



Produção de bio-óleo por pirólise de óleo de fritura residual com lama vermelha ativada

Production of bio-oil by pyrolysis of waste frying oil using activated red mud

Erika Magalhães Alencar¹, Carolina Dutra Lacerda¹, Sergio Duvoisin Junior¹,
 Romero Moreira de Oliveira², Douglas Alberto Rocha de Castro¹, Wenderson Gomes dos Santos¹

RESUMO

O estudo investigou a produção de bio-óleo a partir de óleo residual de fritura por pirólise catalítica com lama vermelha ativada, visando à geração de energia sustentável e ao reaproveitamento de resíduos. A pirólise foi realizada a 450 °C, empregando lama vermelha (LV) ativada com HCl a 1 mol L⁻¹ e 2 mol L⁻¹, em concentrações de 5–20%. A LV ativada com HCl 1 mol L⁻¹ a 20% reduziu a acidez de 201,14 para 81,34 mg KOH g⁻¹, elevou a fração de hidrocarbonetos para 59,18% e alcançou rendimento líquido de 82,37%. A ativação com HCl 2 mol L⁻¹ a 15% produziu 66,8% de hidrocarbonetos. Análises por espectroscopia no infravermelho e cromatografia gasosa confirmaram a redução de grupos ácidos e a formação de olefinas (até 38,22%) e hidrocarbonetos leves (C₈–C₁₂) com o uso de catalisadores. Apesar da eficiência, a acidez final excedeu o limite estabelecido pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), exigindo pós-tratamento. Conclui-se que a LV ativada com HCl 1 mol L⁻¹ a 20% apresenta maior eficiência catalítica, indicando potencial para aplicação como biocombustível após etapas de refino.

Palavras-chave: Energia sustentável; Biocombustíveis renováveis; Catalisadores ambientais.

ABSTRACT

The study investigated the production of bio-oil from waste frying oil via catalytic pyrolysis with activated red mud, aiming at sustainable energy generation and waste reuse. Pyrolysis was carried out at 450 °C, using red mud (RM) activated with 1 mol L⁻¹ and 2 mol L⁻¹ HCl, at concentrations of 5–20%. RM activated with 1 mol L⁻¹ HCl at 20% reduced acidity from 201.14 to 81.34 mg KOH g⁻¹, increased the hydrocarbon fraction to 59.18%, and achieved a net yield of 82.37%. Activation with 2 mol L⁻¹ HCl at 15% produced 66.8% hydrocarbons. Analyses by infrared spectroscopy and gas chromatography confirmed the reduction of acidic groups and the formation of olefins (up to 38.22%) and light hydrocarbons (C₈–C₁₂) with the use of catalysts. Despite its efficiency, the final acidity exceeded the limit established by the Agência Nacional do Petróleo (ANP), requiring post-treatment. It is concluded that RM activated with 1 mol L⁻¹ HCl at 20% exhibits greater catalytic efficiency, indicating potential for application as a biofuel after refining steps.

Keywords: Sustainable energy; Renewable biofuels; Environmental catalysts

¹ Universidade Federal do Amazonas;

² Universidade Federal do Pará.

Autor correspondente: wenderson@ufam.edu.br

Recebido em: 13/05/2025. Aceito em: 31/03/2026.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A demanda energética global continua crescendo e exige a ampliação de fontes renováveis para reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Estima-se que até 40% da energia futura possa ser suprida pela biomassa, reforçando a necessidade de expansão dessas fontes para atender à demanda crescente (Parvari; Mahajan; Hewitt, 2025; Shehhi *et al.*, 2025). No Brasil, relatórios internacionais apontam o país como líder em bioenergia, impulsionado por políticas públicas como incentivos tributários e a mistura obrigatória de etanol à gasolina e de biodiesel ao diesel. Atualmente, a bioenergia representa aproximadamente 25,7% do consumo no setor de transportes, evidenciando seu papel no atendimento às metas de segurança energética e sustentabilidade (IEA BIOENERGY, 2021).

Entre as alternativas renováveis, o bio-óleo destaca-se como potencial substituto de diesel convencional. Trata-se de um líquido volátil, de coloração marrom-escura, obtido por pirólise de biomassa em atmosfera inerte. Além do bio-óleo, o processo também gera biocarvão e gases não condensáveis, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético (Parvari; Mahajan; Hewitt, 2025; Oliveira, 2019).

O aproveitamento de óleo de fritura residual como matéria-prima para pirólise traz ganhos ambientais e econômicos expressivos, pois evita o descarte indevido, que contamina o solo e os recursos hídricos, e reduz a pressão sobre cultivos destinados à produção de óleos vegetais. Além disso, contribui para a economia circular e diminui o consumo de água associado à produção de óleos vegetais virgens (Coelho *et al.*, 2020; Nascimento *et al.*, 2021).

Nesse contexto, práticas que evitam o descarte incorreto e promovem a reutilização do óleo de cozinha são fundamentais para potencializar os benefícios ambientais e socioeconômicos dessa rota (Souza Filho *et al.*, 2023; Glevitzky *et al.*, 2025).

A lama vermelha, resíduo gerado na produção de alumina pelo processo Bayer a partir da bauxita, desponta como um catalisador promissor. Quando ativada com HCl, essa matriz pode contribuir para a redução da acidez do produto, com diminuição do teor de ácidos graxos e aumento de seu valor agregado (Zhang *et al.*, 2024; Oliveira, 2019).

Este trabalho investigou o efeito da adição de lama vermelha ativada com HCl nas concentrações de 1 e 2 mol L⁻¹ sobre o rendimento e as propriedades físico-químicas e composicionais do bio-óleo. A pirólise foi conduzida a 450 °C, utilizando-se teores de catalisador de 5%, 10%, 15% e 20% em relação à massa de biomassa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa contou com a colaboração de três centros de investigação: o Laboratório de Termodinâmica Aplicada da UFAM, o Laboratório de Química Orgânica da ULBRA e a Central Analítica da UEA. Como matéria-prima utilizou-se óleo residual de fritura, armazenado em frascos de polietileno de alta densidade de 5 L, mantidos à temperatura ambiente para garantir a conservação de suas características até o início dos experimentos.

Inicialmente, realizou-se a pirólise sem adição de catalisador a 450 °C, visando estabelecer condições de referência. Em seguida, conduziram-se ensaios catalíticos com

incrementos de 5%, 10%, 15% e 20% em massa de lama vermelha (LV) previamente ativada em soluções de HCl a 1 mol L^{-1} e 2 mol L^{-1} . Antes do uso, o catalisador foi pré-condicionado a $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 h para eliminação de umidade. Todos os testes foram conduzidos com temperatura fixa em $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, seguindo os protocolos descritos por Nascimento *et al.* (2021), Oliveira *et al.* (2020) e Santos (2019).

2.1 TRATAMENTO FÍSICO DO ÓLEO RESIDUAL

O óleo de fritura recolhido foi inicialmente filtrado para eliminar impurezas e, em seguida, submetido à desidratação a $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$, com o objetivo de minimizar o conteúdo de água. Esse procedimento adotou os preceitos metodológicos estabelecidos por Nascimento *et al.* (2021), assegurando a uniformidade da matéria-prima antes da etapa de pirólise.

2.2 ATIVAÇÃO DO CATALISADOR DE LAMA VERMELHA

A preparação do catalisador seguiu o protocolo descrito por Oliveira (2019). Primeiramente, a lama vermelha foi desidratada em estufa, depois reduzida a pó por moagem, misturada com solução de HCl (concentrações de 1 mol L^{-1} e 2 mol L^{-1}) e, finalmente, desidratada a $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24 h para remoção completa de umidade.

2.3 CRAQUEAMENTO TERMOCATALÍTICO

Os experimentos de craqueamento ocorreram em um reator em batelada de aço inox 304 de capacidade 0,26 L, em escala laboratorial. Cada ensaio utilizou 70 g de óleo residual, homogeneizados com lama vermelha ativada com HCl 1 mol L^{-1} ou 2 mol L^{-1} em proporções de 5%, 10%, 15% ou 20% m/m. A mistura foi aquecida à taxa de $10 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ até alcançar $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$, controlada por sistema PID e monitorada por termopar tipo K. As temperaturas interna e superior do reator foram registradas a cada 5 min. Os gases gerados foram conduzidos ao exaustor, enquanto o coque permaneceu no leito do reator, e o produto líquido (PCL) foi condensado em circuito fechado. A montagem completa do sistema de pirólise está representada na Figura 1.

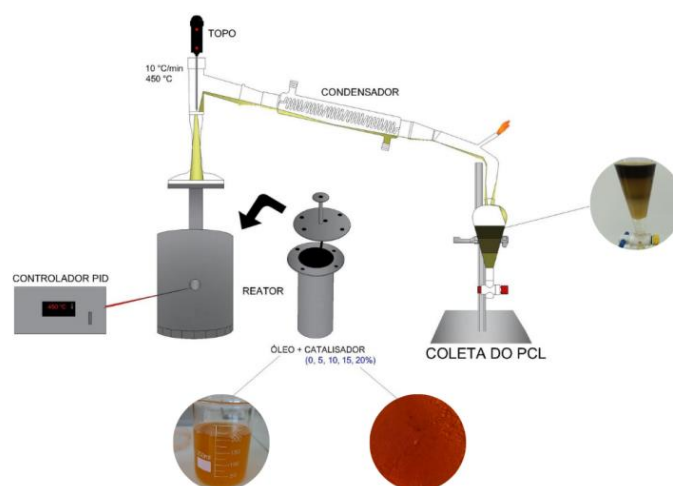


Figura 1. Processo de pirólise do óleo de fritura.

2.4 CÁLCULO DE RENDIMENTOS PÓS-PIRÓLISE

Após o resfriamento do reator, realizou-se a pesagem do reator e do coletor contendo o produto líquido condensado (bio-óleo) para determinação dos rendimentos por balanço de massa. As amostras de bio-óleo foram armazenadas em frascos até as análises subsequentes.

O rendimento de bio-óleo foi calculado pela razão entre a massa de bio-óleo obtida (BO) e a massa de óleo purificado (OP) utilizada como matéria-prima, conforme a Equação (1). O rendimento de coque (resíduo sólido remanescente no reator) foi obtido de forma análoga pela Equação (2). O rendimento de gases não condensáveis foi determinado por diferença, assumindo a conservação de massa no processo, conforme a Equação (3).

$$\eta_{BO\%} = \frac{BO}{OP} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\eta_{Coque\%} = \frac{Coque}{OP} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\eta_{Gás\%} = 100 - \eta_{BO} - \eta_{Coque} \quad (3)$$

em que:

OP = massa de óleo purificado (matéria-prima);

BO = massa de bio-óleo coletada;

Coque = massa do resíduo sólido remanescente no reator.

2.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS PRODUTOS

Índice de acidez (IA): determinado conforme o método Cd 3d-63 da AOCS (1990), que quantifica ácidos graxos livres por titulação potenciométrica.

Índice de refração (IR): medido a 20 °C em refratômetro de bancada Abbé, calibrado com água destilada (IR = 1,333), seguindo o método Cc 7-25 (AOCS, 1997).

Massa específica: avaliada com base na norma AOAC 985.19 (1990), utilizando-se balão volumétrico de 10 mL e balança analítica de alta precisão.

pH: medido em triplicata à temperatura ambiente, com pH-metro calibrado em soluções-tampão de pH 4,0; 7,0 e 10,0.

Viscosidade cinemática: empregou-se viscosímetro capilar tipo Ostwald (nº 300), com controle de temperatura a 40 °C ± 0,1 °C, conforme ISO 3105 (1994), ASTM D 446 (2019) e ASTM D 2515 (2011).

2.6 CARACTERIZAÇÃO COMPOSICIONAL DOS PRODUTOS

FT-IR: espectros obtidos no Shimadzu IRAffinity-1S com acessório ATR, de 400 a 4 000 cm⁻¹, resolução de 4 cm⁻¹ e 70 varreduras, processados em LabSolutions IR (Shimadzu, 2022) para correção de linha de base e ajuste de picos.

CG-MS: análise realizada no Shimadzu GCMS-TQ8050 NX, coluna SH-I-5Sil MS (30 m × 0,25 mm × 0,25 µm), injetor a 280 °C, split 1:30, volume injetado 0,5 µL; programa de temperatura: 60 °C (inicial), 5 °C·min⁻¹ até 200 °C, 20 °C·min⁻¹ até 230 °C, 10 °C·min⁻¹ até 280 °C (5 min); detector por impacto eletrônico (70 eV), varredura de 40–600 m/z;

identificação via biblioteca NIST (2020) e quantificação por percentual de área cromatográfica (Santos, 2019).

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todos os experimentos foram realizados em triplicata ($n=3$), e os dados obtidos foram submetidos a análises de variância (ANOVA), com as médias comparadas pelo Teste de Tukey a 5% de significância. Os componentes principais foram ainda submetidos a análises adicionais no software Origin 8.0 (OriginLab, 2007).

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO ÓLEO DE FRITURA E DOS BIO-ÓLEOS

A Tabela 1 compara os resultados das análises físico-químicas do óleo de fritura residual em estado bruto e pós-tratamento térmico, bem como as propriedades dos bio-óleos obtidos pelo craqueamento termocatalítico desse mesmo óleo, com e sem o catalisador LV nas concentrações de 1 mol L^{-1} e 2 mol L^{-1} (LV 1M e 2M). As análises de variância (ANOVA) e os testes de Tukey foram conduzidos separadamente para o óleo residual e para os bio-óleos.

A pirólise catalítica do óleo de fritura a $450 \text{ }^{\circ}\text{C}$ com 20% de lama vermelha ativada em $\text{HCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ reduziu o índice de acidez de $201,14 \pm 1,13$ para $81,34 \pm 1,4 \text{ mg KOH g}^{-1}$, uma diminuição de cerca de 60%. Essa desacidificação evidencia reações de desoxigenação catalítica – principalmente descarboxilação (remoção de CO_2 de ácidos graxos livres, gerando hidrocarbonetos com um carbono a menos) e descarbonilação (remoção de CO) – além de craqueamento e possível esterificação de triglicerídeos residuais. Tais transformações são promovidas pelos sítios metálicos (Fe e Al) da lama vermelha que, após ativação ácida com HCl , expõem sítios ácidos de Lewis (coordenação com oxigênio carbonílico) e Brønsted (doação de prótons), facilitando a adsorção seletiva de moléculas oxigenadas e a quebra de ligações C–O e C–C (Mardiah *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024; Yang *et al.*, 2024).

O mecanismo de ativação com $\text{HCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ remove impurezas alcalinas (sódio e cálcio) preservando o equilíbrio dos metais ativos e maximizando a atividade catalítica, enquanto a ativação com 2 mol L^{-1} pode causar lixiviação excessiva desses metais, reduzindo a eficiência (Vuković *et al.*, 2024). Essa diferença refletiu-se nos parâmetros físico-químicos do bio-óleo: em todos os indicadores críticos (exceto pH), a lama ativada a 1 mol L^{-1} superou a de 2 mol L^{-1} , cuja ativação mais intensa comprometeu a estabilidade dos metais ativos (Pereira *et al.*, 2024).

A massa específica do bio-óleo caiu para $0,8353 \pm 0,002 \text{ g cm}^{-3}$ com 20% de LV 1M (e para $0,8381 \pm 0,0136 \text{ g cm}^{-3}$ com LV 2M a 15%), refletindo maior formação de hidrocarbonetos leves resultante das reações de desoxigenação e craqueamento (Suherman *et al.*, 2023). O pH elevou-se para 4,68 com 20% de LV 1M, enquanto a

viscosidade cinemática reduziu para $4,25 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, indicando maior eficiência de quebra de cadeias longas em comparação com a LV 2M. O índice de refração apresentou valor de $1,4648 \pm 0,0$ com 5% de LV 1M, consistente com a presença de compostos aromáticos e insaturados. Entretanto, a amostra com 15% de LV 2M registrou valor anômalo de $1,3443 \pm 0,0$, próximo ao índice de refração da água ($\approx 1,333$ a 20°C). Esse resultado sugere possível presença de fase aquosa ou umidade residual na amostra, atribuível à formação de água durante as reações de desoxigenação (descarboxilação e desidratação) ou à separação incompleta de fases no produto líquido, agravada pela ativação ácida com HCl 2 mol L^{-1} (Foong *et al.*, 2025). Apesar do valor atípico, as demais análises físico-químicas e composicionais dessa amostra mantiveram-se coerentes com os demais bio-óleos obtidos.

Tabela 1. Caracterização físico-química do óleo de fritura residual e dos bio-óleos. Valores representam média $\pm$ desvio-padrão. Letras distintas em minúsculas (a, b) na mesma coluna indicam diferenças significativas (Tukey–HSD, $p < 0,05$) entre “Óleo não tratado” e “Óleo tratado”. Letras distintas em maiúsculas (A, B, C...) na mesma coluna indicam diferenças significativas (Tukey–HSD, $p < 0,05$) entre os bio-óleos

Análises físico-químicas	Índice de acidez (mg KOH g ⁻¹)	Massa específica (g cm ⁻³)	pH	Viscosidade (mm ² s ⁻¹)	Índice de refração
Óleo não tratado	$103,78 \pm 0,4^a$	$0,9 \pm 0,0012^a$	$5,11 \pm 0,0^a$	$21,91 \pm 0,14^a$	ND
Óleo tratado	$142,35 \pm 0,2^b$	$0,876 \pm 0,0012^b$	$4,94 \pm 0,0^b$	$23,6 \pm 0,14^b$	ND
0% (Sem catalisador)	$201,14 \pm 1,13^a$	$0,8643 \pm 0,0033^a$	$4,17 \pm 0,0^a$	$7,83 \pm 0,14^a$	$1,4626 \pm 0,0^a$
5% LV 1M	$150,41 \pm 1,06^b$	$0,8518 \pm 0,0004^{bc}$	$3,88 \pm 0,0^b$	$6,17 \pm 0,14^b$	$1,4648 \pm 0,0^b$
10% LV 1M	$147,26 \pm 0,0^c$	$0,8495 \pm 0,0028^{bc}$	$3,88 \pm 0,0^b$	$6,08 \pm 0,14^b$	$1,4629 \pm 0,0^c$
15% LV 1M	$135,69 \pm 1,05^d$	$0,84 \pm 0,0011^{dc}$	$3,86 \pm 0,0^c$	$4,75 \pm 0,0^c$	$1,4635 \pm 0,0^d$
20% LV 1M	$81,34 \pm 1,4^e$	$0,8353 \pm 0,002^e$	$4,68 \pm 0,0^d$	$4,25 \pm 0,0^d$	$1,4601 \pm 0,0^e$
5% LV 2M	$161,98 \pm 0,71^f$	$0,8522 \pm 0,0017^b$	$4,49 \pm 0,0^e$	$7,00 \pm 0,0^e$	$1,4634 \pm 0,0^d$
10% LV 2M	$123,06 \pm 1,06^g$	$0,8514 \pm 0,0011^{bc}$	$3,99 \pm 0,0^f$	$6,75 \pm 0,0^f$	$1,4665 \pm 0,0^f$
15% LV 2M	$99,57 \pm 0,7^h$	$0,8381 \pm 0,0136^{bcd}$	$4,27 \pm 0,0^g$	$7,00 \pm 0,0^e$	$1,3443 \pm 0,0^g$
20% LV 2M	$93,26 \pm 0,7^i$	$0,8422 \pm 0,0005^{cdc}$	$4,55 \pm 0,0^h$	$5,67 \pm 0,14^g$	$1,4615 \pm 0,0^h$

ND = Não Determinado.

Apesar da eficiência catalítica observada, o valor final de acidez ($81,34 \text{ mg KOH g}^{-1}$) ainda excede o limite de $0,50 \text{ mg KOH g}^{-1}$ para biodiesel estabelecido pela ANP (2011), o que reforça a necessidade de pós-tratamento por hidrotratamento ou hidrogenação catalítica para atender às especificações de biocombustíveis tipo diesel. Estudos recentes de pirólise catalítica de óleos residuais de fritura e óleos de cozinha usados confirmam

que catalisadores à base de lama vermelha modificada favorecem precisamente as rotas de desoxigenação descritas, elevando a fração de hidrocarbonetos leves (C_8 – C_{12}) e olefinas, com consequente diminuição da massa específica e da viscosidade cinemática (Su *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2022). Nesse contexto, a condição com 20% de LV 1M revela-se a mais promissora para a obtenção de bio-óleo com características físico-químicas aprimoradas, embora exija regeneração do catalisador e possível combinação com ácidos sólidos (ex.: zeólitas) para converter ácidos residuais em cetonas ou ésteres mais estáveis (Almeida *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2022).

3.2 TEMPERATURA DURANTE CRAQUEAMENTO TERMOCATALÍTICO

A Figura 2 mostra as variações de temperatura no interior (T reator) e no topo (T topo) do reator durante o craqueamento termocatalítico, realizado a 450°C com diferentes concentrações de catalisador (5%, 10%, 15% e 20%) e sem catalisador.

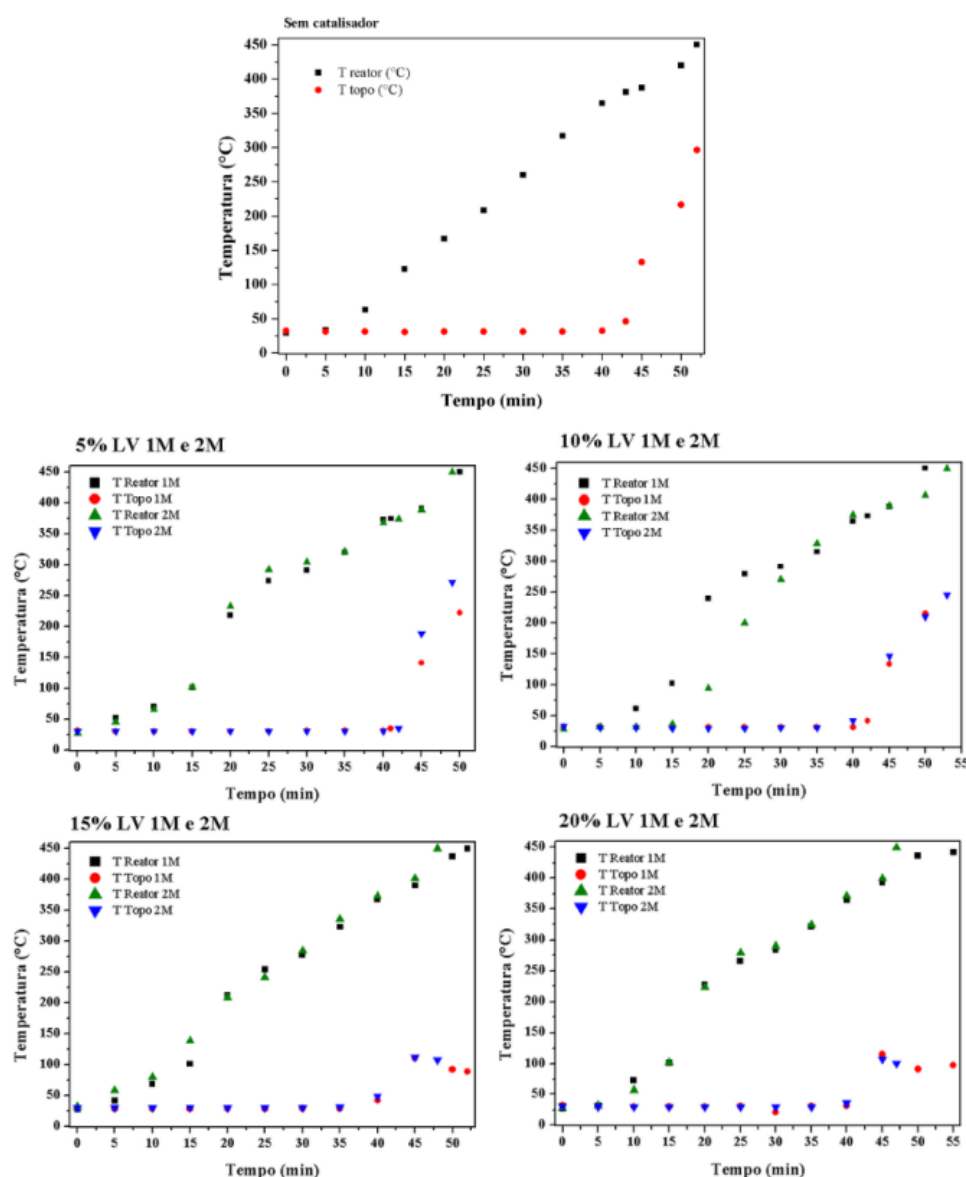


Figura 2. Variações de temperatura nos processos de craqueamento termocatalítico a 450 °C.

Em todos os casos, a temperatura interna evoluiu de forma linear ao longo do tempo, com um coeficiente angular estável até cerca de 40–45 min, quando ocorre mudança brusca de inclinação marcando o início da pirólise, conforme observado por Mancio (2015) e Nascimento *et al.* (2021).

Sem catalisador, a reação teve início aos 43 min, com o reator a 381 °C e o topo a 46 °C. Com lama vermelha ativada a 1M, o tempo de partida decresceu progressivamente: 41 min (5%; 374 °C/34 °C), 42 min (10%; 373 °C/41 °C), e 40 min para 15% (368 °C/42 °C) e 20% (364 °C/31 °C). Para LV 2M, os tempos de início foram semelhantes: 42 min (5%; 373 °C/34 °C), e 40 min nos demais teores — 10% (374 °C/41 °C), 15% (373 °C/49 °C) e 20% (371 °C/35 °C).

De modo geral, o acréscimo de lama vermelha ativada (1M ou 2M) reduziu progressivamente o tempo e a temperatura de início da pirólise à medida que a concentração do catalisador aumentou. Esse comportamento demonstra que os sítios catalíticos ácidos (Lewis e Brønsted) expostos na superfície da lama vermelha após ativação com HCl atuam como centros ativos que facilitam as etapas iniciais de craqueamento e desoxigenação, oferecendo um caminho reacional alternativo com menor energia de ativação (Mousavi *et al.*, 2026). Especificamente, os íons metálicos (principalmente Fe^{3+} e Al^{3+}) promovem a adsorção de triglicerídeos e ácidos graxos livres, catalisando a quebra seletiva de ligações C–O e C–C, o que acelera a formação de hidrocarbonetos leves (C_8 – C_{12}) e olefinas já em temperaturas mais baixas (Yang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

Estudos recentes de pirólise catalítica de óleos residuais de fritura e óleos de cozinha usados confirmam que catalisadores à base de lama vermelha modificada por ácido reduzem significativamente a temperatura de início da reação (até 20–40 °C) e aceleram a volatilização dos produtos, aumentando a seletividade para frações hidrocarbonetadas de maior valor energético (Li *et al.*, 2022; Su *et al.*, 2022). A maior eficiência observada com a LV 1M em concentrações de 15–20% reforça que o equilíbrio ótimo entre sítios ácidos e metais ativos é essencial para maximizar a aceleração catalítica sem saturação dos sítios, o que pode comprometer a qualidade do bio-óleo em teores excessivos de catalisador (Vuković *et al.*, 2024).

Portanto, ajustes finos na dosagem e na molaridade da lama vermelha são necessários não apenas para otimizar o rendimento, mas principalmente para controlar a seletividade das rotas de desoxigenação e craqueamento, garantindo um bio-óleo com perfil composicional mais favorável à aplicação como biocombustível (Chen *et al.*, 2021).

3.3 RENDIMENTO DOS PRODUTOS

A Figura 3 apresenta os rendimentos em porcentagem dos produtos sólidos, líquidos e gasosos obtidos a partir do craqueamento termocatalítico do óleo de fritura, realizado na temperatura de 450 °C.

A Figura 3 revela comportamentos distintos conforme a dosagem e a molaridade do catalisador. Na ativação 1M, o rendimento líquido decresce gradualmente de 62,04% (5%) para 53,88% (15%), com aumento paralelo da fração gasosa, enquanto em 20% ocorre um salto acentuado para 82,37%, acompanhado de redução drástica do sólido (0,36%) e

do gás (17,27%). Para a ativação 2M, o máximo de líquido (76,11%) ocorre a 10%, com queda acentuada nas concentrações maiores.

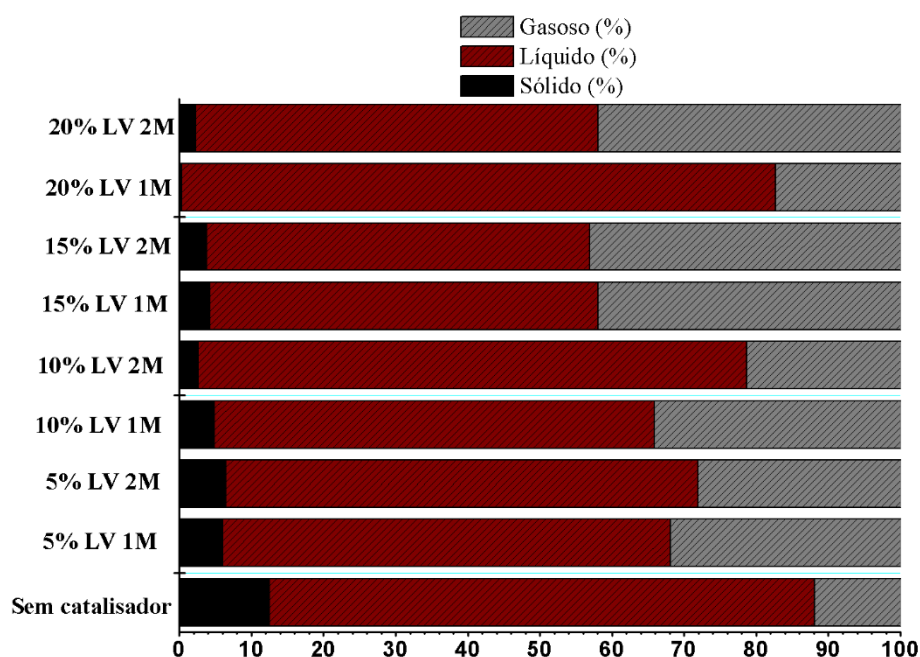


Figura 3. Rendimento dos produtos obtidos a 450 °C.

Esses resultados indicam que a lama vermelha ativada em HCl 1M, na dosagem ótima de 20%, maximiza as rotas de desoxigenação catalítica (descarboxilação e descarbonilação de ácidos graxos livres), convertendo compostos oxigenados em hidrocarbonetos líquidos em vez de promover craqueamento secundário para gases ou formação de coque. Os sítios ácidos de Lewis (Fe^{3+} , Al^{3+}) e Brønsted expostos após ativação moderada facilitam a adsorção seletiva de moléculas polares, acelerando a quebra de ligações C–O e C–C e favorecendo a produção de hidrocarbonetos leves e olefinas com menor formação de resíduos sólidos (Yang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024). Em contraste, a ativação mais agressiva em 2M provoca lixiviação excessiva de metais ativos, saturando os sítios catalíticos e desviando a reação para gaseificação, o que explica a queda acentuada do rendimento líquido em teores elevados (Vuković *et al.*, 2024).

Estudos recentes de pirólise catalítica de óleos residuais de fritura e óleos de cozinha usados com catalisadores à base de lama vermelha confirmam que dosagens otimizadas (15–20%) de lama vermelha ativada por ácido aumentam o rendimento de bio-óleo em até 20–30% em relação ao processo térmico não catalítico, precisamente pela supressão de reações secundárias de craqueamento e pela promoção de desoxigenação seletiva (Dirane; Castro; Santos, 2023; Li *et al.*, 2022; Su *et al.*, 2022). Assim, a condição de 20% LV 1M mostrou-se superior, alcançando rendimento líquido 8,2% maior que o máximo da LV 2M (82,37% vs. 76,11%), além de reduzir drasticamente os resíduos sólido (0,36%) e gasoso (17,27%). Essa superioridade decorre do equilíbrio ideal entre atividade ácida e estabilidade metálica, tornando-a a condição mais promissora para escalonamento industrial de pirólise catalítica de óleo de fritura residual (Nascimento *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022).

3.4 ANÁLISES COMPOSICIONAIS DOS BIO-ÓLEOS OBTIDOS

A caracterização composicional dos produtos craqueados complementa os dados físico-químicos prévios, elucidando as transformações químicas responsáveis pelas melhorias observadas.

3.4.1 Espectroscopia na região de infravermelho (FT-IR)

A Figura 4 apresenta as análises espectrométricas dos produtos coletados.

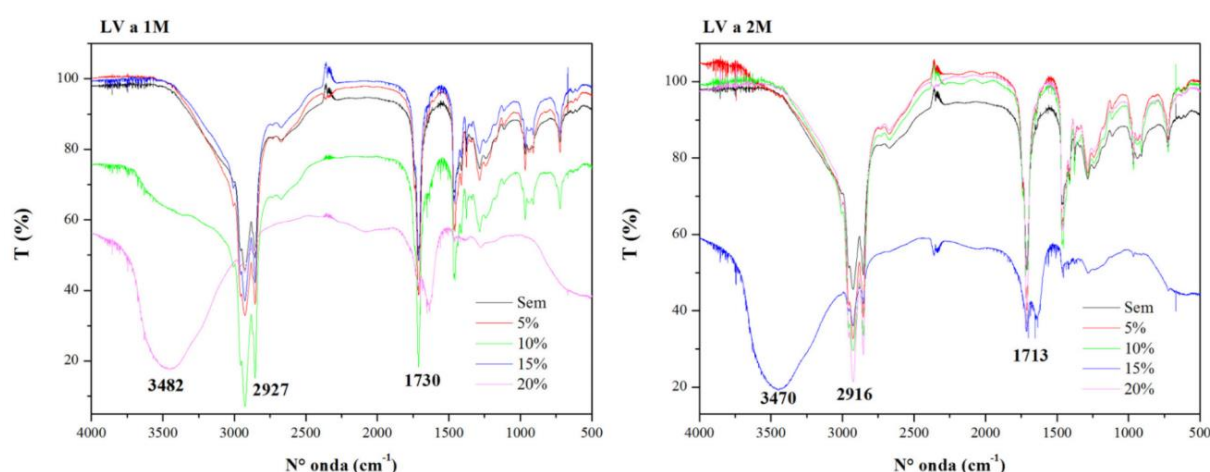


Figura 4. IV dos produtos craqueados a 450 °C.

Os espectros de FT-IR dos bio-óleos catalíticos apresentaram redução significativa da intensidade da banda em 1700–1740 cm^{-1} (alongamento C=O) em relação ao bio-óleo sem catalisador. Essa diminuição sugere a ocorrência de reações de desoxigenação catalítica (descarboxilação e descarbonilação), promovidas pelos sítios ácidos de Lewis (coordenação de Fe^{3+} e Al^{3+} com o oxigênio carbonílico) e Brønsted (doação de prótons) da lama vermelha ativada com HCl. Tais sítios facilitam a remoção seletiva de oxigênio na forma de CO, CO_2 e H_2O , convertendo ácidos carboxílicos e ésteres em hidrocarbonetos e olefinas (Chen *et al.*, 2021). O aumento relativo das bandas em 2850–2980 cm^{-1} (C–H alifático) e 1370–1460 cm^{-1} (deformação C–H) confirma a formação de hidrocarbonetos, corroborando a ação catalítica da LV na quebra de ligações C–O e C–C (Yang *et al.*, 2024).

Os teores de 10 e 20% de LV 1M e de 15% de LV 2M apresentaram bandas alongadas em torno de 3482 cm^{-1} e 3470 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento do grupo hidroxila (O–H). Comportamento semelhante foi encontrado no trabalho de Castro *et al.* (2021).

3.4.2 Cromatografia gasosa (CG-MS)

Os produtos craqueados foram submetidos a uma triagem estratégica para análise cromatográfica, priorizando amostras que apresentaram variações significativas nos parâmetros críticos do processo, como rendimento de líquido orgânico, perfil de distribuição de frações (gasosa, líquida e residual) e correlação com dados físico-químicos

e espectrométricos. A Tabela 2 ilustra os resultados das análises cromatográficas realizadas nos produtos obtidos.

Tabela 2. Cromatografia gasosa do PCL obtido a 450 °C.

Grupos de produtos	Teor de lama vermelha ativada a 1M e 2M (%)						
	Sem catalisador	5% 1M	15% 1M	20% 1M	5% 2M	15% 2M	20% 2M
Hidrocarbonetos	60,49	56,47	64,34	59,18	64,78	66,8	54,98
Acetilênicos	0,77	0,34	1,63	2,55	1,22	1,53	1,47
Naftênicos	5,26	2,5	4,32	4,3	1,77	3,24	3,29
Aromáticos	0	4,04	6,47	4,5	4,1	3,67	5,04
Olefínicos	26,8	32,17	35,94	27,21	38,22	34,22	28,53
Parafínicos normais	27,66	16,91	15,77	18,21	18,59	22,6	15,93
Parafínicos ramificados	0	0,51	0,21	2,41	0,88	1,52	0,72
Compostos oxigenados	39,51	43,53	35,66	40,82	35,22	33,2	44,85
Ácidos carboxílicos	2,28	7,79	5,27	5,94	10,63	4,34	6,11
Álcoois	16	24,66	21,21	22,16	14,16	15,22	23,75
Aldeídos	0	0	0	0	0	0	0
Cetonas	0,66	2,53	4,15	5,57	3,79	6,66	6,55
Ésteres	20,57	6,73	4,24	5,43	6,08	5,91	5,54
Éteres	0	1,39	0,79	1,72	0,56	0,34	2,9
Outros	0	0,43	0	0	0	0,74	0
Total	100	100	100	100	100	100	100

A Tabela 2 revela que a fração de hidrocarbonetos varia conforme a concentração e a molaridade da lama vermelha ativada. Na LV 1M, o teor sobe de 56,47% (5%) até o pico de 64,34% (15%) e mantém-se em 59,18% (20%), enquanto na LV 2M atinge o máximo de 66,8% (15%) antes de cair para 54,98% (20%). Os olefinicos alcançam 38,22% (5% LV 2M) e os aromáticos 6,47% (15% LV 1M), enquanto os compostos oxigenados diminuem inversamente, atingindo o mínimo de 33,2% com 15% LV 2M. Essa tendência é confirmada pela redução expressiva do teor de ésteres (de 20,57% para 4,24–6,73%) nas amostras catalíticas, corroborando a diminuição da banda C=O observada no FT-IR ($\sim 1700\text{--}1740\text{ cm}^{-1}$) e identificando os ésteres como a classe carbonílica de maior contribuição relativa nessa região para o bio-óleo sem catalisador. Esses resultados evidenciam a ação direta dos sítios catalíticos ácidos de Lewis (Fe^{3+} e Al^{3+}) e Brønsted da lama vermelha ativada com HCl (Ran *et al.*, 2024). Após ativação ácida, esses sítios adsorvem seletivamente moléculas oxigenadas, catalisando reações de descarboxilação (remoção de CO_2), descarbonilação (remoção de CO) e desidrogenação, convertendo ácidos carboxílicos e ésteres em hidrocarbonetos e olefinas de alto valor energético (Ramdhani *et al.*, 2023; Zhang *et al.*, 2024).

Tabela 3. Composição química de hidrocarbonetos presentes nos bio-óleos.

Número de carbonos	Teor de lama vermelha ativada a 1M e 2M (%)						
	Sem catalisador	5% 1M	15% 1M	20% 1M	5% 2M	15% 2M	20% 2M
C5	0	0	0	0	0	0,43	0
C6	0	0	0	0,33	0	0,51	0
C7	0	0	0,87	0	0	0	0,05
C8	10,98	16,82	19,53	8,06	3,55	3,78	10,6
C9	8,88	2,69	4,59	3,49	5,9	5,34	4,11
C10	1,59	0,63	1,95	3,15	1,67	3,24	1,54
C11	1,98	2,85	3,64	5,9	4,86	6,27	2,98
C12	1,95	1,53	1,59	4,2	2,35	3	2,2
C13	2,38	1,02	0,88	0,86	1,18	1,84	0,76
C14	7,2	3,81	4,22	3,38	5,34	5,77	3,14
C15	3,76	1,28	1,74	2,18	1,94	2,53	1,68
C16	0	2,05	2,15	2,37	1,45	1,74	2,57
C17	7,98	2,23	2,42	1,91	0,53	9,57	2,2
C18	2,15	1,17	1,05	0,67	0,96	2,81	0
C19	0	0	1,28	1,48	1,86	2,89	1
C20	0	6,32	8,57	7,48	11,33	5,04	10,15
C21	9,39	8,95	8,4	10,24	18,12	7,73	8,77
C22	0	2,83	0	0,9	2,28	3,2	0
C23	2,25	0,15	0	1,04	0,8	0,26	0,72
C24	0	0,84	0,59	0	0	0	0,36
C26	0	0	0,43	0,34	0	0	0,32
C27	0	0	0	0	0,2	0,53	0
C29	0	0	0	0	0	0	0,29
C32	0	1,3	0,44	1,03	0,46	0,32	1,28
C54	0	0	0	0,17	0	0	0
Σ Hidrocarbonetos	60,49	56,47	64,34	59,18	64,78	66,8	54,98

A distribuição por número de carbonos (Tabela 3) reforça o mecanismo catalítico observado. A LV 1M favorece hidrocarbonetos leves (C₈–C₁₂), com pico de C₈ em 19,53% (15% LV 1M), enquanto a LV 2M aumenta as cadeias mais longas (C₂₀–C₂₁) em baixas concentrações, indicando oligomerização secundária quando os sítios ácidos estão saturados (Hughes *et al.*, 2026). A ativação 1M preserva melhor o equilíbrio de metais ativos, otimizando a seletividade para frações leves, ao passo que a ativação 2M provoca lixiviação excessiva e reduz a eficiência em teores elevados (Chen *et al.*, 2021; Foong *et al.*, 2025).

Embora a condição de 15% LV 1M maximize a fração relativa de hidrocarbonetos (64,34%), a dosagem de 20% LV 1M é superior globalmente, pois oferece rendimento absoluto de hidrocarbonetos ≈ 48,75% (82,37% de líquido × 59,18% de hidrocarbonetos), associado a menor acidez e viscosidade. Estudos recentes de pirólise catalítica de óleos residuais de fritura

com lama vermelha modificada confirmam que dosagens otimizadas de catalisador ácido promovem exatamente essas rotas de desoxigenação e craqueamento seletivo (Li *et al.*, 2022; Su *et al.*, 2022). Assim, o equilíbrio ótimo entre atividade catalítica e estabilidade metálica torna a LV 1M a 20% a condição mais promissora para produção de bio-óleo de qualidade compatível com biocombustíveis (Li *et al.*, 2022; Ramdhani *et al.*, 2023).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A lama vermelha ativada com HCl 1 mol L⁻¹, na dosagem de 20%, apresentou o melhor desempenho no craqueamento termocatalítico do óleo de fritura residual a 450 °C, proporcionando elevado rendimento de bio-óleo, baixa formação de coque e gás, além de redução significativa da acidez e da maior fração de hidrocarbonetos leves e olefinas.

Os resultados indicam que a ativação moderada preserva os sítios catalíticos ácidos de Lewis e Brønsted (Fe³⁺ e Al³⁺), favorecendo reações de desoxigenação, como descarboxilação e descarbonilação, bem como o craqueamento seletivo. Em contrapartida, a ativação em maior molaridade compromete a eficiência catalítica devido à lixiviação excessiva de metais ativos.

Embora a acidez final ainda exija etapas adicionais de refino para atender às especificações da ANP ($\leq 0,5$ mg KOH g⁻¹), o bio-óleo obtido apresenta potencial como precursor de biocombustível. Assim, o estudo contribui para o aproveitamento de resíduos industriais, como o óleo de fritura e a lama vermelha, alinhando-se aos princípios da economia circular e à produção sustentável de energia.

5 AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Termodinâmica aplicada (LABTERMO), situado na Universidade Federal do Amazonas, a Universidade Luterana do Brasil (ULBRA) e a Central de Análises Químicas da Universidade Estadual do Amazonas (UEA) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) por meio do projeto CT&I ÁREAS PRIORITÁRIAS – Edital n.º 010/2021.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, H. S. **Produção de biocombustíveis via craqueamento termocatalítico de resíduos sólidos de caixas de gordura com carbonato de sódio e lama vermelha ativada termicamente**. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução nº 65, de 06 de novembro de 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists**. 15. ed. Champaign, IL: AOAC, 1990.

AMERICAN OIL CHEMISTS' SOCIETY. **Official and Recommended Practices of the AOCS**. 7. ed. Champaign, IL: AOCS, 1997.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specification for Kinematic Glass Viscometers**. ASTM D2515. West Conshohocken, PA: ASTM, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Specifications and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers**. ASTM D446. West Conshohocken, PA: ASTM, 2019.

CASTRO, D. R. de; RIBEIRO, H. da S.; GUERREIRO, L. H.; BERNAR, L. P.; BREMER, S. J.; SANTO, M. C. *et al.* Production of fuel-like fractions by fractional distillation of bio-oil from açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) seeds pyrolysis. **Energies**, [S.l.], v. 14, n. 13, p. 3713, 22 jun. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en14133713>.

CHEN, D.; GAO, D.; HUANG, S.; CAPAREDA, S. C.; LIU, X.; WANG, Y. *et al.* Influence of acid-washed pretreatment on the pyrolysis of corn straw: a study on characteristics, kinetics and bio-oil composition. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S.l.], v. 155, p. 105027, maio 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105027>.

CHEN, Z.; WANG, D.; YANG, H.; ZHANG, Y.; LI, Y.; LI, C. *et al.* Novel application of red mud as disposal catalyst for pyrolysis and gasification of coal. **Carbon Resources Conversion**, [S.L.], v. 4, p. 10-18, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.crcon.2021.01.001>.

COELHO, F. de L. L.; SANTOS, I. O.; PAIXÃO, D. C.; LHAMAS, D. E. L.; RODRIGUES, G.; SUFFREDINI, D. F. P. *et al.* Produção de biodiesel de óleo de fritura residual em um módulo didático de biodiesel. **Brazilian Journal of Development, Curitiba**, v. 6, n. 5, p. 28844-28851, 1 maio 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n5-363>.

DIRANE, Í. R.; CASTRO, D. A. R. de; SANTOS, W. G. dos. Bio-oil from residual frying oil: influence of the 1m hcl red mud catalyst on process performance. **Journal of Agricultural Sciences Research**, [S.l.], v. 3, n. 17, p. 2-8, 20 out. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.22533/at.ed.9733172320108>.

FOONG, S. Y.; AI, F.; SUTRADHAR, S.; KEW, S. Y. N.; DULAING, G.; LIEW, R. K. *et al.* A review on pyrolytic valorization of red mud: emerging roles in magnetic biochar synthesis, bio-oil upgrading, and sustainable catalysis. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 526, p. 171023, dez. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2025>.

GLEVITZKY, M.; CORCHES, M.-T.; ȘERBAN, S. G.; STRUGARIU, M.-L.; KISS, I.; VICĂ, M. L. Sustainable Recycling of Used Cooking Oils Through the Production of Biodegradable Antimicrobial Soaps. **Applied Sciences**, [S.L.], v. 15, n. 21, p. 11472, 27 out. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app152111472>.

HUGHES, J.; HART, A.; DAS, B.; WOOD, J. Advances in the Application of Low-Cost, Natural Materials, and Waste-Derived Catalysts for Catalytic Upgrading of Plastic and Biomass Pyrolysis Oil. **Energy & Fuels**, [S.L.], v. 40, n. 5, p. 2338-2371, 22 jan. 2026. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5c05623>.

IEA BIOENERGY. **Implementation of bioenergy in Brazil – 2021 update**. 2021. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/11/CountryReport2021_Brazil_final.pdf. Acesso em: 29 mar. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Glass Capillary Kinematic Viscometers – Specifications and Operating Instructions**. ISO 3105. Geneva: ISO, 1994.

LI, P.; SHI, X.; JIANG, L.; WANG, X.; SONG, J.; FANG, S. *et al.* Synergistic enhancement of bio-oil quality through hydrochloric or acetic acid-washing pretreatment and catalytic fast pyrolysis of biomass. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v. 187, p. 115474, 1 nov. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115474>.

LI, X.; HUANG, Z.; SHAO, S.; CAI, Y. Catalytic pyrolysis of biomass to produce aromatic hydrocarbons in a cascade dual-catalyst system: design of red mud based catalyst assisted by the analysis of variance. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 404, p. 136849, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136849>.

MANCIO, A. A.; COSTA, K. M. B. da; FERREIRA, C. C.; SANTOS, M. C.; LHAMAS, D. E. L.; MOTA, S. A. P. da *et al.* Process analysis of physicochemical properties and chemical composition of organic liquid products obtained by thermochemical conversion of palm oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S.l.], v. 123, p. 284-295, jan. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2016.11.017>.

MANCIO, A. de A. **Produção, fracionamento e desacidificação de biocombustíveis obtidos via craqueamento térmico catalítico de óleos vegetais**. 2015. 324 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

MARDIAH, M.; SAMADHI, T. W.; WULANDARI, W.; AQSHA, A.; SITUMORANG, Y. A.; INDARTO, A. Recent Progress on Catalytic of Rosin Esterification Using Different Agents of Reactant. **Agriengineering**, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 2155-2169, 9 nov. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/agriengineering5040132>.

MOUSAVI, S.; DAMIZIA, M.; BRACCIALE, M. P.; HAMIDI, R.; MUSIVAND, S.; FILIPPIS, P. de. *et al.* Modified red mud catalysts for enhanced bio-crude yield and metal retention in hydrothermal liquefaction of oak wood. **Waste Management**, [S.L.], v. 211, p. 115300, jan. 2026. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115300>.

NASCIMENTO, J. P. do; SILVA, G. H. B. da; PEREIRA, A. M.; SOUZA, L. do S. S. de; CASTRO, D. A. R. de; JUNIOR, S. D. *et al.* Beneficiamento do óleo residual de fritura para produção de biocombustível catalisado com lama vermelha. **Scientia Amazonia**,

Manaus, v. 10, n. 1, p. 10-22, set. 2021. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/354328921_Beneficiamento_do_oleo_residual_de_fritura_para_producao_de_biocombustivel_catalisado_com_lama_vermelha. Acesso em: 11 maio 2025.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **NIST20 Mass Spectral Library 2020**. Gaithersburg, MD: NIST, 2020.

OLIVEIRA, R. M. de. **Produção de biocombustíveis um craqueamento termo-catalítico de gordura residual com lama vermelha ativada quimicamente como catalisador**. 2019. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

OLIVEIRA, R. M. de; RODRIGUES, E. C.; CARDOSO, D. N. P.; SANTOS, W. G.; MACHADO, N. T. Thermocatalytic cracking of fat from fat boxes with activated red mud. **Brazilian Journal of Development**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 19876-19887, abr. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n4-237>.

ORIGINLAB CORPORATION. **Origin**. Version 8.0. Northampton, MA: OriginLab Corporation, 2007.

PARVARI, E.; MAHAJAN, D.; HEWITT, E. L. A Review of Biomass Pyrolysis for Production of Fuels: chemistry, processing, and techno-economic analysis. **Biomass**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 54, 9 set. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/biomass5030054>.

PEREIRA, L.; CASTILLO, V.; CALERO, M.; BLÁZQUEZ, G.; SOLÍS, R. R.; MARTÍN-LARA, M. A. Conversion of char from pyrolysis of plastic wastes into alternative activated carbons for heavy metal removal. **Environmental Research**, [S.L.], v. 250, p. 118558, jun. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2024.118558>.

RAMDHANI, E. P.; SANTOSO, E.; HOLILAH, H.; NUGRAHA, R. E.; BAHRUJI, H.; SUPRAPTO, S. *et al.* Direct synthesis of Fe-aluminosilicates from red mud for catalytic deoxygenation of waste cooking oil. **Rsc Advances**, [S.L.], v. 13, n. 45, p. 31989-31999, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra05910c>.

RAN, L.; ZHANG, X.; LIU, Z.; ZHANG, A.; QI, S.; HUANG, X. *et al.* Optimized production of aromatic hydrocarbons via corn stover pyrolysis: utilizing high-density polyethylene as a hydrogen donor and red mud as a catalyst. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [S.L.], v. 182, p. 106713, set. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106713>.

SANTOS, W. G. dos. **Craqueamento térmico catalítico de pneus inservíveis**. 2019. 238 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

SHEHHI, A. A.; SOUISSI, Y.; NAIR, A. S.; USMANI, Z.; SHARMA, M.; SIVAKUMAR, N. Microbial lipid-based biodiesel production using wastewater: opportunities and

challenges. **Bioresources And Bioprocessing**, [S.L.], v. 12, n. 1, p. 1-25, 4 jul. 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40643-025-00897-2>.

SHIMADZU CORPORATION. **LabSolutions IR: Software for FT-IR Analysis**. Version 3.0. Kyoto: Shimadzu, 2022.

SOUZA FILHO, E. A. de; MACHADO, N. T.; DUVOISIN JUNIOR, S.; CASTRO, D. A. R. de. Craqueamento termocatalítico de óleo de fritura utilizando carbonato de sódio/níquel para produção de biocombustíveis. **Brazilian Journal of Development**, [S.l.], v. 9, n. 8, p. 23708-23723, 8 ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv9n8-039>.

SU, G.; ONG, H. C.; MOFIJUR, M.; MAHLIA, T. M. I.; OK, Y. S. Pyrolysis of waste oils for the production of biofuels: a critical review. **Journal of Hazardous Materials**, [S.l.], v. 424, p. 127396, 15 fev. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127396>.

SUHERMAN, S.; ABDULLAH, I.; SABRI, M.; SILITONGA, A. S. Evaluation of Physicochemical Properties Composite Biodiesel from Waste Cooking Oil and Schleicher oleosa Oil. **Energies**, [S.l.], v. 16, n. 15, p. 5771, 2 ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/en16155771>.

VUKOVIĆ, J.; PERUŠIĆ, M.; STOPIĆ, S.; KOSTIĆ, D.; SMILJANIĆ, S.; FILIPOVIĆ, R. *et al.* A review of the red mud utilization possibilities. **Ovidius University Annals of Chemistry**, v. 35, n. 2, p. 165-173, 1 jul. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/auoc-2024-0021>.

YANG, Y.; XIAO, P.; WEN, M.; LIU, T.; YANG, J.; DAI, S. *et al.* A review on the modified red mud for biomass catalytic pyrolysis: preparation, mechanisms and perspectives. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, [S.L.], v. 178, p. 106430, mar. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106430>.

ZHANG, Y.; WANG, Y.; CUI, H.; WANG, F.; LI, Z.; SUN, C. *et al.* Co-pyrolysis of biomass with Red Mud: an efficient approach to improving bio-oil quality and resourceful utilization of the iron in red mud. **Fuel**, [S.l.], v. 355, p. 129482, 1 jan. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129482>.