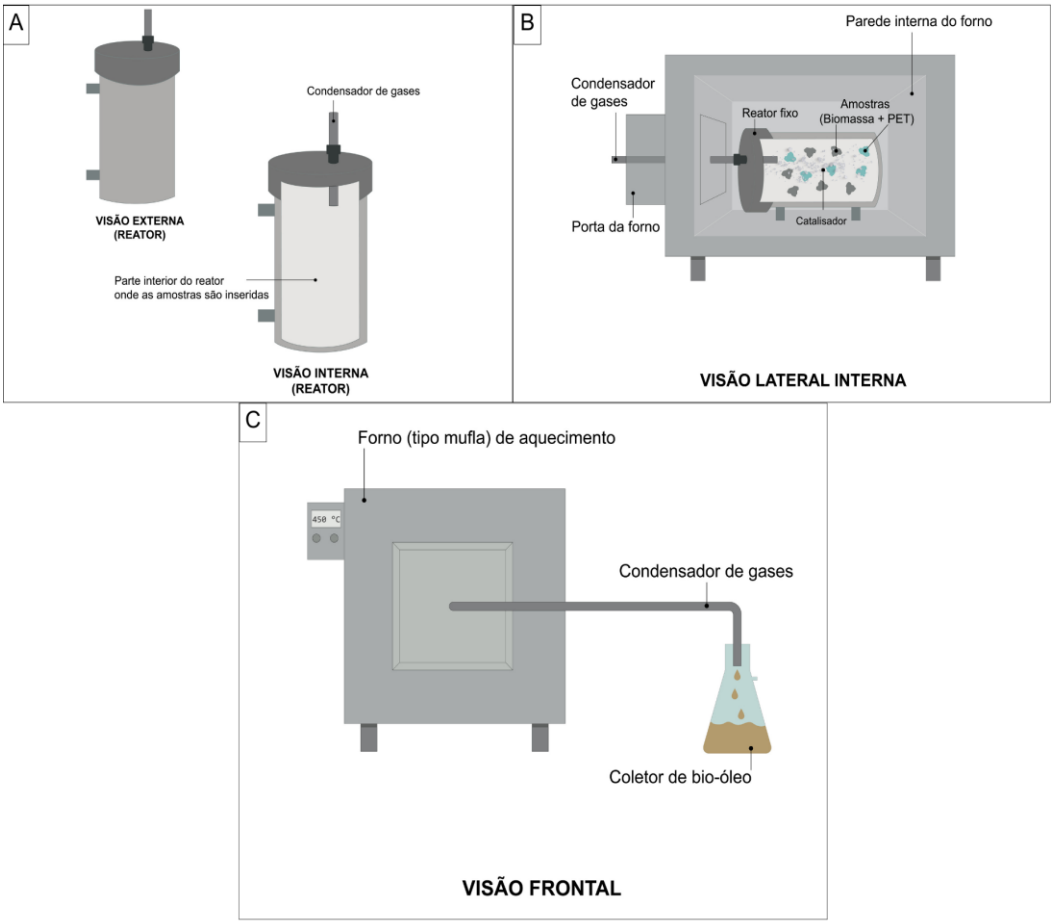


Figura 1: Sistema de co-pirólise catalítica. Em que: (A) Reator fixo utilizado no processo de co-pirólise catalítica; (B) Vista interna do forno tipo mufla envolvido no processo de co-pirólise catalítica; (C) Sistema de coleta de bio-óleo utilizado no processo de co-pirólise catalítica. Fonte: Adaptado de Cupertino et al. (2024).

Foram quantificados os rendimentos gravimétricos dos chars e bio-óleo (Equações 1 e 2). O rendimento de gás foi estimado pela subtração dos rendimentos de produtos líquidos e sólidos do total (Equação 3).

$$RCV = \left(\frac{Mcv}{Mm}\right) x100 \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$RLP = \left(\frac{Mbio}{Mm}\right) x100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

$$RGNC = 100 - (RCV + RBIO) \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que: RCV = rendimento em carvão vegetal (%); Mcv = massa do carvão vegetal (g); Mm = massa seca da madeira (g); RBIO = rendimento em bio-óleo (%); Mbio = massa do boi-óleo (g); RGNC = rendimento em gases não-condensáveis (%).

4.3 Caracterização do char e bio-óelo da pirólise catalítica

Os bio-óleos produzidos foram analisados quanto ao pH, densidade (D = Massa/Volume, em g/cm³), viscosidade (conforme ASTM, 2014) e teor de sólidos, com todas as análises realizadas em triplicata. Para o char, a umidade em base úmida foi determinada conforme o método padrão de análise química de carvão vegetal (ASTM, 2021), e foram quantificados os teores de cinzas, material volátil e carbono fixo. Também foram realizadas análises de pH no char para avaliar a influência do catalisador. O poder calorífico superior (kcal kg^{-1}) das amostras foi obtido usando uma bomba calorimétrica adiabática (IKA C2000, Alemanha), conforme a norma EN 14918. A partir desses dados, foram calculados o poder calorífico inferior, o poder calorífico útil (Equação 4).

$$\mathrm{PCU} = \left(\mathrm{PCU} * \left(\frac{(100-\mathrm{M})}{100} - 6\mathrm{M}\right)\right) * 4.1868\mathrm{E} - 03 \qquad \text{(Equation 4)}$$

Em que: PCU = poder calorífico líquido (MJ kg^{-1}); PCI = poder calorífico inferior (kcal kg^{-1}), obtido subtraindo PCS – 304 (energia de formação do vapor d'água); M = teor de umidade em base úmida (%); 4,1868E-03 = fator de conversão de kcal kg^{-1} para MJ kg^{-1}.

4.4 Análise de dados

Foi realizada uma estatística descritiva incluindo A, B e C, para os dados de biomassa. Os demais dados foram analisados em três repetições, e submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett). Quando não atendido estes pressupostos, realizou-se a transformação de boxcox. Atendendo aos pressupostos, a análise de variância foi realizada (α = 0,05) seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado, com quatro tratamentos relacionados a adição de catalisador (0, 10, 20 e 30%). Quando houve diferença significativa, realizou-se o ajuste de modelo de regressão (α = 0,05). Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização da biomassa

A Tabela 1 apresenta os resultados da caracterização da biomassa de *Eucalyptus spp.*.

Tabela 1: Análise química imediata de *Eucalyptus* spp.

Caracterização da biomassa	
Materiais Voláteis (%)	85,55
Cinzas (%)	0,26
Carbono Fixo (%)	14,19

A elevada porcentagem de materiais voláteis na biomassa de *Eucalyptus spp.* (80,86% a 81,96%) indica uma considerável capacidade de conversão em bio-óleo e gases durante a pirólise catalítica. Biomassas com alto teor de voláteis tendem a gerar um maior rendimento de bio-óleo, o que é vantajoso para a produção de biocombustíveis líquidos (Bridgwater, 2012). Além disso, essa alta volatilidade contribui para a eficiência do processo de pirólise, resultando em uma maior fração de produtos líquidos e gasosos. O teor de cinzas, que varia de 0,30% a 1%, é relativamente baixo, um aspecto positivo para o processo de pirólise. Cinzas podem atuar como catalisadores indesejados, diminuindo a eficiência do processo e afetando negativamente a qualidade dos produtos finais. Portanto, um baixo teor de cinzas é preferível, pois reduz a formação de resíduos sólidos e melhora a qualidade do biochar, aumentando seu poder calorífico e sua utilidade em áreas como fertilização do solo e adsorção de poluentes (Demirbas, 2004).

O carbono fixo da biomassa variou de 14,45% a 18,61%, sendo uma variável essencial para a produção de biochar de alta qualidade. Um maior teor de carbono fixo geralmente indica um biochar com maior poder calorífico e excelente capacidade de adsorção (Lehmann; Joseph, 2015). Biochars com essas características são valorizados por suas propriedades de retenção de nutrientes e capacidade de melhorar a estrutura do solo, além de serem amplamente utilizados como adsorventes de poluentes em aplicações ambientais.

5.2. Rendimento da pirólise catalítica

Os resultados obtidos mostram uma relação decrescente no rendimento de bio-óleo com o aumento da proporção de ZnO, e à medida que a proporção de catalisador aumenta (Figura 2A), o rendimento de carvão vegetal também aumenta (Figura 2B).

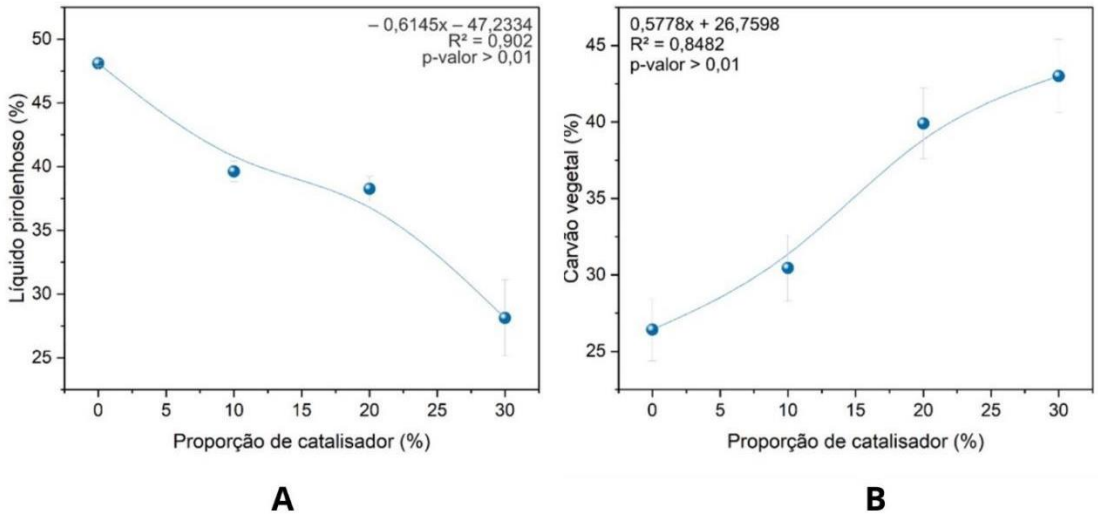


Figura 2: **A:** Rendimento em líquido pirolenhoso. Equação: RLP (%) = 47,2334 – 0,6145 CAT; R^2 = 0,902; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). **B:** Rendimento em carvão vegetal. Equação: RCV (%) = 26,7598 + 0,5778 CAT; R^2 = 0,8482; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024).

Conforme a concentração de ZnO aumenta, observa-se uma redução no rendimento de líquido pirolenhoso (Figura 2 A). Isso sugere que o catalisador está promovendo reações secundárias, como o craqueamento térmico, que convertem o líquido em frações gasosas como H_2, CH_4, CO e CO_2, que não se condensam e, portanto, diminuem a fração condensável do produto (Ferreira, 2014). Esse efeito é comum em processos catalíticos que favorecem a formação de produtos com menor peso molecular (Naqvi et al., 2014). Estudos com cascas de arroz mostram que a adição de ZnO à pirólise também aumenta a proporção de biomassa para catalisador, mas reduz o rendimento do bio-óleo, melhorando sua qualidade e estabilidade (Iisa et al., 2012). Fermoso et al. (2016) destacam que o uso de uma mistura de catalisadores, incluindo óxidos metálicos como MgO e ZnO, pode reduzir a quebra excessiva do bio-óleo.

O rendimento de char aumenta com a proporção de ZnO, subindo de aproximadamente 25% sem catalisador para cerca de 45% com uma concentração de 30% de ZnO (Figura 2B). Esse aumento indica que o catalisador promove a formação de carvão vegetal, possivelmente em detrimento da produção de líquidos e gases. Esse efeito pode ser desejável quando o objetivo é maximizar o rendimento de carvão em vez de líquidos (Zhang et al., 2013; Bridgwater, 2012). Na ausência do catalisador, a porcentagem de líquido pirolenhoso é maior, em torno de 50%, o que é esperado em um processo de pirólise tradicional (Adam, 2006). O rendimento de carvão vegetal é relativamente baixo sem catalisador devido à falta de craqueamento catalítico, resultando em uma menor conversão de biomassa em produto sólido. Os gases não condensáveis não apresentaram diferença estatística significativa, com uma média de 26%. Essa constância reflete a estabilidade desses gases durante o processo, indicando que as variações no processo experimental não impactaram significativamente a quantidade de gases não condensáveis produzidos.

5.3. Caracterização do char

A densidade a granel do biochar não apresentou variações significativas com a adição de diferentes concentrações de catalisador ZnO, mantendo um valor médio de 203,20 kg/m³ (± erro padrão). Isso indica que o catalisador não teve impacto relevante sobre a densidade do biochar gerado durante o processo de pirólise. A densidade a granel é um parâmetro crucial para aplicações do biochar como melhorador de solo, influenciando a porosidade, a retenção de água e a facilidade de transporte e manuseio.

A análise da química imediata revelou os valores de carbono fixo, voláteis e cinzas e estão representadas na Figura 3. Não foi possível identificar um padrão claro para o conteúdo de voláteis entre as amostras. Contudo, observa-se que, com o aumento da proporção de ZnO, ocorre uma maior degradação das macromoléculas da biomassa. Isso resulta em um material com menor teor de carbono fixo e maior quantidade de cinzas (Figura 3).

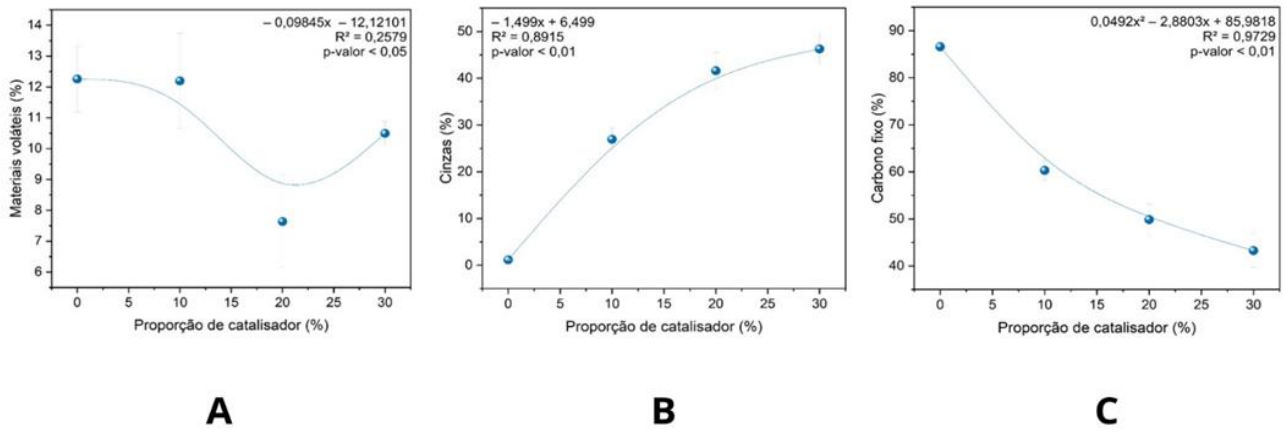


Figura 3: Análise química imediata do char advindo da pirólise catalítica com ZnO. Em que **A:** Materiais voláteis. Equação: MV (%) = 12,12101 – 0,09845 CAT; R^2 = 0,2579; p-valor < 0,05. Fonte: Elaboração própria (2024). **B:** Cinzas. Equação: CZ (%) = 6,499 – 1,499 CAT; R^2 = 0,8915; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). **C:** Carbono fixo. Equação: CF (%) = 85,9818 – 2,8803 CAT + 0,0492 CAT^2; R^2 = 0,9729; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024).

Os resultados para o teor de materiais voláteis mostraram uma curva com variação não linear. Observou-se uma leve redução no teor de voláteis à medida que a proporção de ZnO aumenta até cerca de 10%. Entre 10% e 25%, o teor de voláteis manteve-se estável, com um leve aumento na concentração de 30% de ZnO. A formação desses compostos está associada à evaporação e decomposição térmica dos componentes extrativos, bem como à decomposição térmica da celulose e hemicelulose. O óxido de zinco, como catalisador, influencia esses processos, aumentando a eficiência da decomposição térmica e afetando a produção de bio-óleo (Zhao, Jiang e Chen, 2017).

O teor de cinzas apresentou uma relação linear positiva com a proporção de ZnO, indicando que a quantidade de cinzas aumenta de forma clara com a concentração crescente do catalisador. O aumento no teor de cinzas resulta em um menor teor de carbono fixo no carvão vegetal. Embora altos valores de cinzas possam ser indesejáveis para algumas aplicações, o óxido de zinco promove uma maior formação de cinzas, o que pode ser vantajoso dependendo da aplicação desejada (Silva, 2019). Na pirólise, a presença de ZnO contribui para a formação de cinzas ao promover a decomposição de macromoléculas e a conversão em resíduos minerais. Reduzir o teor de cinzas pode melhorar a eficiência energética do carvão produzido, sendo que, para aplicações

energéticas, um material com baixo teor de cinzas e alto poder calorífico é preferível (Michalak et al., 2019).

O teor de carbono fixo diminui acentuadamente com o aumento da proporção de ZnO, indicando que o catalisador tem uma influência significativa sobre o conteúdo de carbono fixo. A presença de ZnO acelera a degradação das macromoléculas da biomassa, resultando em um carvão vegetal com menor conteúdo de carbono fixo. Isso reduz a eficiência do carvão como combustível sólido, uma vez que o carbono fixo é crucial para a combustão lenta e sustentada (Oliveira et al., 2010).

A Figura 4 mostra a relação do PCI = Poder Calorífico Inferior (A), PCS = Poder Calorífico Superior (B) e PCU = Poder Calorífico Útil (C) em função da proporção de catalisador utilizada na pirólise catalítica. O tratamento com 30% de catalisador à base de óxido de zinco resultou em uma redução significativa no poder calorífico.

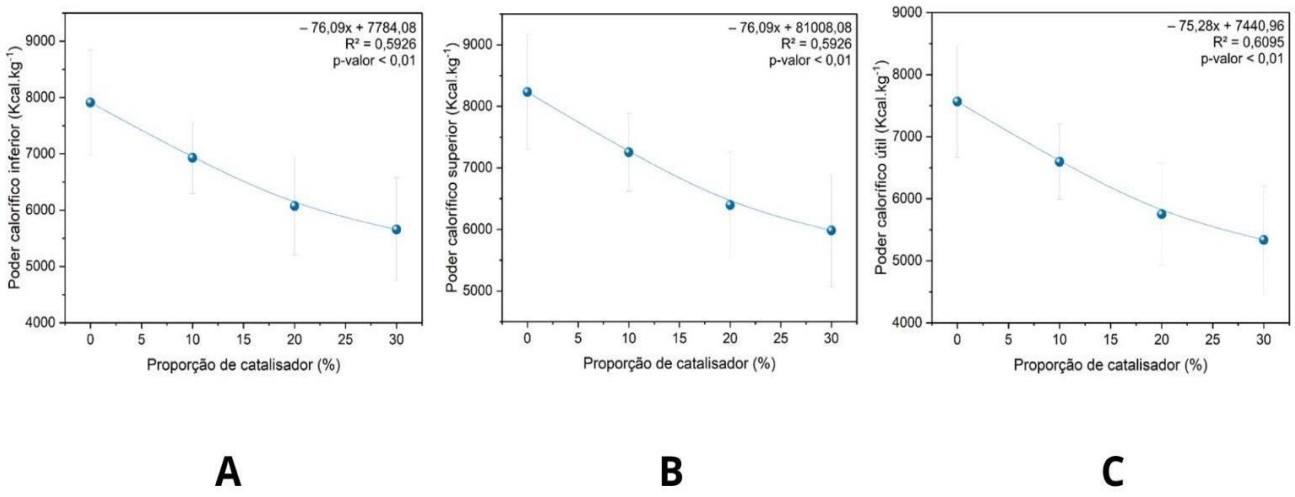


Figura 4: Poder calorífico do char advindo da pirólise catalítica com ZnO. **A**: Poder calorífico inferior. Equação: PCI = 7784,08 – 76,09 CAT; R^2 = 0,5926; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). **B:** Poder calorífico superior. Equação: PCS = 8108,08 – 76,09 CAT; R^2 = 0,5926; p-valor < 0,01. Fonte: Elaboração própria (2024). **C:** Poder calorífico útil. Equação: PCU = 7440,96 – 75,28 CAT; R^2 = 0,6095; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) está relacionado à quantidade de energia liberada pela combustão completa do combustível, sem considerar o calor de vaporização da água. Observa-se uma redução no PCI com o aumento da concentração de ZnO. O coeficiente angular da reta indica que a cada incremento de 1% na proporção de ZnO, há uma redução média de 76,09 kcal/kg no PCI. De forma semelhante, o Poder

Calorífico Superior (PCS) também diminui com o aumento da concentração de ZnO. A redução é de 76,09 kcal/kg por percentual de ZnO, começando em aproximadamente 8100 kcal/kg e chegando a cerca de 6000 kcal/kg com 30% de ZnO.

O Poder Calorífico Útil (PCU), que considera o poder calorífico real do combustível após descontar perdas como umidade e ineficiências do processo, segue a mesma tendência dos gráficos anteriores, com uma redução de 75,28 kcal/kg por percentual de ZnO. O PCU diminui de cerca de 7.440 kcal/kg para valores próximos de 5.000 kcal/kg com 30% de ZnO. Em comparação, Passinho et al. (2019) obtiveram um PCU de 4277,24 kcal/kg, valor inferior ao encontrado neste estudo. É evidente que o aumento da proporção de ZnO tem um impacto negativo nos valores energéticos do biochar, resultando em uma redução tanto no PCI quanto no PCS e PCU. Essa diminuição pode ser atribuída ao aumento no teor de cinzas e à redução na quantidade de carbono fixo, fatores diretamente relacionados à qualidade do material energético. Além de reduzir o poder calorífico, uma alta concentração de cinzas pode causar desgaste nos equipamentos, como alto-fornos, e afetar a qualidade do aço, gerando trincas e fissuras nas ligas metálicas (Vital et al., 2013).

Portanto, para aplicações energéticas, é recomendável controlar a concentração de ZnO durante a pirólise para otimizar a qualidade do biochar. Reduzir a proporção de ZnO pode melhorar o PCI, PCS e PCU do biochar, tornando-o um material mais eficiente para uso como combustível sólido. O biochar com menor teor de cinzas e maior carbono fixo terá melhores propriedades energéticas e pode ser mais adequado para aplicações que exigem alta eficiência calorífica.

Na Figura 5, o gráfico revela como o pH do char varia em função da porcentagem do ZnO. Com 30% de óxido de zinco, o pH apresentou um valor baixo de 7,0. Na ausência do catalisador, o pH foi alto, em torno de 9,0.

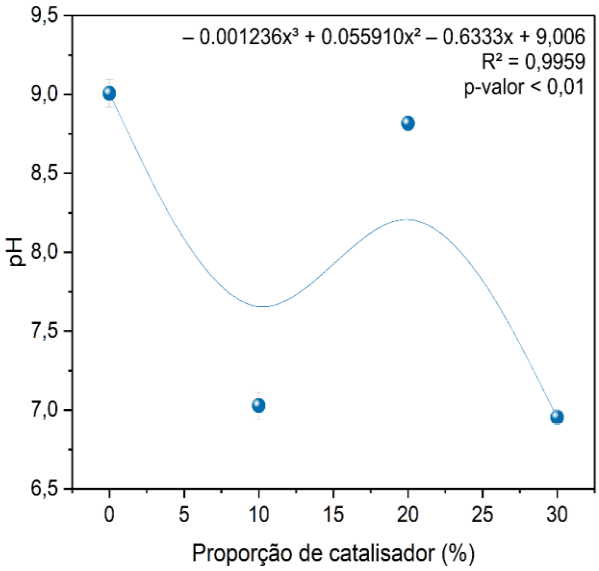
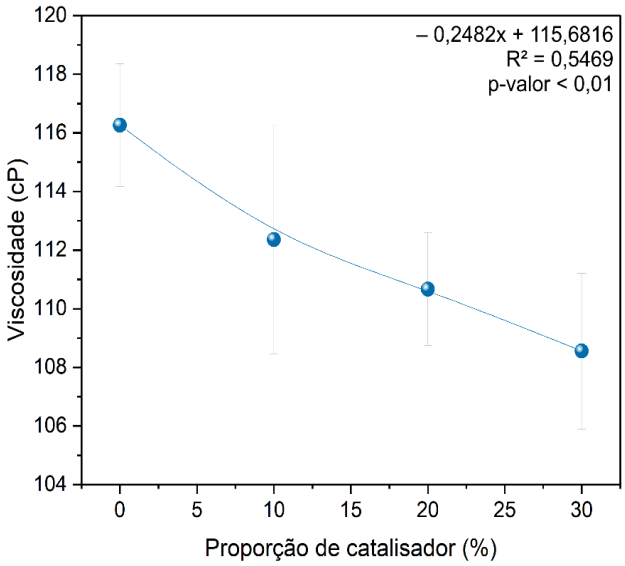


Figura 5: pH do char advindo da pirólise catalítica com ZnO. Equação: pH = 9,006 – 0,6333 + 0,055910 CAT^2 - 0,001236 CAT^3; R^2 = 0,9959; p-valor < 0,01. Fonte: Fonte: A Autora (2024).

Utilizando 10% de catalisador, observou-se uma diminuição no pH, enquanto no T20 houve um aumento, seguido por uma nova queda. Esses resultados indicam que, na ausência de catalisador, o pH do biochar é ideal para aplicações agrícolas. No entanto, a adição de ZnO como catalisador provoca inicialmente uma redução do pH, possivelmente devido à formação de ácidos durante a pirólise. Em concentrações intermediárias de catalisador, o pH aumenta novamente, sugerindo que o catalisador, em determinadas proporções, pode neutralizar ácidos voláteis. Contudo, ao atingir concentrações mais elevadas de ZnO, o pH volta a cair, indicando que a interação entre os produtos voláteis da pirólise e o catalisador afeta o pH de maneira não linear e oscilante (Tomczyk e Boguta, 2020). Essas variações de pH são importantes no contexto do uso do biochar como condicionador de solo. A estabilidade do pH é crucial para promover um ambiente ideal para o crescimento das plantas, influenciando a disponibilidade de nutrientes e a atividade microbiana. O biochar com pH mais alcalino pode ser benéfico para solos ácidos, melhorando suas propriedades químicas e a capacidade de retenção de nutrientes. Entretanto, a queda do pH em concentrações mais altas de ZnO sugere que é necessário cuidado ao definir a proporção ideal de catalisador para evitar uma acidificação indesejada do solo, que poderia prejudicar seu uso agrícola.

5.4. Caracterização do bio-óleo

A viscosidade do bio-óleo diminui à medida que a quantidade de catalisador ZnO aumenta. Este comportamento pode ser atribuído à capacidade do catalisador de quebrar moléculas maiores em compostos menores e menos viscosos (Akubo; Nahil; Williams, 2019). Ademais, a viscosidade variou de 109,0 a 116,5 cP, para as proporções de catalisador de 30 e 0%, respectivamente (Figura 6).



.

Figura 6: Viscosidade do líquido pirolenhoso advindo da pirólise catalítica com ZnO. Equação: VL (cP) = 115,6816 – 0,2482 CAT; R^2 = 0,5469; p-valor < 0,01. Fonte: A Autora (2024).

A equação estimada revelou que cerca de 55% das variações na viscosidade podem ser explicadas pelas variações na proporção de catalisador ZnO. Embora esse ajuste não seja perfeito, indica uma relação moderada entre as variáveis. Cada incremento na porcentagem de catalisador resulta em uma redução de aproximadamente 0,2482 cP na viscosidade do bio-óleo. O p-valor obtido sugere que essa relação é estatisticamente significativa, confirmando a influência do ZnO sobre as propriedades reológicas do bio-óleo (Figura 6). Estudos anteriores corroboram essa tendência, indicando que a adição de catalisadores metálicos, como o ZnO, pode reduzir significativamente a viscosidade do bio-óleo, o que melhora sua fluidez e viabilidade como combustível (Wang et al., 2022). A viscosidade é um fator crítico para o uso do bio-óleo em motores de combustão interna, uma vez que fluidos de menor viscosidade facilitam a atomização e promovem uma combustão mais eficiente. Assim, a redução

observada na viscosidade, especialmente no tratamento com 30% de ZnO, sugere que esse nível de catalisador é eficaz para melhorar as propriedades do bio-óleo, tornando-o mais adequado para aplicações energéticas.

Além disso, a redução da viscosidade também pode estar associada à diminuição do teor de oxigênio no bio-óleo, uma vez que catalisadores metálicos promovem a desoxigenação durante a pirólise (Liang; Shan; Sun, 2021). A desoxigenação é um processo desejável, pois melhora a estabilidade térmica e a qualidade do bio-óleo, aproximando suas características dos combustíveis fósseis convencionais. Outro aspecto importante é a influência da temperatura de reação sobre a viscosidade do bio-óleo. Estudos indicam que temperaturas mais elevadas favorecem a quebra de macromoléculas, promovendo a formação de compostos de menor peso molecular, o que também contribui para a redução da viscosidade (Maulinda et al., 2023). Assim, o controle da temperatura e da concentração do catalisador ZnO são fatores essenciais para otimizar as propriedades finais do bio-óleo, ampliando suas possibilidades de uso como combustível alternativo.

A análise dos dados revelou uma relação complexa entre a quantidade de catalisador e o pH do bio-óleo. O pH variou de 2,41 a 2,51, para as proporções de catalisador de 0 e 20%, respectivamente (Figura 7). Observa-se que o pH inicialmente aumenta com a adição de catalisador, mas depois diminui à medida que a quantidade de catalisador continua a aumentar. O p-valor encontrado indica que, a relação entre a quantidade de catalisador e o pH é estatisticamente significativa. Isso sugere que as mudanças no pH não são devidas ao acaso, mas sim influenciadas pela quantidade de catalisador (Figura 7).

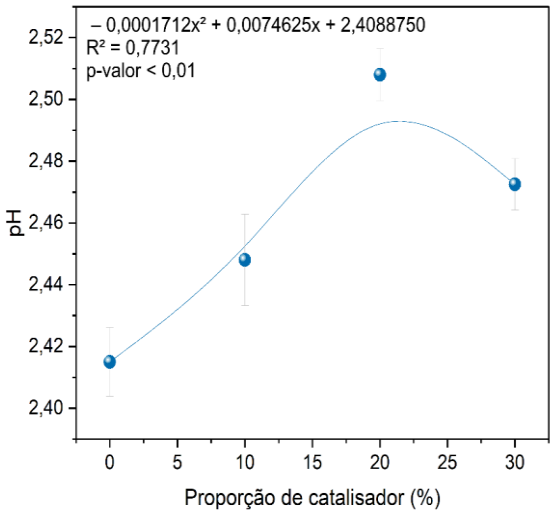


Figura 7: pH do bio-óleo advindo da pirólise catalítica com ZnO. Equação: pH = 2,4088750 + 0,0074625 CAT – 0,0001712 CAT²; R^2 = 0,7731; p-valor < 0,01. Fonte: A Autora (2024).

O aumento inicial no pH com a adição de pequenas quantidades de ZnO pode ser atribuído à neutralização parcial dos ácidos presentes no bio-óleo, já que o ZnO possui propriedades básicas (Akubo, Nahil e Williams, 2019). A neutralização de ácidos carboxílicos e fenólicos no bio-óleo resulta em um aumento do pH, tornando-o menos ácido. Essa elevação inicial é benéfica, pois melhora a estabilidade do bio-óleo e reduz sua corrosividade. No entanto, à medida que a concentração de ZnO ultrapassa 20%, ocorre uma queda significativa no pH. Esse comportamento pode ser explicado pela formação de novos compostos ácidos durante a pirólise catalítica. O ZnO, em concentrações mais elevadas, pode promover reações secundárias que geram ácidos orgânicos, como ácido acético e ácido fórmico, contribuindo para a maior acidez do bio-óleo (Moura et al., 2019).

A formação de compostos ácidos durante a produção do bio-óleo é indesejável, pois pode acelerar seu envelhecimento e comprometer sua qualidade para diferentes usos, tais como combustível. Dessa forma, a gestão adequada dos produtos de decomposição e a escolha otimizada da quantidade de catalisador são fundamentais para melhorar tanto a produção quanto a qualidade final do bio-óleo (Wang et al., 2022). Além disso, as variações de pH impactam diretamente a estabilidade e a corrosividade do bio-óleo. Bio-óleos com pH mais baixo tendem a ser mais corrosivos, o que pode gerar desafios no armazenamento e no uso em sistemas de combustão (Liang, Shan e Sun, 2021). Portanto, o equilíbrio na quantidade de catalisador é crucial para minimizar

a formação de ácidos e, assim, aprimorar a qualidade do bio-óleo, tornando-o mais adequado para aplicações energéticas e industriais.

O teor de sólidos no líquido pirolenhoso não apresentou variações significativas entre as diferentes concentrações de catalisador avaliadas, com uma média de 16%. Esse resultado sugere que a presença do catalisador (ZnO) não exerce um impacto relevante na quantidade de sólidos presentes no bio-óleo. A ausência de variação pode estar relacionada à natureza dos sólidos, que são compostos principalmente por partículas finas, resíduos minerais e carbonáceos, os quais não são significativamente afetados pelas condições de reação ou pela adição de catalisadores.

6. CONCLUSÃO

A pirólise catalítica com ZnO revelou que o aumento na concentração do óxido de zinco reduz o rendimento de bio-óleo e favorece a produção de carvão vegetal, indicando que o ZnO estimula reações secundárias que ampliam a fração sólida em detrimento da líquida. No entanto, o incremento no teor de cinzas e a diminuição do carbono fixo afetam negativamente a qualidade do char produzido. Além disso, o ZnO melhora as propriedades do bio-óleo ao reduzir suas particularidades, tornando-o mais adequado como combustível. Contudo, concentrações excessivas resultam na formação de compostos ácidos, prejudicando a qualidade do bio-óleo. O uso de catalisadores metálicos, como o ZnO, mostrou-se eficiente na modificação dos produtos da pirólise, mas é crucial ajustar sua concentração para otimizar tanto o rendimento quanto a qualidade dos produtos, principalmente em aplicações energéticas e ambientais. Estudos futuros devem explorar essa otimização e investigar alternativas para mitigar os efeitos negativos da acidez excessiva no bio-óleo.

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. 2021.

AKUBO, K.; NAHIL, M. A.; WILLIAMS, P. T. *Pyrolysis-catalytic steam reforming of agricultural biomass wastes and biomass components for production of hydrogen/syngas*. **Journal of Energy Institute**, v. 92, p. 1987-1996, 2019.

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.

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. 2016.

ANDRADE, C. R., BRITO, J. O., DIAS JUNIOR, A. F., LANA, A., Q. 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. Characterization and combustion behavior of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. Fuel, v. 142, p. 199-207. 2015.

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

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

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

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.

BENELLI, P. **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. 2012.

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

BRIDGWATER, A. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012. http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

BRIDGWATER, A. V. *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*. **Biomass and Bioenergy**, 38, 68-94. 2012.

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.

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>.

DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.:10.1016/j.pecs.2003.10.004

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 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 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. Requirementsand 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.**

DURIGON, G.; SILVA, M. B. Catálise heterogênea: aplicações e desafios. **Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira**, v. 3, 2018. e16964. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/apeuv/article/view/16964>. Acesso em: 18 set. 2024.

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 Européia 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.

EVERITT, B.S., LANDAU, S., LEESE, M., STAHL, D., 2011. **Cluster Analysis**, 5th ed. Chichester.

FERMOSO, J., et al.. Lamellar and pillared ZSM-5 zeolites modified with MgO and ZnO for catalytic fast-pyrolysis of eucalyptus woodchips. **Catal.** p. 277, 171–181. Nov. 2016.

FERMOSO, J.; HERNANDO, H.; JANA, P.; MORENO, I.; PˇRECH, J.; OCHOA-HERNÁNDEZ, C.; PIZARRO, P.; CORONADO, J. M.; CEJKA, J.; SERRANO, D. P. Lamellar and pillared ZSM-5 zeolites modified with MgO and ZnO for catalytic fast-pyrolysis of eucalyptus woodchips. **Catal. Today**, v. 277, p. 171–181, 2016. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.12.009

Ferreira, A. S. F. **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, 2018.

Ferreira, N., L. ***Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo*.** 2014.Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2014.

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

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. 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.

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

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.

GOMIDE, J. L.; DEMUNER, B. J. Determinação do teor de lignina em material lenhoso: método Klason modificado. **O Papel**, v. 47, p. 36-38, 1986.

Gonçalves, F.G., Lelis, R.C.C., Carvalho, A.M. de, 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. Effect of natural ageing on volume stability of MSW and wood waste incineration residues. **Waste Manage**, v. 33, n. 4, p. 850-857, 2013.

HERNANDO, H.; MORENO, I.; FERMOSO, J.; HERNÁNDEZ, C. O.; PIZARRO, P.; CORONADO, J. M.; CEJKA, J.; SERRANO, D. P. Biomass catalytic fast pyrolysis over hierarchical ZSM-5 and Beta zeolites modified with Mg and Zn oxides. **Biomass Conv. Bioref.**, v. 7, p. 289–304, 2017. DOI 10.1007/s13399-017-0266-6

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

IISA, K., STANTON, A.R., CZERNIK, S., Production of hydrocarbon fuels from biomass by catalytic fast pyrolysis. In World Renewable Energy Forum, WREF 2012, Including World Renewable Energy Congress XII and Colorado. **Renewable Energy Society (CRES) Annual Conferen,** pp. 886–891. 2012.

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

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation**. 2. ed. London: Routledge, 2015.

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

LIANG, J.; SHAN, G.; SUN, Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass: Critical role of zeolite catalysts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 139, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110707

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, D. S.; PEREZ-LOPEZ, O. W. Conversão catalítica do etanol sobre catalisadores suportados em ZSM-5. **Cerâmica**, v. 64, p. 1-9, 2018.

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

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

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.

MAULINDA, L.; HUSIN, H.; ARAHMAN, N.; ROSNELLY, C. M.; SYUKRI, M.; NURHAZANAH; NASUTION, F.; AHMADI. The Influence of pyrolysis time and temperature on the composition and properties of bio-oil prepared from tanjong leaves (*Mimusops elengi*). **Sustainability**, v. 15, 2023. https://doi.org/10.3390/su151813851

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, C. V. R.; SILVA, B. C.; CASTRO, A. G.; MOURA, E. M.; VELOSO, M. E. C.; SITTOLIN, I. M.; ARAUJO, E. C. E. Caracterização físico-química de óleos vegetais de oleaginosas adaptáveis ao nordeste brasileiro com potenciais para produção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 3, p. 573-595, 2019.http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20190044

NAQVI, S. R., UEMURA, Y., YUSUP, S. B. "Catalytic pyrolysis of paddy husk in a drop type pyrolyzer for bio-oil production: The role of temperature and catalyst", **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 106, pp. 57-62, 2014.

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

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus pellita f. Muell. Scientia Forestalis, Piracicaba, v. 38, n. 37, p. 431-439, 2010.

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 Congress 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

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.

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, F. T. M. Valorização da madeira Eucalyptus sp. via pirólise: caracterização e rendimentos dos produtos. 2019. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

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., Mbougueng, 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, 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.; Dudziec, P., 2022. Wood pellet quality depending on dendromass species. **Renewable Energy**, v. 199, pág. 498-508.

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.

TAN, X.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HU, X.; GU, Y.; YANG, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, v. 125, p. 70-85, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.12.058

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 204 cm-07: Solvent extractives of wood and pulp**. Atlanta, GA, USA, 2007.

TOMCZYK, A., SOKOŁOWSKA, Z. & BOGUTA, P. Propriedades físico-químicas do biochar: efeitos da temperatura de pirólise e do tipo de matéria-prima. ***Rev Environ Sci Biotechnol*** *p.* 19, 191–215. 2020.

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.

UZUN, B. B.; VAROL, E. A.; PÜTÜN, E. **Pirólise: um caminho sustentável da biomassa para biocombustíveis e biochar**. *In*: BRUCKMAN, V. J.; VAROL, E. A.; UZUN, B. B.; LIU, J. eds. Biochar*: uma abordagem regional da cadeia de suprimentos em vista da mitigação das mudanças climáticas*. **Cambridge University Press**, p. 239-265, 2016.

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.

WANG, Y.; AKBARZADEH, A.; CHONG, L.; DU, J.; TAHIR, N.; AWASTHI, M. K. Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review. **Chemosphere**, v. 297, 2022. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134181

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, H., XIAO, R., WANG, D., ZHONG, Z., & ZHANG, M. *Catalytic effects of metal oxides on the pyrolysis of lignocellulosic biomass*. **Bioresource Technology**, 136, 297-303. 2013.

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, C., JIANG, E., CHEN, A. Volatile production from pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. Journal of the Energy Institute, v. 90, n. 6, p. 902-913, 2017.

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