

Aproveitamento do Caroço de Açaí por Pirólise para Produção de Catalisador em Reações de Esterificação do Óleo de Palma

Kauã F. de L. Couto^{1*}; Christyan W. da Silva¹; Jessica N. B. de Sousa²; Magno K. A. Sena¹; Livia N. Cavalcanti¹; Aruzza M. de M. Araújo¹ e Amanda D. Gondim¹.

¹ Laboratório de Análises Ambientais Processamento Primário e Biocombustíveis - LABPROBIO/NUPPRAR - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. kaua.couto.133@ufrn.edu.br

² Laboratório de Intensificação de Processos e Catálise - LIPCAT - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ.

Resumo/Abstract

RESUMO - A reação de esterificação do óleo de palma utilizando catalisador heterogêneo pode ser uma alternativa promissora para a produção de biodiesel. Este trabalho investiga a produção de biodiesel por meio da esterificação do óleo de palma utilizando um catalisador heterogêneo de biocarvão sulfatado (BC-BAF-S1), derivado da pirólise do caroço de açaí. O catalisador foi caracterizado por DRX, TGA e FTIR, confirmando a presença de grupos sulfato. As reações de esterificação foram otimizadas em diferentes tempos, resultando em conversões entre 96% e 98%, conforme indicado pela TGA e GC-MS. Os resultados demonstram a viabilidade do reaproveitamento do resíduo agroindustrial do açaí e do óleo de palma na produção de biocombustíveis.

Palavras-chave: conversão química, sulfatação, pirólise, açaí, óleo de palma

ABSTRACT - The esterification reaction of palm oil using a heterogeneous catalyst can be a promising alternative for biodiesel production. This study investigates the production of biodiesel through the esterification of palm oil using a heterogeneous catalyst of sulfated biochar (BC-BAF-S1), derived from the pyrolysis of açai pit. The catalyst was characterized by XRD, TGA and FTIR, confirming the presence of sulfate groups. The esterification reactions were optimized at different reaction times, resulting in conversions between 96% and 98%, as indicated by TGA and GC-MS. The results demonstrate the feasibility of reusing açai agro-industrial waste and palm oil in the production of biofuels.

Keywords: chemical conversion, sulfation, pyrolysis, açai, palm oil

Introdução

O crescimento populacional e a necessidade de manutenção da infraestrutura impulsionam a crescente demanda energética mundial, reforçando a dependência do petróleo devido ao seu alto valor energético¹. No entanto, por ser um recurso não renovável, com reservas limitadas, instabilidade econômica e elevado impacto ambiental, torna-se essencial a busca por fontes renováveis. Nesse cenário, o aproveitamento de resíduos agroindustriais, como a semente de açaí, destaca-se como alternativa viável para a geração de biomassa e produção de insumos energéticos de alto valor agregado². Dentre esses insumos, o biocarvão obtido por pirólise se sobressai, podendo atuar como catalisador em reações de conversão química para produção de biocombustíveis.

O biodiesel, comumente obtido pela transesterificação de ácidos graxos de cadeias longas utilizando catalisadores homogêneos, apresenta desafios relacionados à purificação dos produtos e à recuperação do catalisador, elevando os custos industriais. Com isso, os catalisadores heterogêneos têm se destacado pela facilidade de separação, reaproveitamento e menor toxicidade³. A esterificação, em sua maioria, é realizada em fase homogênea, na presença de catalisadores ácidos, como: H₂SO₄, H₃PO₄, HF e HCl, porém, o uso destes

catalisadores pode trazer riscos à reação, por serem líquidos, perigosos e corrosivos⁴. Portanto, catalisadores heterogêneos, tais como alumina e silicatos⁴, podem ser uma alternativa promissora, além da biomassa agroindustrial, que possuirá um valor agregado posteriormente, ao ser usada como biocarvão ativado quimicamente via sulfatação por exemplo, especialmente frente às limitações dos catalisadores homogêneos. Dessa forma, catalisadores ácidos heterogêneos apresentam-se como uma alternativa vantajosa para a produção de biodiesel.

Em uma perspectiva de melhorar a eficiência do catalisador heterogêneo na reação de esterificação é fundamental um suporte que aumente sua área superficial. Um processo que seja capaz de cumprir essa eficiência é a sulfatação, efetuando a um aumento da área superficial e de volume e diâmetro médio dos poros presentes no material⁴. A sulfatação obtém uma incorporação do íon sulfato (SO₄²⁻) ao biocarvão na perspectiva de aumentar sua atividade catalítica formando sítios catalíticos ácidos, podendo ser utilizado na esterificação dos ácidos graxos livres presentes nos óleos⁴.

Para a conversão de ácidos graxos livres em hidrocarbonetos, os óleos residuais — como os de girassol, palma e soja — são as principais matérias-primas. O óleo de palma apresenta alta produção, destacando-se nos

estados do Pará e Bahia, conforme dados do IBGE de 2021⁵. Essa elevada produção abastece o setor alimentício, gerando resíduos viáveis para a produção de biocombustíveis. Com alto teor de triglicerídeos, o óleo de palma torna-se uma alternativa sustentável e estratégica para redução da dependência do petróleo³.

Dessa forma, nos estudos literários é visto que biomassas são submetidas à processos de ativação química via sulfatação ou sulfonação e empregadas como biocarbão em forma de catalisador heterogêneo, por sua vez, as rotas de conversão química para obtenção do biodiesel escolhidas são as tradicionais. Por conseguinte, no presente trabalho, visando o aproveitamento energético do caroço de açaí, a biomassa composta por caroço de açaí com palha foi submetida à pirólise para obtenção de biocarbão. Esse material passou por ativação química via sulfatação, promovendo a geração de sítios ativos e ácidos no suporte catalítico, o qual foi utilizado na conversão química do óleo de palma via micro-ondas, resultando na produção de biodiesel.

Experimental

Obtenção e caracterização do catalisador

A biomassa de açaí com palha (BAF) foi submetida a um pré-tratamento composto por secagem em estufa a 80 °C por 12 horas para remoção da umidade residual, seguido de trituração em moinho de facas. Após esse processo, a amostra foi peneirada em uma malha de 16 Mesh para garantir homogeneização granulométrica entre o caroço e a palha. Em seguida, a biomassa pré-tratada foi submetida ao processo de pirólise para produção de carvão vegetal. Utilizou-se 33 g de BAF em um forno tubular sob atmosfera inerte, com um programa de aquecimento de 500 °C por 1 hora e 15 minutos, todas as etapas com taxa de aquecimento de 7 °C/min. O produto sólido obtido, denominado BC-BAF, foi macerado até a obtenção de um pó fino.

Para conferir atividade catalítica ao material pirolisado, realizou-se ativação química via sulfatação utilizando ácido sulfúrico (H₂SO₄) P.A. na proporção de 1:10 (m/v). A mistura, composta por 10 g de BC-BAF em 100 mL de H₂SO₄, foi inicialmente agitada à temperatura ambiente por 15 minutos para homogeneização, sendo posteriormente submetida a refluxo a 100 °C por 2 horas. Após a reação, o meio foi diluído com água destilada, lavado e filtrado sob vácuo em funil de Büchner acoplado a Kitassato até atingir pH próximo de 6. O catalisador resultante, denominado BC-BAF-S1, foi seco em estufa a 105 °C por 8 horas.

As amostras BAF, BC-BAF e BC-BAF-S1 foram caracterizadas por análises térmicas e estruturais. A análise termogravimétrica (TGA/DTG) foi conduzida em termobalança DTG-60 (Shimadzu), utilizando aproximadamente 10 mg de amostra em cadinho de alumina, sob atmosfera de nitrogênio com vazão de 100 mL/min, em uma faixa de temperatura de ambiente até 900 °C e taxa de aquecimento de 10 °C/min. A difração de raios X (DRX) foi realizada em equipamento Bruker D2Phaser, com radiação CuK α ($\lambda = 1,54 \text{ \AA}$), corrente de 10 mA, voltagem de 30 kV e detector Lynxeye, em varredura de 2 θ de 2° a 80°, com passo de 0,02° e tempo de coleta de 0,1 s por ponto. As análises de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram conduzidas utilizando um espectrômetro da marca Thermoscientific, modelo Nicolet Summit, abrangendo uma faixa de frequência de 4000 a 600/400 cm⁻¹. (ATR/Transmissão), com 32/64 (ATR/Transmissão/) número de scans e uma resolução de 4 cm⁻¹.

Obtenção e caracterização do biocombustível

O óleo de palma foi inicialmente submetido a um pré-tratamento que envolveu filtração simples para remoção de impurezas sólidas e posterior secagem em estufa a 80 °C, a fim de eliminar a umidade residual. A biomassa obtida, denominada óleo de palma puro (BOPP), foi armazenada para posterior utilização nas reações. Na etapa de esterificação, utilizaram-se 100 g de BOPP, 70 mL de metanol (proporção 1:15 óleo/metanol) e 1,1 mL de ácido sulfúrico (2% m/m), sob refluxo, com banho de areia e agitação. A reação foi mantida a 70 °C por 5 horas⁶. Ao final, os produtos foram decantados em funil de separação por 30 minutos, lavados com água destilada até atingir pH 6, obtendo-se o produto esterificado (EOPP).

A reação de hidrólise foi realizada com 50 g de BOPP em 300 mL de solução alcoólica de KOH Et 90% (v/v), 1,75 mol/L, sob refluxo e agitação por 12 horas a 65 °C. Após a reação, os produtos foram separados com hexano e água destilada, priorizando a fase orgânica. Esta foi acidificada com HCl 6 mol/L até pH 1 e, para romper a emulsão, foi adicionada solução de cloreto de amônio. Em seguida, lavou-se com água destilada até pH 6 e realizou-se filtração simples com NaCl para remoção da água. O produto foi seco em estufa a 105 °C por 8 horas, obtendo-se o óleo de palma hidrolisado (HOPP). A caracterização do HOPP foi feita por análise

termogravimétrica (TGA/DTG), utilizando termobalança DTG-60 Shimadzu, com cadinho de alumina (~10mg), faixa de aquecimento de temperatura ambiente até 600 °C, taxa de 10 °C/min e fluxo de N₂ a 100 mL/min. Também foi previamente derivatizada e analisada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS), utilizando um equipamento modelo ISQ da Thermo Scientific. A separação cromatográfica foi realizada em uma coluna DB5MS (Restek) com dimensões de 30 m × 0,25 mm × 0,25 µm, utilizando hélio (99,999% de pureza) como gás de arraste, com fluxo constante de 1,0 mL/min. O programa de temperatura do forno consistiu em: 60 °C por 5 minutos, seguido de aquecimento até 330 °C a uma taxa de 12 °C/min, permanecendo nesta temperatura por 12 minutos. Para a derivatização, aproximadamente 0,100 g de bioóleo foram pesados, e adicionaram-se 300 µL de diclorometano, 40 µL de piridina e 80 µL do agente derivatizante MSTFA. A mistura foi aquecida em banho térmico por 30 minutos e, posteriormente, adicionou-se 1 mL adicional de diclorometano antes da análise.

Para a conversão do HOPP, realizaram-se duas reações de esterificação utilizando 5 g do HOPP em cada, com 0,5 g do catalisador BC-BAF-S1 (10% m/m), e 22,3 mL de metanol (proporção 1:96), assistidas por micro-ondas (CEM MARS-6), a 80 °C e potência de 800W. Na primeira reação, o tempo foi de 5 horas e, na segunda, 3 horas. Antes da reação, HOPP e o catalisador foram secos em estufa a 80 °C por 2 e 1 horas, respectivamente. O catalisador foi agitado com metanol por 1 hora antes da adição ao reator. Após as reações, os produtos foram separados em funil de decantação, deixados em repouso por 30 minutos e lavados com água destilada até atingir pH 6, obtendo-se os produtos EOPP-02 e EOPP-03. Ambos foram caracterizados por TGA/DTG e CG-MS sob as mesmas condições do HOPP, com análise térmica individualizada para cada amostra.

Resultados e Discussão

Catalisador

A biomassa BAF foi convertida em carvão vegetal (BC-BAF) por meio de pirólise lenta, obtendo-se rendimentos mássicos de 49,6% para o carvão, 32,4% para o bio-óleo e 18% para o biogás, conforme cálculo baseado na Equação 1.

$$\left(\frac{\text{massa do produto}}{\text{massa da biomassa}} \right) \times 100$$

Equação 1: Fórmula para cálculo do rendimento

Observou-se que maiores temperaturas de pirólise proporcionaram maior degradação térmica e maior conteúdo de carbono fixo⁷. A porosidade e área superficial do biocarvão mostraram-se diretamente relacionadas à temperatura e taxa de aquecimento, sendo que temperaturas mais elevadas favoreceram a formação de cavidades devido à condensação de voláteis e subsequente formação de rachaduras⁸. Assim, o BAF demonstrou ser promissor para conversão via pirólise, considerando rendimento, eficiência energética e porosidade do material obtido.

A caracterização estrutural por difratometria de raios-X (DRX) indicou que o BAF apresentou picos semi-cristalinos, como os de $2\theta = 16^\circ, 18^\circ, 20^\circ, 23,6^\circ$ e $25,2^\circ$, atribuídos principalmente à celulose I e à lignina. O difratograma (Figura 1) evidencia que, após a pirólise, o BC-BAF e o BC-BAF-S1 apresentaram comportamento amorfo, como esperado para materiais carbonáceos, com a ausência de picos em $2\theta = 22^\circ$, o que confirma a predominância de estrutura amorfa em todas as amostras analisadas, incluindo a sulfatada³.

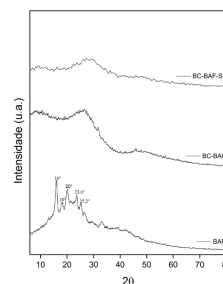


Figura 1: Difratograma do açaí seus carvões vegetais

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) forneceu informações complementares sobre a estabilidade térmica das amostras BAF, BC-BAF e BC-BAF-S1. Conforme o Termograma 1 (Figura 2), todas as amostras exibiram perda inicial de massa entre temperatura ambiente e 130 °C, atribuída à volatilização da umidade. O BC-BAF-S1 apresentou a maior perda nesta faixa devido à presença de grupos sulfato higroscópicos oriundos do processo de ativação com H₂SO₄.

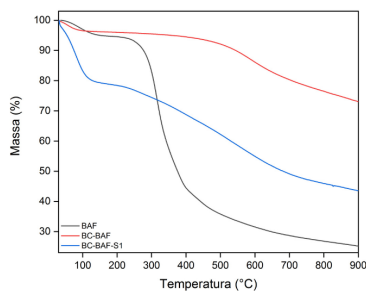


Figura 2: Curvas termogravimétricas do BAF, BC-BAF e BC-BAF-S1

A amostra BAF (curva preta) demonstrou estabilidade térmica entre 130–220 °C, seguida pela decomposição da hemicelulose entre 240–400 °C com perda de 49%, e posterior decomposição de celulose e lignina até 900 °C, com perda adicional de 19% e 25% de resíduo final. A amostra BC-BAF (curva vermelha) exibiu maior estabilidade térmica, com duas etapas principais de perda: uma inicial (umidade) de 4% até 130 °C e outra entre 300–900 °C, com perdas suaves associadas à celulose e lignina, resultando em 73% de resíduo, o que comprova sua alta estabilidade térmica.

Em contrapartida, o BC-BAF-S1 (curva azul) apresentou três eventos térmicos distintos: perda de umidade (20%) até 130 °C, decomposição intermediária entre 200–680 °C (30%) e uma etapa final até 900 °C (7%), com 43% de resíduo remanescente. Isso evidencia menor estabilidade térmica em comparação ao carvão não ativado, consequência da modificação estrutural promovida pelo agente ativante.

O espectro obtido (Figura 3) por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), indicou os principais grupos funcionais observados do biocarvão (BC-BAF) e pós sulfatação (BC-BAF-S1).

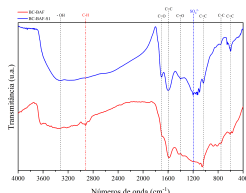


Figura 3: Bandas do espectro de estiramento do BAF, BC-BAF e BC-BAF-S1

Entre as bandas tipicamente encontradas em materiais lignocelulósicos, estão as de celulose, estiramento C-C em 756 cm⁻¹. Em 1701 cm⁻¹, é possível

observar uma banda referente estiramento C=O associado ao grupo acetato e álcool fenólico ligados à hemicelulose, enquanto as vibrações entre 600 - 1587 cm⁻¹ e em 1403 cm⁻¹ correspondem, respectivamente, ao estiramento C=C e C=O dos anéis aromáticos e de benzeno presentes na lignina. Os estiramentos referentes à água livre (-OH) presentes na estrutura lignocelulósica do material estão presentes na vasta banda entre 3600 e 3000 cm⁻¹. Quando em estudo comparativo das duas amostras, é possível afirmar que após a sulfatação no biocarvão, a incorporação do grupo sulfato foi efetiva, já que é visível a formação de uma nova banda proeminente com máximo em 1190 cm⁻¹. Esta banda refere-se à vibração do grupo SO₄²⁻, sulfato empregado à superfície do suporte de biocarvão. Outra evidência é o desaparecimento de uma banda na amostra BC-BAF-S1 em 2919 cm⁻¹, caracterizada pelo estiramento C-H de grupos metil e metileno⁹.

Biocombustível

Após a preparação do biocarvão e sua caracterização, iniciou-se a conversão do óleo de palma (BOPP) para biodiesel, com análise térmica representada na Figura 4. A curva preta indica o comportamento do BOPP, que apresentou um único evento de perda de massa iniciando-se em 195 °C e finalizando em 483 °C, com temperatura máxima em torno de 425 °C, totalizando uma perda de 98,36%. Este perfil corresponde à degradação dos triacilglicerídeos (TAG), que constituem a maior parte da amostra.

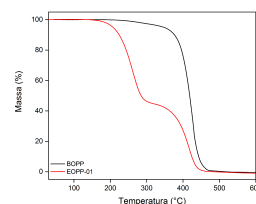


Figura 4: Curvas termogravimétricas das amostras: BOPP e EOPP-01

Já a amostra esterificada com H₂SO₄ (EOPP-01), representada pela curva vermelha, demonstrou comportamento térmico distinto, caracterizado por dois eventos de redução de massa. O primeiro, com temperatura máxima de 261 °C, está associado à termodegradação dos ésteres formados durante a reação de esterificação. O segundo evento de decomposição estende-se na mesma faixa térmica dos triacilglicerídeos não convertidos, semelhante ao perfil observado para o BOPP.

As análises termogravimétricas foram realizadas visando o comportamento de cada amostra, assim, observando a diferença na faixa de temperatura da degradação térmica nos processos de decomposição dos triacilglicerídeos e ácidos graxos livres. Esta degradação térmica nos auxilia quantitativamente no indicativo de conversão, quando se analisa as temperaturas (°C) de início e fim de cada curva de decomposição, além da massa (%) final e inicial de cada degradação, desta maneira, permitindo calcular um indicativo de conversão. Assim, então, a técnica permite examinar a eficácia da reação, determinando quantitativamente o teor de ésteres totais (conversão)⁴.

A faixa de degradação térmica observada entre 138–314 °C para o EOPP-01, a TGA indicou conversão de 45%, evidenciando a formação parcial de biodiesel. Essa conversão pode possuir um indicativo por esta análise a partir de duas evidências observadas no gráfico: o deslocamento da faixa de temperatura do início e fim da 1ª degradação da amostra EOPP-01 (quando comparada ao comportamento térmico da amostra BOPP) e, conseqüentemente, a presença de dois eventos termogravimétricos. A presença de um segundo evento indica que uma fração dos TAGs não reagiu completamente durante a esterificação, o que impacta a eficiência do processo³. Ainda assim, os resultados sugerem um avanço inicial na conversão do óleo de palma, destacando a necessidade de otimização das condições reacionais para maximizar o rendimento em alquil ésteres. Uma alternativa perspicaz pode ser a hidrólise do óleo, visando a conversão de TAGs em AGLs e obtendo, assim, uma possível melhora nas reações de esterificação posteriores.

A Figura 5 apresenta o termograma das amostras óleo de palma (BOPP), ácidos graxos livres (AGL) obtidos por hidrólise (HOPP) e os produtos das esterificações otimizadas de 5 horas (EOPP-02) e 3 horas (EOPP-03). A curva preta representa o comportamento térmico do óleo de palma, que apresenta uma única etapa de perda de massa atribuída à decomposição térmica dos triacilglicerídeos, característica de sua composição majoritária.

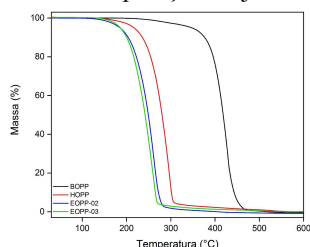


Figura 5: Curvas termogravimétricas das amostras: BOPP, HOPP, EOPP-02 e HOPP-03

A curva vermelha corresponde ao HOPP, que apresentou perda gravimétrica iniciando-se em 125 °C e finalizando em 331 °C, com temperatura máxima em 298 °C e conversão de 96,5%, resultando em um resíduo final de apenas 0,04%. Em relação ao BOPP, essa amostra apresentou uma etapa de degradação diferenciada devido à quebra dos triglicerídeos em ácidos graxos livres, o que modificou sua estabilidade térmica e comportamento de decomposição.

As curvas azul (EOPP-02) e verde (EOPP-03) representam os produtos da esterificação otimizados em diferentes tempos de reação, 5 horas e 3 horas, respectivamente. O EOPP-02 apresentou uma perda de massa equivalente à transformação do éster⁴ entre 102–285 °C, com temperatura máxima de degradação térmica dos ésteres, advindos da reação, em 260 °C, atingindo uma conversão de 98% e resíduo final de 0,01%. O EOPP-03, por sua vez, mostrou comportamento similar, com volatilização entre 132–272 °C, que possivelmente seja um indicativo da conversão dos AGLs em biodiesel, temperatura máxima de 261 °C e conversão de 96%, resultando em um resíduo final de 0,05%.

A Tabela 1, faz referência a todos os comportamentos térmicos das amostras provenientes da hidrólise e das esterificações do hidrolisado com otimização de tempo.

Amostra	Etapa	Faixa de temperatura (°C)	Perda de massa (%)	Resíduo (%) - 600 °C
BOPP	1	195 - 483	98,36	1,64
HOPP	1	125 - 331	96,5	0,04
EOPP-02	1	102 - 285	98	0,01
EOPP-03	1	132 - 272	96	0,05

Tabela 1: Dados termogravimétricos para BOPP, HOPP, EOPP-02 e EOPP-03

Com isso, é notável a diferença de temperaturas iniciais e finais das degradações das amostras EOPP-02 e EOPP-03 em relação à amostra HOPP. Esta diferença se dá pela maior estabilidade térmica dos ácidos carboxílicos pertencentes aos AGLs do HOPP, que possuem hidroxilas (OH) capazes de realizar ligações de hidrogênio, assim, aumentando sua temperatura inicial de degradação. Isso

não ocorre nas amostras obtidas depois das esterificações, pois há um indicativo de conversão de ácidos carboxílicos em ésteres, então, diminuindo a temperatura inicial e final da degradação, quando comparadas à HOPP¹⁰.

A Tabela 2, traz os resultados obtidos a partir da análise das amostras HOPP, EOPP-02 e EOPP-03 na Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massas (GC-MS).

AMOSTRA	%ÁREA	COMPOSTO
HOPP	3,8	Ácido esteárico
	13,7	Ácido palmítico
	14	Ácido trans-9-octadecenoico
	20,7	Ácido n-hexadecanoico
	47,8	Ácido cis-13-octadecenoico
EOPP-02	1,4	Tetradecanoato de metila
	11,3	Estearato de metila
	29,5	Ácido hexadecanoico, éster metílico
	57,8	Ácido 9-octadecenoico (Z)-, éster metílico
EOPP-03	7,3	Ácido trans-9-octadecenoico, éster trimetilsilílico
	9,4	Estearato de metila
	27,5	Ácido hexadecanoico, éster metílico
	55,8	Ácido 9-octadecenoico (Z)-, éster metílico

Tabela 2: Resultados das análises de GC-MS para HOPP, EOPP-02 e EOPP-03

Os resultados da Tabela 2 para a amostra HOPP constatou que o processo de hidrólise foi favorável à conversão do TAG em AGL, obtendo majoritariamente ácido esteárico, ácido palmítico, ácido trans-9-octadecenoico, ácido n-hexadecanoico e ácido cis-13-octadecenoico. Em corroboração com a técnica de TGA, para as amostras EOPP-02 e EOPP-03, destaca-se a obtenção dos ésteres metílicos, confirmando a eficiência da conversão dos ácidos graxos livres em ésteres, assim, mantendo o resultado consistente com a investigação anterior¹¹.

Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a hidrólise do óleo de palma melhorou significativamente a conversão na etapa subsequente de esterificação, proporcionando elevadas taxas de conversão, em 96% e 98%. Além disso, as características do catalisador BC-BAF-S1 foram confirmadas, através das técnicas de análise termogravimétrica, difratometria de raio-X e espectroscopia na região do infravermelho por

transformada de Fourier, devido à presença de sítios ácidos do grupo SO_4^{2-} , favorecendo a reação. As otimizações de tempo também demonstraram eficiência, pois a conversão do óleo de palma em biodiesel manteve-se elevada em torno de 96% mesmo com a redução do tempo reacional. Assim, os resultados obtidos validam a abordagem desenvolvida, demonstrando a viabilidade do reaproveitamento do resíduo de açaí e do óleo de palma para produção de biocombustíveis.

Agradecimentos

O presente estudo foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Além dos autores, que agradecem o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P, D&I da Resolução nº 918/2023 ANP. Ao laboratório LABPROBIO/NUPPRAR pelas análises realizadas e ao Instituto de Química da UFRN.

Referências

1. R. M. Silveira; A. C. O. Lima; L. C. Costa; F. G. Oliveira; M. A. Ribeiro, *Braz. J. Dev.* **2021**, 7, 33276–33303.
2. L. H. H. Guerreiro; A. B. Santos; M. S. Lima; A. A. Pereira; M. P. de Souza, *Energies*, **2022**, 15, 6234.
3. P. H. N. Silva, Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.
4. J. P. da C. Evangelista; A. M. de M. Araújo; A. D. Gondim; A. S. de Araujo, *Energy & Environment*, **2023**, 36, 786-806.
5. IBGE. Produção Agrícola Municipal 2021. Rio de Janeiro, 2022.
6. H. H. Naseef; R. H. Tulaimat, *Energy Conversion and Management: X*, **2025**, 26, 5-7.
7. A. J. Z. Toczzydowski; R. A. Slesak; R. T. Venterea; K. A. Spokas, *For. Ecol. Manage.* **2023**, 534.
8. Y. Zhang; M. Li; H. Liu; Y. Cheng; J. Li; Y. Zhang, *Fuel*, **2023**, 347, 128461.
9. W.V. Lobo; O.A.R.L. Paes; A.S. Sousa; W. Pinheiro; C.A.S. Sousa; J.A. Bezerra; L. Novita; I.F. Cheng; L.K.C. Souza; F.A. Freitas. *Renewable Energy*, **2025**, 241, 122355.
10. A.R. Zahedi; S.A. Mirnezami. *Renewable Energy*, **2020**, 162, 1177-1194.
11. H.W. Aparamarta; S. Gunawan; R. Ibrahim; M. Hariawan; F.B. Haq; M.F. Supriadiputa. *South African Journal of Chemical Engineering*, **2025**, 52, 311-324.