

SÍNTESE DE BIOCHAR DA CASCA DO MARACUJÁ AMARELO (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) E ESTUDO DE SUA APLICAÇÃO COMO CATALISADOR HETEROGÊNEO

Bruna Raquel Gomes da Silva¹, Izabelly Larissa Lucena², Zilvam Melo dos Santos³

Resumo: O Brasil possui um potencial energético diversificado e já produz 85 % de sua energia a partir de recursos renováveis. Nesse contexto, surge o biodiesel, como fonte sustentável e pode ser obtido por meio do processo de esterificação, reação reversível entre ácidos graxos e álcoois, podendo ser catalisada por agentes heterogêneos, com destaque para os derivados de biomassa. Esses catalisadores oferecem vantagens significativas, incluindo biodegradabilidade, baixo custo e ampla disponibilidade. No Brasil, um dos maiores produtores de maracujá do mundo, a produção de suco concentrado e polpas desse fruto resulta em um rejeito agroindustrial considerável, com cerca de 70 % do maracujá composto por cascas e sementes. Diante desse cenário, as cascas de maracujá surgem como uma fonte de insumo para a produção de biochar, um material carbonizado que pode ser utilizado como catalisador na esterificação de ácidos graxos. O estudo avaliou a eficácia do catalisador ácido heterogêneo, feito a partir das cascas de maracujá, no qual realizou-se a carbonização entre 100 °C e 400 °C, seguida por impregnação com ácido sulfúrico. Conversões de 60 % a 70 % foram obtidas para temperaturas de carbonização nas faixas de 200 °C, 250 °C e 300 °C. A sensibilidade do material a diferentes temperaturas destaca a importância do controle desse parâmetro. Essas descobertas evidenciam o potencial dos resíduos agrícolas como fonte de soluções sustentáveis para desafios energéticos e ambientais.

Palavras-chave: biodiesel; esterificação; maracujá; heterogêneo; catalisador.

1. INTRODUÇÃO

Segundo a associação Brasileira de Recursos Hídricos, o país possui um potencial energético diversificado e já produz 85 % de sua energia baseada em recursos renováveis, tendo sua principal fonte primária os recursos hídricos, correspondendo a 51,3 % da produção nacional [1].

A construção de hidrelétricas pode ter impactos significativos no meio ambiente e nas comunidades locais. Os alagamentos de grandes áreas para a formação de reservatórios podem resultar na perda de habitat de espécies endêmicas, alterações nos ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como na necessidade de realocação de comunidades humanas. Diante desses desafios, há uma crescente necessidade de diversificar a matriz energética e buscar fontes de energia alternativas que minimizem os impactos ambientais e sociais. Os biocombustíveis, derivados de biomassa renovável, representam uma alternativa promissora nesse sentido [2].

Segundo a resolução Agência Nacional de Petróleo – ANP nº 920/2023, o biodiesel pode ser caracterizado pela sua composição de grupos de ésteres alquílicos de ácidos carboxílicos de cadeia extensa, produzido pelas reações de esterificação ou transesterificação [3]. Em uma análise paralela o biocombustível em relação aos demais combustíveis convencionais, é uma escolha sustentável, visto que, minimiza emissões de gases poluentes. Destaca-se também como vantagem do biodiesel em comparação aos combustíveis convencionais no que diz respeito ao ponto de fulgor, seu ponto de fulgor é mais alto. Isso significa que o biodiesel é menos inflamável do que o diesel convencional, o que é uma vantagem em termos de segurança, reduzindo o risco de incêndios e explosões. [4].

O processo de esterificação, consiste em uma reação na qual um ácido carboxílico reage com um álcool para formar um éster e água como subproduto. Nessa reação ocorre a substituição do radical (-OH) de um ácido carboxílico por um grupo de alcóxila (-OR), resultando na formação do éster (biodiesel). A qualidade e as propriedades do biodiesel produzido por esterificação são influenciadas por uma variedade de fatores, os principais incluem o tipo de álcool utilizado, o tipo de ácido graxo e o tipo de catalisador empregado no processo [5,6]. Na figura 1, é apresentada a reação de esterificação.

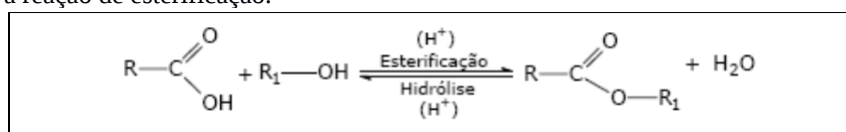


Figura 1. Reação de esterificação (Solomons & Fryhle, 2002).

A escolha do catalisador é fundamental para o sucesso de uma reação química, pois ele pode influenciar significativamente na velocidade e seletividade da reação, além de poder afetar o rendimento e a formação de subprodutos indesejados. [5]. O uso de catalisadores heterogêneos oferece várias vantagens significativas,

especialmente em termos de sustentabilidade e redução de resíduos, uma vez que podem ser facilmente separados dos produtos da reação após sua conclusão. Isso permite que sejam recuperados e reutilizados em ciclos subsequentes de reações, o que reduz custos e minimiza o desperdício de recursos. Utilizar catalisadores derivados de fontes de biomassa, como resíduos agrícolas ou subprodutos industriais, é uma estratégia ainda mais sustentável. Isso porque parte do princípio de aproveitar materiais que de outra forma poderiam ser considerados como de baixo valor agregado ou simplesmente descartados. [7].

O biochar é um coproduto sólido obtido a partir da pirólise lenta de biomassa, um processo de decomposição térmica. Esse material é altamente poroso devido à sua estrutura reticulada, o que lhe confere uma grande área superficial e uma alta capacidade de adsorção. Essa porosidade torna o biochar um suporte ideal para a impregnação de compostos catalíticos ou outros aditivos. [8,9]. O processo de pirólise é uma etapa crucial na produção de biochar e suas características finais estão diretamente relacionadas às condições em que ocorre, dependendo de vários fatores, como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e pressão [9].

A sulfonação é um dos métodos mais comuns para funcionalizar o carbono com grupos ácidos sulfônicos ativos ($-\text{SO}_3\text{H}$), que são frequentemente usados como catalisadores ácidos em reações de transesterificação e esterificação, como na produção de biodiesel. O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é uma escolha popular como agente sulfonante nesses processos de funcionalização de carbono devido à sua eficácia e disponibilidade. O mesmo é capaz de reagir com o material carbonáceo, introduzindo grupos sulfônicos na estrutura, o que confere propriedades ácidas à superfície do material. Esses grupos ácidos sulfônicos são então responsáveis por catalisar a reação de esterificação [10].

Em Behera et al (2020) [11], utiliza várias fontes de insumos como catalisador heterogêneo ácido e ainda observa a eficiência em sua aplicabilidade para biodiesel, como o principal resultado um rendimento de 94,91 %, o que demonstra alta conversão. Em Corrêa (2018) [12], foi feito o estudo para verificação do efeito do tempo de sulfonação e faixas de temperaturas diferentes quando utilizado o biocarvão originado da casca de Murumuru para produção de biodiesel por esterificação metílica do ácido oleico.

Silva (2023) [13], trabalhou com sementes de melão como matéria prima e obteve resultados significativos em diferentes faixas de temperatura o que destaca a influência da temperatura de carbonização no processo. Obtendo dados significativos de conversão principalmente na faixa de temperatura de 300 °C, no qual obteve 92,92 % de conversão, evidenciando a viabilidade do uso dos catalisadores como alternativa sustentável.

A utilização de resíduos orgânicos, como as cascas do maracujá, para a produção de catalisadores ácidos sulfonados é uma excelente estratégia para agregar valor a esses subprodutos e reduzir o desperdício. Considerando que o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de maracujá-amarelo e que uma parte significativa desse cultivo é destinada à produção de suco concentrado e polpas, as cascas do fruto representam uma fonte abundante de material orgânico que pode ser aproveitada de forma mais eficiente [14].

Segundo Zheng et al., 2021 [15], a casca do maracujá amarelo, possui estrutura composta por celulose, hemicelulose, lignina e pectina, que se ligam por meio de pontes de cálcio intermoleculares. Esses compostos têm a capacidade de interagir com outras espécies externas à sua estrutura, o que a torna uma alternativa viável para reutilização. A funcionalização das cascas do maracujá com grupos ácidos sulfônicos ativos pode ser realizada por meio de processos de sulfonação, como mencionado anteriormente. Esse procedimento permite transformar as cascas do maracujá em um catalisador ácido sulfonado que pode ser usado em diversas aplicações, incluindo reações de esterificação para a produção de biodiesel [16, 17].

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo a obtenção de um catalisador ácido heterogêneo obtido através da pirólise da casca do maracujá-amarelo. As cascas do maracujá-amarelo foram submetidas à pirólise em diferentes faixas de temperatura para produzir biochar. Em seguida, as amostras de biochar foram sulfonadas por meio do processo de impregnação com ácido sulfúrico. A eficácia do catalisador obtido foi avaliada por meio da conversão da reação de esterificação do ácido oleico.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Materiais Utilizados

O insumo utilizado nessa pesquisa foi adquirido em feira local no município de Jaguaruana-CE, onde os comerciantes faziam o descarte das cascas para proveito apenas da polpa. O processo de impregnação do biocarvão deu-se através da utilização do ácido sulfúrico P.A. ACS (LS Chemicals). Para verificar a ausência de íons sulfato no biocarvão, utilizou-se o cloreto de bário P.A. - ACS (Perfyl Tech, Reagentes & Soluções).

O processo da reação de esterificação foi empregado ácido oleico U.S.P/N.F (Synth) e álcool metílico P.A. ACS (Êxodo Científica). Para determinar o índice de acidez e quantificar o éster obtido, utilizou-se álcool etílico 92,8° INPM (96 °GL) (Itajá) como solvente na titulação da amostra, e hidróxido de sódio P.A - ACS (Sciavico) como titulante. Para o processo de padronização do hidróxido de sódio, utilizou-se o biftalato de potássio P.A - ACS (Alphatec). Todas as análises e procedimentos foram realizados em laboratório no âmbito da Universidade Federal Rural do Semi-árido - UFERSA.

2.2 Fluxograma

A metodologia empregada neste estudo foi sintetizada em um fluxograma apresentado na Figura 2, os quais serão detalhados nos próximos tópicos.

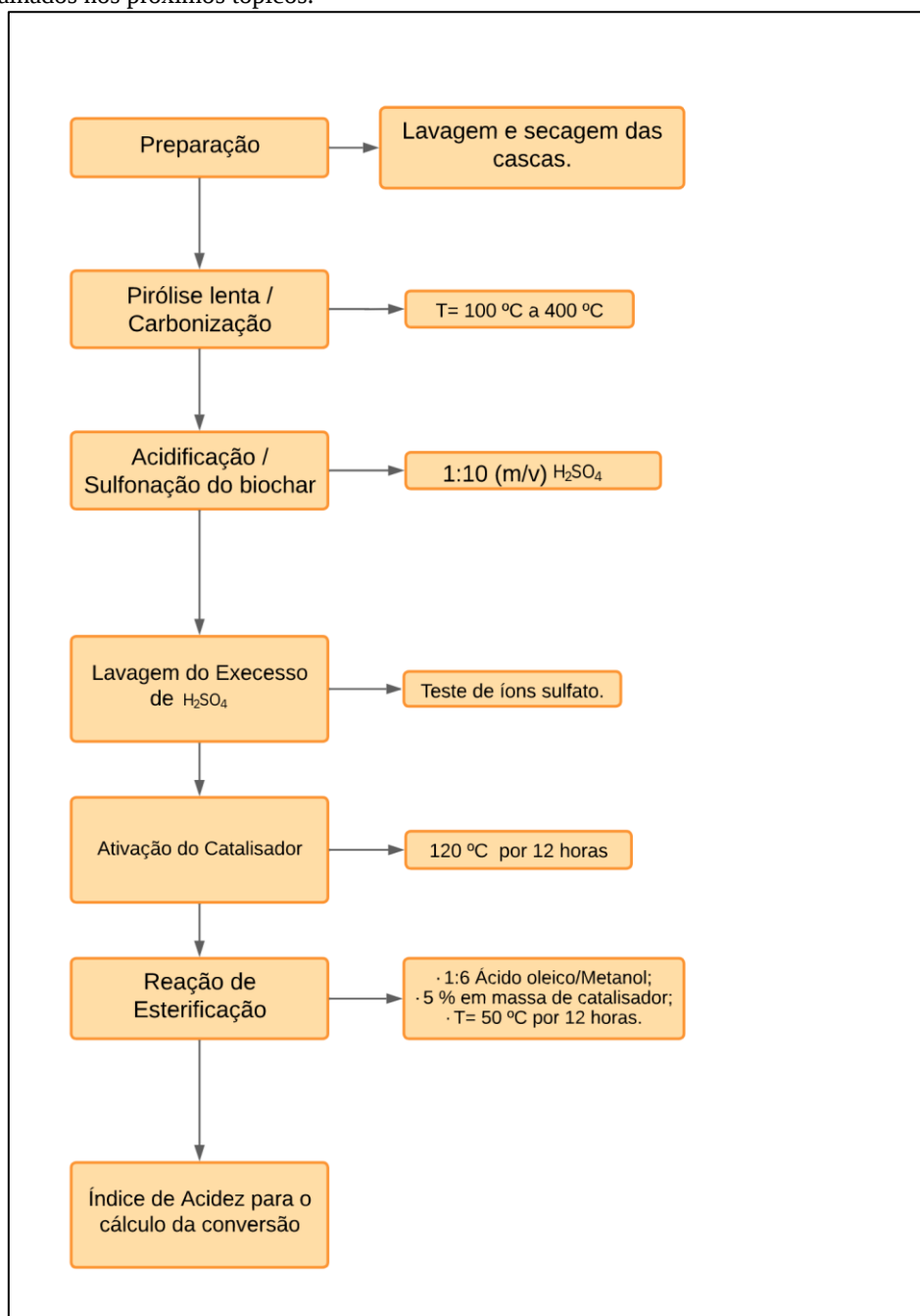


Figura 2. Fluxograma da metodologia utilizada para a obtenção do catalisador ácido heterogêneo, empregado na avaliação da síntese na reação de esterificação (autoria própria).

2.2. Preparação da matéria-prima

Depois de coletadas no município do Ceará, as cascas de maracujá foram primeiramente lavadas com água corrente para remover as impurezas e outros compostos do fruto. Em seguida, as cascas foram lavadas com água destilada. Logo após, a matéria-prima foi levada para estufa (modelo SL – 100) a 50 °C por um período de 8 horas, para remover toda a umidade presente na amostra, como mostra na Figura 3. Após a secagem da matéria-prima, as cascas foram fragmentadas em pedaços menores, conforme na figura 4, para facilitar o manuseio durante os procedimentos subsequentes.



Figura 3. Casca do maracujá após a higienização e secagem (Autoria própria).



Figura 4. Casca do maracujá fragmentadas (Autoria própria).

2.3. Carbonização

Em forno mufla ocorreu o processo de carbonização em sete faixas de temperaturas 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C e 400 °C. O material foi aquecido a uma taxa de 1 °C/min até alcançar a temperatura de cada faixa desejada, logo após a estabilização da temperatura permaneceu por 2 horas. As taxas de aquecimento e as temperaturas foram selecionadas com base em estudos anteriores [11, 13, 18]. Após a calcinação, o material carbonizado foi transferido para um dessecador a vácuo para armazenamento e posterior sulfonação quando possível.

2.4. Acidificação do biocarvão e ativação.

Tomando como referencial, utilizou-se as metodologias [11,12] para o processo de acidificação. Todas as amostras de biocarvão passaram por tratamento com ácido sulfúrico P.A. sob condições de sulfonação idênticas. O processo de sulfonação seguiu a proporção de 1:10 (m/v), desta forma, foram utilizados 5 g de biocarvão em contato com 50 mL de ácido sulfúrico com pureza de 98 %. Inicialmente, as amostras sulfonadas foram submetidas a aquecimento a 100 °C por uma hora em um banho-maria (Figura 5). Após, o banho-maria, as amostras foram mantidas sob agitação a 120 rpm em uma mesa agitadora de movimento orbital (incubadora Shaker SL 222) a uma temperatura de 45 °C por 24 horas. Logo após esse tempo de impregnação do ácido sulfúrico, iniciou-se a etapa de lavagens das amostras de biochar com água deionizada. Com o objetivo de remover do excesso de acidez livre presente no biochar. Para verificar a ausência de íons sulfatos livres na água de lavagem do catalisador foi realizado o teste com cloreto de bário¹. Em seguida, as amostras foram levadas a estufa a 100 °C para a retirada do excesso de água, e posteriormente foram levadas ao forno mufla para sua ativação, pelo intervalo de 12 horas com a programação a 120 °C. Portanto, ao fim da programação, as amostras foram removidas e armazenadas em um dessecador a vácuo para serem posteriormente aplicadas nas reações de esterificação.

¹ Para realizar o teste de precipitação, uma alíquota de água de lavagem foi adicionada em um tubo de ensaio, seguida pela adição de gotas de BaCl₂ 0,1M. Não ocorrendo precipitação indica a ausência de íons sulfatos na água de lavagem do biochar.



Figura 5. Aparato experimental. (SILVA,2023).

2.5. Reação de esterificação

As reações de esterificação foram realizadas nas seguintes condições: Utilizou-se uma razão molar de 1:6 entre o ácido oleico e o metanol, respectivamente. Aplicou-se uma proporção de 5 % (m/m) de catalisador (biochar acidificado), em relação à massa do ácido oleico. As reações foram conduzidas em duplicata a uma temperatura de 50 °C, com agitação a 120 rpm em uma incubadora Shaker (SL 222), por um período contínuo de 12 horas. Uma amostra sem catalisador foi incluída sob as mesmas condições experimentais para fins comparativos da eficiência do catalisador (amostra branco). Após a reação, as amostras foram centrifugadas a 2500 rpm por 15 minutos em uma centrífuga (Excelsa 4) com intuito de separar o catalisador heterogêneo. Para verificar a conversão da reação de esterificação aplicando os catalisadores obtidos foram realizados a análise de índice de acidez da fase éster, como também da amostra branco.

2.6. Índice de Acidez (IA)

A obtenção da taxa de conversão da reação de esterificação, é determinada através do índice de acidez da fase éster obtida após o processo. O resultado do IA nos permite entender a quantidade de hidróxido de sódio necessária para neutralizar os ácidos graxos livres presentes em uma grama da amostra. A porcentagem de ácidos graxos livres é um método empregado para quantificar a presença de ácidos graxos em uma amostra. Os procedimentos para essa análise seguiram os métodos descritos em trabalhos anteriores [12,20]. A equação utilizada para determinar o índice de acidez é descrita por [21] e é representada pela equação 1. A equação 2 representa os cálculos para conversão da reação.

$$IA = \frac{V \times F \times N \times 56,11}{M} \quad (1)$$

IA = É o índice de acidez (mgKOH/g);

V = Volume de NaOH 0,25M utilizado para atingir o ponto final da titulação da amostra (mL);

F = Fator de correção da solução NaOH;

M = Massa de amostra utilizada para análise (g);

N = é a normalidade da solução de NaOH (mol/L).

$$Conversão (\%) = \frac{IA_i - IA_f}{IA_i} \times 100 \quad (2)$$

IA_i = Índice de acidez inicial – acidez do branco (mg KOH/g);

IA_f = Índice de acidez final – acidez do produto obtido (mg KOH/g).

2.7 Influência da temperatura de carbonização do biocarvão na conversão da reação de esterificação

Na Figura 6, é representada os biocarvões após a pirólise para cada faixa de temperatura seguindo as condições descritas no tópico 2.3.

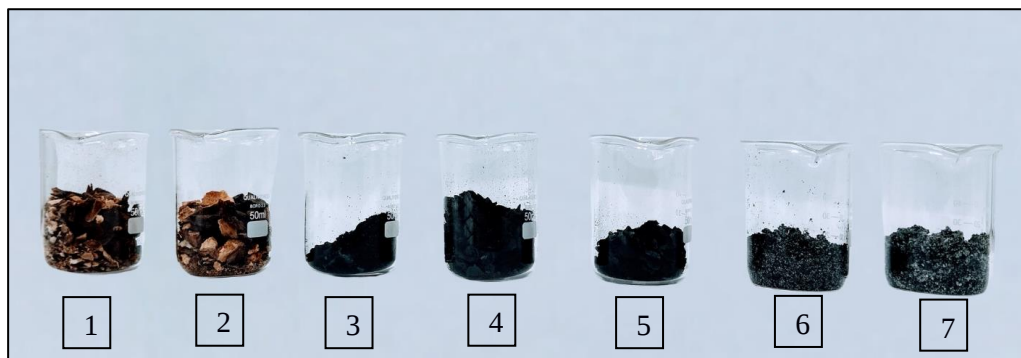


Figura 6. Amostras de biochar da casca de maracujá calcinadas a temperaturas de 100 °C (1), 150 °C (2), 200 °C (3), 250 °C (4), 300 °C (5), 350 °C (6) e 400 °C (7). (Autoria própria).

Conforme a Figura 6, é possível observar a sensibilidade do material quando exposto a diversas temperaturas de calcinação. Verifica-se que nas temperaturas de 100 °C e 150 °C a matéria-prima após o processo de pirólise não sofre mudanças significativas em seu aspecto. Essa característica deve-se provavelmente a baixa temperatura de calcinação. A temperatura de pirólise ou calcinação é um fator importante que influencia as transformações físicas e químicas da matéria-prima durante o processo de pirólise. Temperaturas mais baixas podem resultar em taxas de decomposição mais lentas e, portanto, menos mudanças visíveis na aparência da matéria-prima. No entanto, para a faixa de temperatura de 200 °C até 300 °C é observado a formação do biochar. Isso acontece provavelmente, porque para essa faixa de temperaturas ocorre reação de pirólise, ou seja, ocorre a degradação térmica dos componentes orgânicos da matéria-prima, como os ácidos graxos, proteínas, carboidratos e lignina, resultando na formação de biochar. Porém, em temperaturas de 350 °C e 400 °C observa-se a presença de cinzas. Dessa forma, a temperatura é suficientemente alta para promover a decomposição desses compostos orgânicos em gases, o que resultaria na perda parcial e/ou total da matéria-prima [22].

Sendo assim, verifica-se que para a formação de biochar na faixa de temperaturas estudadas, as temperaturas intermediárias (200 °C até 300 °C) leva à produção de um material carbonizado com possíveis propriedades físicas e químicas específicas, como porosidade, área superficial e composição química, que podem ser adequadas para aplicação como catalisador na produção de biodiesel por esterificação, conforme apresentado na Tabela 1.

A Tabela 1, apresenta os valores das conversões das reações de esterificação do ácido oleico obtidas através da catálise do biochar da casca de maracujá quando possível, seguindo as condições descritas no tópico 2.5.

Tabela 1. Resultado das conversões para reação de esterificação do ácido oleico com metanol em diferentes temperaturas de carbonização. (Autoria própria).

Temperatura de Carbonização (°C)	Conversão da reação 1 (%)	Conversão da reação 2 (%)	Média (%)	Desvio padrão (%)
100	-	-	-	-
150	-	-	-	-
200	70,451	68,787	69,619	0,832
250	62,286	61,303	61,795	0,491
300	70,234	63,441	66,837	3,396
350	-	-	-	-
400	-	-	-	-
Conversão média geral (%)		66,084		
Desvio padrão médio (%)		1,573		

Verifica-se também na Tabela 1 que para as temperaturas de calcinação de 100 °C, 150 °C, 350 °C e 400 °C, o material não apresentou as características desejadas de biochar ou biocarvão após o processo de pirólise. Isso

pode indicar como discutido anteriormente, que para temperaturas baixas ou elevadas demais não ocorre adequadamente a transformação da matéria-prima estudada em biochar. Como resultado, não foi possível realizar a sulfonação do material carbonizado para uso como catalisador ácido na reação de esterificação. No entanto, para a faixa de temperatura de 200 °C a 300 °C, o biochar obtido foi adequado para a sulfonação e aplicação como catalisador ácido na reação de esterificação. Observa-se na Tabela 1 que para essa faixa de temperatura estudada de 200 °C a 300 °C foi obtido uma conversão média de 66 %, o que indica que o catalisador ácido heterogêneo pode ser aplicado para produção de biodiesel por esterificação do ácido oleico. Sugerindo que a temperatura de pirólise nessa faixa é adequada para promover a formação de biochar com as propriedades desejadas para a aplicação como catalisador.

3. CONCLUSÕES

Após os procedimentos para a obtenção dos ésteres resultantes da reação de esterificação do ácido oleico, utilizando a casca de maracujá carbonizada e acidificada como catalisador ácido heterogêneo, alcançou-se conversões na faixa de 60 % a 70 % para amostras carbonizadas nas temperaturas de 200 °C, 250 °C e 300 °C. Esses resultados evidenciam uma faixa de temperatura adequada para trabalhar com essa matéria-prima, com um rendimento médio aproximado de 66 % e um desvio padrão médio aproximado de 1,5 %.

Além disso, este estudo não se limitou à análise das conversões da reação de esterificação, mas também explorou a influência da temperatura nos resultados, identificando faixas específicas. Temperaturas abaixo de 200 °C não produziram biochar, enquanto acima de 300 °C resultaram na formação de cinzas, inviabilizando o uso do material. Isso destaca a importância do controle da temperatura de pirólise.

Tais resultados ressaltam a importância da temperatura de carbonização ao utilizar a casca de maracujá como catalisador na reação de esterificação. Além disso, fornecem uma alternativa sustentável para dar destino a um resíduo produzido em grande escala na indústria alimentícia, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Macrocaracterização dos Recursos Naturais do Brasil;. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2101648>>. Acesso em: 27 fev. 2024.
- [2] Principal fonte de energia de cada estado do Brasil. Disponível em: <<https://www.site.abrhidro.org.br/post/principal-fonte-de-energia-de-cada-estado-do-brasil>>. Acesso em: 27 fev. 2024.
- [3] RESOLUÇÃO ANP Nº 920, DE 4 DE ABRIL DE 2023. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023>>. Acesso em: 3 mar. 2024.
- [4] Biocombustíveis. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/apresentacao>>. Acesso em: 3 mar.2024.
- [5] DAIMARY, N. et al. Potato peels as a sustainable source for biochar, bio-oil and a green heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, n. 1, 1 fev. 2022.
- [6] SOLOMONS, G. T. W.; FRYHLE, C. B. Química orgânica. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Vol 2, p. 85 -100, 2002.
- [7] TANG, Z. E. et al. Synthesis of biomass as heterogeneous catalyst for application in biodiesel production: State of the art and fundamental review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd*, , 1 set. 2018.
- [8] ABDULLAH, S. H. Y. S. et al. A review of biomass-derived heterogeneous catalyst for a sustainable biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd*, , 2017.
- [9] QIAN, K. et al. Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd*, 2015.
- [10] SHUIT, S. H.; TAN, S. H. Feasibility study of various sulphonation methods for transforming carbon nanotubes into catalysts for the esterification of palm fatty acid distillate. *Energy Conversion and Management*, v. 88, p. 1283–1289, 2014.
- [11] BEHERA, B. et al. Algal biodiesel production with engineered biochar as a heterogeneous solid acid catalyst. *Bioresource Technology*, v. 310, 1 ago. 2020.
- [12] CORRÊA, A. P. estudo das condições de sulfonação do biocarvão de casca de murumuru (*astrocaryum murumuru* mart.) aplicado na produção de biodiesel via esterificação. 2018. 30p. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Química, Universidade Federal do Pará, Belém.
- [13] SILVA, L. C Síntese De Catalisador Ácido Heterogêneo A Partir De Sementes De Melão (*Cucumis Melo* L) Para Produção De Biodiesel Por Esterificação. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-árido, Mossoró.
- [14] Maracujá. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/mandioca-e-fruticultura/cultivos/maracuja>> Acesso em: 8 mar. 2024.

-
- [15] ZHENG, J. et al. Mino-modified biomass for highly efficient removal of anionic dyes from aqueous solutions. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 000, p. 1–10, 2021.
- [16] Biscoitos e cosméticos dos resíduos do maracujá. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/2071280/biscoitos-e-cosmeticos-dos-residuos-do-maracuja> > Acesso em: 18 mar. 2024.
- [17] Resíduos orgânicos. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/hortalia-nao-e-so-salada/secoes/residuos-organicos> > Acesso em: 18 mar. 2024.
- [18] MARTINS, Beatriz Ferraz. Produção de carbono ativado a partir da fibra de coco (cocos nucifera) utilizando ácido sulfúrico para aplicação na reação de esterificação. 10 f., Mossoró, 2018.
- [19] CHELLAPPAN, S. et al. Synthesis, optimization and characterization of biochar based catalyst from sawdust for simultaneous esterification and transesterification. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, p. 2654–2663, 1 dez. 2018.
- [20] LUCENA, I. L. Otimização do processo de obtenção de biodiesel através da adsorção de água formada durante a reação de esterificação. 2008. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2008.
- [21] MORETO, E.; FETT, R. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos, São Paulo: Varela, p. 114-133, 1998.
- [22] YAMEEN, M. Z. et al. Advances in production & activation of marine macroalgae-derived biochar catalyst for sustainable biodiesel production. **Fuel**, v. 337, 1 abr. 2023.