

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

PERSPECTIVAS DE CONVERSÃO DE ÓLEO RESIDUAL EM FONTES DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA NARRATIVA SOBRE CARACTERÍSTICAS, PRODUÇÃO, PIRÓLISE E BIO-ÓLEO

PERSPECTIVES ON CONVERSION OF WASTE OIL INTO ENERGY SOURCES: A NARRATIVE BIBLIOGRAPHICAL REVIEW ON CHARACTERISTICS, PRODUCTION, PYROLYSIS AND BIO-OIL

Recibido el 3 de febrero de 2024. Aceptado el 11 de octubre de 2024

Abstract

Seeking to reduce the environmental impacts caused by residual frying oil, various strategies are being investigated to convert this waste into a usable form of energy. The present work seeks to carry out a narrative bibliographic review on possibilities for converting waste oil into energy sources, emphasizing the study of its characteristics, production processes, the application of pyrolysis in this context and the subsequent use of bio-oil as a raw material renewable. For this study, the search keywords "residual frying oil", "pyrolysis" and "bio-oil" were used in search bases such as Science direct and google academic. The literature review offers a comprehensive and critical view of these topics, consolidating relevant information on the conversion of this waste into some type of energy source, from obtaining residual oil to the practical applications of bio-oil resulting from pyrolysis. Through this study and bibliographical survey, it is possible to verify the importance of correctly disposing of waste oil, in addition to the potential of the approaches discussed for the energy recovery of waste oil, as well as future directions for research in this promising field.

Keywords: sustainability, reuse, biofuel.

¹ Universidade Federal do Tocantins, Campus Palmas, Brasil.

² Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

⁴ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Brasil.

*Autor correspondente: Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos Sustentabilidade Energética, Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia do Tocantins, Palmas –Tocantins, Brasil. 310 Sul, Av. LO 5, s/n -Plano Diretor Sul, Palmas –TO. CEP: 77021-090. Email: mendes@iftto.edu.br

Resumo

Buscando reduzir os impactos ambientais causados pelo óleo de fritura residual, diversas estratégias estão sendo investigadas para transformar esse resíduo em uma forma de energia utilizável. O presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica narrativa sobre possibilidades de conversão de óleo residual em fontes de energia, destacando o estudo de suas características, processos de produção, a aplicação da pirólise nesse contexto e o uso subsequente do bio-óleo como matéria-prima renovável. Para este estudo foram utilizadas as palavras-chave de busca “óleo de fritura residual”, “pirólise” e “bio-óleo” nas bases de busca como Science direct e google acadêmico. A revisão bibliográfica oferece uma visão abrangente e crítica desses temas, consolidando informações relevantes sobre a conversão deste resíduo em algum tipo de fonte de energia, desde a obtenção de óleo residual até as aplicações práticas do bio-óleo resultante da pirólise. Através destes estudo e levantamento bibliográfico é possível constatar a importância do descarte correto do óleo residual, além do potencial das abordagens discutidas para a valorização energética de óleo residual, bem como as direções futuras para pesquisa nesse campo promissor.

Palavras-chave: sustentabilidade, reutilização, biocombustível.

Introdução

A quantidade crescente de óleo residual proveniente do ramo alimentício, proveniente sobretudo das atividades industriais e domésticas, destaca-se como um desafio significativo para a gestão ambiental e a sustentabilidade (Li *et al.*, 2016). Com o aumento constante na produção e consumo de alimentos fritos, bem como a utilização extensiva de óleos em processos industriais, a problemática associada ao óleo residual tem se tornado uma preocupação ambiental global. O descarte inadequado desse resíduo acarreta em impactos adversos, como a contaminação do solo, água e ecossistemas, além de representar uma ameaça à saúde pública.

Esta revisão bibliográfica narrativa busca explorar as diversas possibilidades e desafios envolvidos no processo de pirólise deste resíduo, analisando as características do óleo residual, os princípios da pirólise e as aplicações potenciais do bio-óleo resultante, contribuindo assim para a consolidação do conhecimento e na implementação de soluções sustentáveis para a gestão do óleo residual.

Dentro desse contexto sobre as perspectivas de conversão de óleo residual em fontes de energia, a análise global dos 10 principais países que utilizam biocombustíveis emerge como um componente importante a ser citado. Essa visão ampla não apenas contextualiza a conversão de óleo residual dentro das discussões sobre energia sustentável, mas também demonstra o interesse acerca da pesquisa e reutilização de forma mais consciente do óleo residual de fritura por estes países destacados (Figura 1).

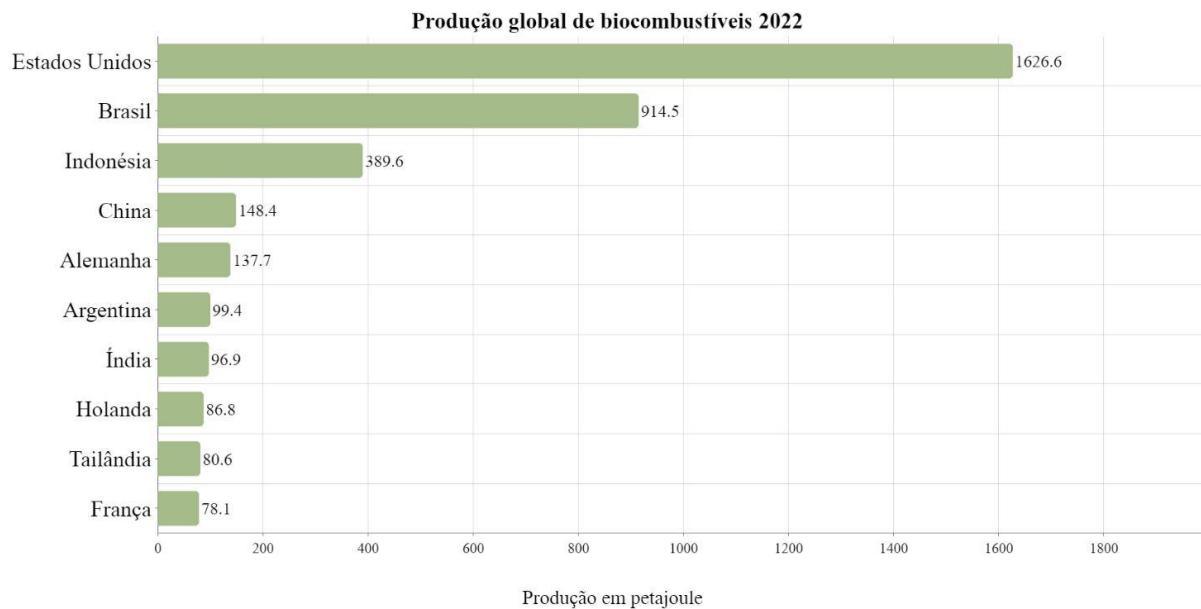


Figura 1. Produção global de biocombustíveis em 2022. *Fonte: El-Araby (2024)*

Os Estados Unidos lideraram a produção mundial de biocombustíveis em 2022, alcançando 1.627 petajoules. Em seguida, o Brasil e a Indonésia ocuparam o segundo e terceiro lugares, com aproximadamente 915 e 390 petajoules, respectivamente. Enquanto isso, a Alemanha produziu cerca de 138 petajoules no mesmo ano, situando-se entre os cinco principais países produtores de biocombustíveis e sendo o líder na Europa (El-Araby, 2024).

A produção de biocombustíveis nos Estados Unidos é significativa, representando quase 38% da produção global em 2022. O país destaca-se principalmente na produção de biodiesel, atingindo 1.64 bilhão de galões naquele ano. Ao longo do tempo, a produção global de biocombustíveis tem crescido gradualmente, passando de 180 mil barris de petróleo equivalente por dia em 2000 para 1.9 milhões de barris de petróleo equivalente por dia em 2022 (El-Araby, 2024).

A rápida deterioração do meio ambiente, bem como o esgotamento dos combustíveis fósseis, tem atraído pesquisadores em todo o mundo para se concentrar no estudo da pirólise rápida de óleo de fritura residual para combustíveis a base de hidrocarbonetos. Esse tipo de material tem uma recuperação anual de 45.6 milhões de toneladas em escala global. O óleo de fritura pode contribuir com graves danos ao meio ambiente se for manuseado de forma inadequada. No entanto, pode ser convertido em combustíveis líquidos de alta qualidade, uma vez utilizado e desenvolvido de forma eficaz (Pires *et al.*, 2019).

Nesse cenário desafiador, a necessidade de alternativas sustentáveis para a gestão do óleo residual torna-se imperativa. Práticas tradicionais de descarte, como o despejo em sistemas de esgoto ou aterros sanitários, são insuficientes e frequentemente contribuem para problemas ambientais persistentes (Chhetri *et al.*, 2008). A busca por abordagens inovadoras e ecoeficientes para lidar com esse resíduo intensifica-se à medida que a conscientização sobre os impactos ambientais e a escassez de recursos naturais cresce.

Diante desse contexto desafiador, a conversão do óleo residual em fontes de energia sustentáveis emerge como uma alternativa promissora. A utilização de técnicas como a pirólise, que transforma o óleo residual em bio-óleo, representa um caminho potencial para mitigar os impactos negativos associados à gestão inadequada desse resíduo (Demirbas *et al.*, 2017).

A literatura científica ressalta a relevância dessa abordagem, destacando a importância de explorar tecnologias e práticas que possam contribuir para uma gestão mais eficiente e ecoeficiente desses resíduos. Um estudo realizado por (Li *et al.*, 2016) evidencia a necessidade de estratégias abrangentes para a utilização do óleo residual, indicando que a gestão inadequada desse resíduo pode resultar em sérios riscos ambientais. Além disso, Chhetri *et al.* (2008) apontam para a viabilidade do uso de óleo residual como alternativa para a produção de biodiesel, sublinhando a importância de explorar fontes renováveis para a produção de energia.

O óleo de cozinha residual é um óleo gerado após o processo de fritura em cozinhas, podendo ser de grande escala como restaurantes ou pequena escala de produção como a escala residencial. O óleo de fritura consiste de triglicerídeos (> 90%) e ácidos graxos, e contaminada por alguns derivativos, como os resíduos dos alimentos obtidos durante o processo de fritura. O consumo de alimentos fritos produz uma grande quantidade de óleos, classificados como resíduos sólidos com alto potencial de poluição. Mensalmente, mais de 200 milhões de litros de óleos vegetais usados são descartados em rios e lagos, causando sérios danos ao meio ambiente. Nas áreas mais densamente povoadas do Brasil, o óleo é o principal contaminante das águas doces e salgadas. (Daud *et al.*, 2015).

Assim como citado anteriormente, dentre os diversos produtos que apresentam dificuldade de degradação ambiental, destacam-se os óleos e as gorduras, como o azeite, o óleo vegetal e a banha. Essas substâncias não se dissolvem nem se misturam com a água, formando uma camada densa na superfície que bloqueia as trocas gasosas e a oxigenação, prejudicando rios, lagos e aquíferos. As gorduras também afetam negativamente o tratamento de esgotos, causando obstrução nas tubulações. Quando a rede fica entupida, os esgotos podem infiltrar-se no solo, contaminando o lençol freático, ou alcançar a superfície. Para remover o óleo e desobstruir as tubulações, são utilizados produtos químicos altamente tóxicos, perpetuando um ciclo prejudicial. Além de causar danos irreversíveis ao meio ambiente, essa prática é ilegal e passível de punição. (Silva *et al.*, 2020).

Portanto, estudar a aplicação do processo de pirólise no óleo de fritura residual surge como uma alternativa valiosa para reutilizar e agregar valor a esse resíduo, convertendo-o em matéria-prima para novos processos. A grande importância dessa pesquisa está associada aos aspectos de ordem ambiental, com a disposição e/ou aproveitamento adequado do óleo de fritura, como também ao aspecto econômico, com a questão da geração de novas fontes energéticas no Brasil.

Características e produção de óleo residual

Dentre os vários óleos residuais, os triglicerídeos derivados de óleos vegetais são amplamente reconhecidos como as matérias-primas ideais para a produção de bio-óleo. Ácidos graxos derivados de várias substâncias têm diferentes comprimentos de cadeia carbônica, geralmente contendo 12 a 22 átomos de carbono, particularmente C₁₈, e têm diferentes graus de insaturação, conforme Tabela 1 (Bränström, *et al.*, 2018).

Tabela 1. Principais ácidos graxos de óleos vegetais

Estrutura Química	Nome	Fórmula Abreviada
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₀ -CH ₃	Ácido láurico	C12:0
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₂ -CH ₃	Ácido mistírico	C14:0
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₄ -CH ₃	Ácido palmítico	C16:0
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₅ -CH ₃	Ácido margárico	C17:0
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₆ -CH ₃	Ácido esteárico	C18:0
HO ₂ C-(CH ₂) ₇ -CH=CH-(CH ₂) ₅ -CH ₃	Ácido palmitenoico	C16:1
HO ₂ C-(CH ₂) ₇ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH	Ácido oléico	C18:1
HO ₂ C-(CH ₂) ₁₁ -CH=CH-(CH ₂) ₇ -CH ₃	Ácido erúcico	C22:1
HO ₂ C-(CH ₂) ₇ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-(CH ₂) ₄ -CH ₃	Ácido linoléico	C18:2
HO ₂ C-(CH ₂) ₇ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-CH ₂ -CH ₃	Ácido linolênico	C18:3
HO ₂ C-(CH ₂) ₇ -CH=CH-CH ₂ -CH(OH)-(CH ₂) ₅ -CH ₃	Ácido ricinoléico	12-OH C18:1

Fonte: Bränström *et al.* (2018)

Segundo os dados mais recentes divulgados pela Associação das Indústrias Brasileiras de Óleos Vegetais (ABIOVE), o ano de 2021 registrou o maior volume de óleo de fritura usado como matéria-prima para a fabricação do biodiesel, quase 114 mil m³, no ano todo. Isso corresponde a 2% de todas as matérias-primas usadas na fabricação desse biocombustível. Segundo a ABIOVE, o Brasil produziu mais de 9 milhões de toneladas de óleo de soja em 2020. Para 2021, estima-se que o consumo interno ultrapasse 8 milhões de toneladas, representando um aumento de 56% nas vendas em relação à última década. (Antonic *et al.*, 2021).

O consumo de alimentos fritos está crescendo rapidamente, exigindo estratégias eficazes para a gestão dos resíduos sólidos gerados. Empresas de saneamento alertam sobre os danos causados pelo descarte de óleos em pias e ralos. A presença de óleo na água resulta na formação de aglomerados que obstruem tubulações e prejudicam significativamente as estações de tratamento. Esse problema também reduz a concentração de oxigênio dissolvido nos corpos d'água, aumenta a carga orgânica e gera metano devido à degradação anaeróbia. Além disso, os resíduos gordurosos nos esgotos atraem animais como ratos e baratas, que são vetores de doenças para os seres humanos. (Zhang *et al.*, 2020).

Atualmente, muitos interesses de pesquisa são obtidos na utilização de resíduos de óleo frito para produzir biodiesel, sabão, surfactante e assim por diante. Entre eles, o uso de óleo de fritura como matéria-prima para preparar sabão é uma solução promissora e econômica, além de ser uma solução sustentável para reduzir a poluição ambiental, bem como problemas de saúde e segurança associados ao descarte de óleo de fritura. Assim como o reuso do óleo de fritura para a fabricação de biocombustível o uso dele como matéria-prima para preparar sabão também é uma solução muito utilizada pelas características promissoras e econômicas, além de ser uma solução sustentável para reduzir a poluição ambiental, bem como problemas de saúde e segurança associados ao descarte de óleo de fritura (Cheng *et al.*, 2024).

Com o contínuo desenvolvimento de todo o social e o aumento do número da população, a demanda por energia cresce vertiginosamente, principalmente por combustíveis fósseis. Além disso, a grande quantidade de CO₂, SO₂ e NO_x produzidos durante o consumo de combustível fóssil, causam grandes danos ao meio ambiente. Portanto, a substituição de recursos fósseis por recursos renováveis tornou-se indispensável. Nos últimos anos, muitos estudos foram feitos sobre a produção de biocombustíveis a partir de óleo residual ou de gordura animal, devido à ausência de enxofre, nitrogênio e metais pesados (Wang *et al.*, 2019).

Pirólise de óleo de residual

A pirólise é um processo de decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou em um ambiente com uma quantidade mínima de oxigênio para evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. Esse processo geralmente ocorre em temperaturas que variam de 400 °C até o início da gaseificação. (Fonts *et al.*, 2012).

A pirólise é uma importante forma de conversão térmica de biomassa para produzir bio-óleo com alta velocidade e alta eficiência, que é considerada uma tecnologia muito promissora na futura biorrefinaria. A pirólise térmica é uma alternativa atraente ao biocombustível verde e ajuda a reduzir os impactos ambientais (Wang *et al.*, 2019).

O processo de pirólise da biomassa tem sido amplamente estudado e aplicado devido às suas inúmeras vantagens, dentre elas a capacidade de obter produtos de alto valor agregado como carvão de biomassa, bio-óleo, gás combustível e alta eficiência de conversão energética. Além dessas vantagens é possível destacar que se torna um destino ambientalmente correto, evitando os descartes em rios ou aquíferos. Quando feitos desta forma causa tremendos impactos ambientais negativos (Cai *et al.*, 2024). No Quadro 1 é possível verificar as principais vantagens e desvantagens do processo de pirolise de óleo residual de fritura, Esses pontos destacam a complexidade e o potencial do processo de pirólise na gestão sustentável do óleo residual de fritura, evidenciando a importância de estudos e abordagens que maximizem estes benefícios e minimizem os desafios de todo o processo.

Quadro 1. Vantagens e desvantagens do processo de pirólise

Vantagens	Desvantagens
<u>Alta Densidade Energética:</u> O bio-óleo gerado pelo processo de pirólise tem uma densidade energética elevada, o que o torna uma opção competitiva em relação aos combustíveis fósseis.	<u>Custo de Implementação:</u> A instalação e operação de unidades de pirólise podem ser dispendiosas, o que pode ser um desafio para pequenas empresas e municípios.
<u>Diversidade de Produtos:</u> A pirólise possibilita a produção simultânea de diversos produtos valiosos, incluindo carvão de biomassa, gás combustível e bio-óleo.	<u>Requisitos Tecnológicos:</u> Operar o processo de maneira eficiente e segura exige tecnologia avançada e conhecimento técnico especializado.
<u>Alta Eficiência de Conversão Energética:</u> Este processo é altamente eficiente na transformação da energia presente no óleo residual em formas de energia utilizáveis.	<u>Qualidade Variável do Bio-óleo:</u> A qualidade do bio-óleo pode variar conforme as condições do processo, como temperatura e tipo de biomassa utilizada.
<u>Flexibilidade de Matéria-Prima:</u> Além do óleo de fritura, a pirólise pode ser aplicada a diferentes tipos de biomassa, evidenciando sua versatilidade e capacidade de otimizar os rendimentos de produtos.	<u>Estabilidade do Bio-óleo:</u> O bio-óleo pode ser quimicamente instável, necessitando de tratamentos adicionais para seu uso como combustível.
<u>Redução de Impacto Ambiental:</u> A pirólise contribui para a prevenção da contaminação de água e solo que resulta do descarte inadequado do óleo de cozinha.	<u>Emissões de Gases:</u> Embora seja uma alternativa mais limpa, a pirólise ainda pode gerar gases poluentes, exigindo sistemas de controle de emissões.
<u>Sustentabilidade:</u> Este processo apoia a economia circular, transformando resíduos em recursos valiosos.	<u>Resíduos Sólidos:</u> A produção de carvão de biomassa e outros resíduos sólidos requer um manejo adequado para evitar impactos ambientais.

Fonte: Autores (2024)

Existem dois tipos principais de processos de pirólise: a pirólise lenta (convencional) e a pirólise rápida. Esses processos diferem em variáveis como a taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência das fases sólida e gasosa, e os produtos desejados. Com base nessas variáveis, a pirólise é subdividida em várias categorias: (1) carbonização; (2) pirólise convencional; (3) pirólise

rápida; (4) flash-líquido; (5) flash-gás; (6) pirólise ultra; (7) pirólise a vácuo; (8) hidro-pirólise; e (9) metano-pirólise, conforme detalhado na Tabela 2. (Vieira *et al.*, 2009).

Tabela 2. Variantes do Processo de Pirólise

Variantes do processo	Tempo de Residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
(1) Carbonização	Horas/días	400 – 450	carvão vegetal
(2) convencional	5 – 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
(3) rápida	0.5 – 5 seg	500 – 550	bio-óleo
(4) flash-líquido	< 1 seg	< 650	bio-óleo
(5) flash-gás	< 1 seg	> 650	gás combustível
(6) Vácuo	2 – 30 seg	400	bio-óleo
(7) metano-pirólise	< 10 seg	>700	produtos químicos
(8) hidro-pirólise	< 10 seg	<500	bio-óleo e produtos químicos

Fonte: Vieira *et al.* (2009)

Nos processos de pirólise convencional, a pirólise lenta é focada na fabricação de carvão. Em contraste, a pirólise rápida é uma técnica mais sofisticada que, ao ajustar os parâmetros de operação, possibilita a produção substancial de bio-óleo. Esse processo geralmente ocorre em temperaturas que variam de 550 °C a 650 °C. (Oasmaa *et al.*, 2015).

Durante o processo de pirólise, os produtos resultantes - gases, líquidos e sólidos - são gerados em proporções variadas, dependendo de diversos parâmetros, como a temperatura final, pressão no reator, tempo de residência das fases, tempo e taxa de aquecimento das partículas de biomassa, ambiente gasoso e propriedades iniciais da biomassa. O objetivo primordial da pirólise é obter produtos com densidade energética superior e propriedades aprimoradas em relação à biomassa original. Esses produtos podem ser utilizados para alimentar o próprio processo energético ou comercializados como commodities químicas ou combustíveis (Pedroza *et al.*, 2022).

Durante a pirólise da biomassa, os principais produtos são o bio-óleo (na forma líquida), o carvão sólido e a fração gasosa. Devido ao seu potencial energético, esses materiais têm uma variedade de aplicações potenciais (Vieira *et al.*, 2009).

Bio-óleo

O bio-óleo é composto por uma variedade de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, além de mais de 200 compostos identificados, oferecendo um alto valor energético. Os compostos do bio-óleo abrangem n-alcanos e 1-alcenos com números de carbono entre C11 e C31, hidrocarbonetos

monoaromáticos como benzeno, tolueno, estireno, fenol, 1H-indeno e seus derivados alquilados, compostos aromáticos com nitrogênio e oxigênio, nitrilas alifáticas e aromáticas, ácidos carboxílicos, amidas de cadeia longa e esteroides, bem como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) (Bridgwater, 2012).

O bio-óleo pode ser utilizado como óleo combustível em caldeiras para geração de calor, substituindo o fenol petroquímico, ou pode ser refinado para produzir derivados químicos de maior valor, entre outras aplicações (Pedroza *et al.*, 2022).

Wang *et al.* (2020) estudaram a pirólise de compostos, incluindo sabão de óleo vegetal, estearato de sódio (C18), palmitato de sódio (C16), oleato de sódio (C18:1) e linoleato de sódio (C18:2). Os efeitos da temperatura de pirólise, catalisador HZSM-5, grau de insaturação e comprimento da cadeia carbônica na formação de hidrocarbonetos aromáticos foram explorados. Os resultados experimentais indicaram que o teor relativo de compostos oxigenados diminuiu significativamente nos compostos orgânicos condensáveis da pirólise de borra de sabão, e os hidrocarbonetos aromáticos aumentaram quando o catalisador HZSM-5 foi usado, no qual tolueno e xileno tiveram a maior seletividade relativa. A alta temperatura de pirólise catalítica foi benéfica para a seletividade relativa de benzeno e tolueno, mas inibiu a seletividade relativa de xileno e etilbenzeno. O aumento da saturação de sais de ácidos graxos promoveu a reação para a produção de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, que eram uma espécie de precursor típico da desativação de catalisadores de coque e poluentes carcinogênicos.

Xu *et al.* (2015) investigaram sobre a pirólise de óleo vegetal acidificado, visando melhorar a qualidade do óleo para uso combustível. A temperatura de decomposição do óleo vegetal acidificado estava na faixa de 300°C-500°C em 10K/min de acordo com TG-DTG. Os resultados de Py-GC-MS mostraram que, exceto alcano, alceno e composto contendo oxigênio, derivados de esteróis vegetais também foram detectados. Os resultados do ESI FT-ICR MS mostraram a presença de alguns produtos produzidos a partir da reação de hidrogenação e polimerização ocorrida no processo de pirólise. O rendimento do produto líquido atingiu o máximo de 90% a 500°C. O valor ácido e a viscosidade dos produtos de pirólise foram relativamente altos em comparação com o óleo diesel. O poder calorífico não tem diferença com o do óleo diesel. De acordo com os experimentos realizados, foi confirmado que os componentes de pirólise e as características do óleo vegetal acidificado eram diferentes do óleo vegetal ou do ácido graxo. O óleo vegetal acidificado foi uma fonte potencial renovável para a obtenção de biocombustível pelo método de pirólise, evidenciando o benefício do processo.

Em 1947, pesquisadores realizaram estudos exploratórios sobre a pirólise de óleos residuais e obtiveram combustíveis renováveis com propriedades semelhantes ao óleo diesel, o que tem atraído a atenção de pesquisadores em todo o mundo. Idem *et al.* (1996) mostram o esquema de

reação proposto para o craqueamento térmico do óleo de canola em vários produtos contendo hidrocarbonetos oxigenados pesados, monóxido de carbono e dióxido de carbono, gases hidrocarbonetos de cadeia linear e ramificada C1-C5, álcoois e éter dimetílico, gases hidrocarbonetos diolefínicos, cílicos e acetilênicos, Hidrocarbonetos alifáticos C6+, hidrocarbonetos aromáticos, hidrocarbonetos pesados, coque e hidrogênio, que forneceram uma base teórica para o craqueamento de óleo natural que contém uma mistura de ácidos graxos saturados e insaturados na molécula de triglicerídeos.

Nigam e Singh (2011) fazem a sugestão de quatro métodos para a conversão de resíduos de óleo fritura para a conversão de combustível de alta qualidade. São eles a microemulsificação, diluição, transesterificação e pirólise. Embora a diluição e as microemulsões reduzam a viscosidade, vários problemas relacionados ao desempenho do motor em que o biodiesel são aplicados são comumente detectados (Singh; Singh, 2010). Essas dificuldades com a diluição e as microemulsões incentivam fortemente o uso de métodos de transesterificação e pirólise.

A transesterificação é a conversão química da molécula de óleo, com álcool na presença de um catalisador, e tem o biodiesel com glicerol como subproduto. Este processo é interessante porque biodiesel produzido poderia ser usado como combustível alternativo. No entanto, a transesterificação tem vários inconvenientes, tais como o consumo excessivo de álcool, os equipamentos pesados para escala industrial, a variação do índice de acidez, o teor de sólidos e a purificação do biodiesel deixam esse processo não tão eficiente (Demirbas, 2008).

Assim, a técnica da pirólise é apontada como uma promissora solução para os resíduos de óleo de cozinha. Esta conversão termoquímica é caracterizada como um processo eficiente para obter produtos valiosos adequados para a produção de biocombustíveis. Em particular, o processo de pirólise tem a vantagem de produzem três produtos de significativo valor econômico: o óleo pirolítico ou bio-óleo, o gás de síntese e o biocarvão (Kraiem *et al.*, 2017).

Lima *et al.* (2004) estudaram a pirólise de óleos de mamona, palmeira e soja de 350 a 400 °C. A caracterização pirolítica do óleo indicou a presença de aldeídos, olefinas, parafinas e ácidos carboxílicos. A destilação acima de 200 °C geraram biocombustíveis com propriedades semelhantes aos combustíveis de petróleo. Fortes e Baugh, (2004) estudaram os efeitos de temperatura a 700 e 800 °C, e tempo, com 5, 10, 20 e 30 segundos, na composição do óleo pirolisado e o rendimento durante a pirólise de óleos vegetais da macaúba. Os óleos estudados sofrem uma pirólise parcial em vários graus, produzindo um significativo rendimento de alcenos, ácido carboxílico, álcoois, alcadienos e aldeídos. Wiggers *et al.* (2009) investigaram a pirólise rápida do óleo de soja á 450 a 600 °C. e a caracterização usando GC/MS, GC-FID e destilação TPB mostrou que o bio-óleo obtido continha vários compostos encontrados no diesel e gasolina.

A pirólise de diferentes triglicerídeos foi utilizada para abastecimento de combustível em diferentes países durante a Primeira e Segunda Guerras Mundiais, os óleos vegetais puros eram utilizados nos motores do ciclo diesel. (GUERRA; FUCHS, 2010).

Os hidrocarbonetos derivados foram empregados como matéria-prima na fabricação de gasolina e um combustível similar ao diesel, utilizando um sistema de craqueamento semelhante aos processos empregados na indústria petrolífera contemporânea. Sobre essas possíveis alternativas, Jalil (2002) destaca os plásticos, já Nerín *et al.* (2000) citam os óleos residuais industriais e automotivos, Vitolo *et al.* (2001) com os óleos de pirólise de madeira, gorduras residuais e óleos vegetais, foram propostos como matéria-prima de pirólise para produzir gasolina e diesel como combustíveis (IDEM *et al.*, 1996).

O processo de craqueamento térmico direto do óleo de soja em um equipamento de destilação foi investigado, com a caracterização das propriedades combustíveis das frações do produto líquido. Verificou-se que esse produto exibe baixa viscosidade e alto índice de cetano em comparação com o óleo de soja vegetal puro. O número de cetano do óleo de soja pirolisado aumentou de 37.9 para 43, enquanto a viscosidade diminuiu de 32.6 para 10.2 cSt a 38 °C, embora ainda exceda o valor especificado de 7.5 cSt para o óleo diesel. Apesar de conter cerca de 10% em peso de ácido carboxílico (com um índice de acidez médio de aproximadamente 132), o líquido combustível resultante apresenta um nível aceitável de corrosão do cobre (Schwab *et al.*, 1988).

Para Lima *et al.* (2004b), o principal objetivo de seu estudo é substituir o diesel derivado do petróleo em comunidades remotas nas regiões do Cerrado Brasileiro e da Floresta Amazônica. Essas comunidades, situadas longe dos centros de produção de diesel, dependem fortemente desse combustível para atividades econômicas, transporte e geração de eletricidade. No entanto, possuem um grande potencial para produção de óleo, o que torna a pirólise uma alternativa viável e tangível.

Características do bio-óleo de pirólise

Czernik (2004) caracteriza o bio-óleo como sendo geralmente de cor marrom-escura, líquido, de fluxo livre e com um odor característico de fumaça. As características físicas do bio-óleo têm sido objeto de estudo em diversas pesquisas, e essas propriedades contribuem para uma composição química que se assemelha mais aos óleos naturais, diferindo significativamente dos derivados de petróleo. Bio-óleo é uma mistura de multicomponentes compostos de diferentes tamanhos de moléculas derivadas principalmente da despolimerização e reações divididas em três blocos principais, que são a celulose, hemicelulose e lignina.

O teor de oxigênio no bio-óleo normalmente varia entre 35% e 40% do seu peso total, o qual está predominantemente presente nos mais de 300 compostos identificados nesses óleos. A distribuição desses compostos é amplamente influenciada pelo tipo de biomassa utilizada e pelas diferentes condições de pirólise, incluindo temperatura, tempo de exposição e taxa de aquecimento. Um aumento na severidade da pirólise tende a reduzir o rendimento líquido devido ao craqueamento dos vapores e à formação de gases, resultando em um líquido com menor teor de oxigênio. A água é o componente mais abundante no bio-óleo, seguido por grupos de compostos como hidroxialdeídos, hidroxicetonas, açúcares, ácidos carboxílicos e fenólicos (Czernik; Bridgwater, 2004).

A presença de água no bio-óleo é resultado da umidade original da matéria-prima e das reações de desidratação durante a pirólise. Consequentemente, o teor de água pode variar entre 15% e 30%, dependendo da matéria-prima e das condições do processo. Nessa concentração, a água geralmente se miscibiliza com os componentes oligoméricos derivados da lignina, devido ao efeito solubilizante de outros compostos hidrofílicos polares, como ácidos de baixo peso molecular, álcoois, hidroxialdeídos e cetonas, resultantes principalmente da decomposição de carboidratos.

A presença de água tem efeitos negativos e positivos nas propriedades do óleo. Reduz o seu poder de aquecimento e temperatura da chama. Também contribui para o aumento no atraso de ignição e, em alguns casos, para a diminuição da taxa de combustão em comparação com combustíveis diesel. Por outro lado, melhora as características de fluxo do bio-óleo, reduz a viscosidade do óleo, o que é benéfico para combustão, bombeamento e atomização (Elliott, 1994).

Devido à sua composição química diversificada, o bio-óleo exibe uma ampla faixa de pontos de ebulação. Além da presença de água e componentes orgânicos voláteis, os óleos provenientes da pirólise contêm certas quantidades de materiais não voláteis, como açúcares e fenólicos oligoméricos. Além disso, o aquecimento gradual dos óleos durante a destilação pode resultar na polimerização de alguns componentes reativos. Consequentemente, os óleos começam a evaporar abaixo de 100 °C, mas o processo de destilação geralmente é interrompido em torno de 250-280 °C, deixando entre 35% e 50% do material inicial como resíduo (Bridgwater, 2012).

Czernik *et al.* (1994) observam que a viscosidade do bio-óleo pode oscilar entre 35 e 1000 cP a 40 °C, variando de acordo com a matéria-prima utilizada e as condições de processo, com especial atenção à eficácia na coleta de componentes de baixo ponto de ebulação. Diminui em temperaturas mais altas muito mais rápido do que para óleos derivados de petróleo, de modo que mesmo o bio-óleo sendo muito viscoso ele possa ser facilmente bombeado após um pré-aquecimento moderado.

Uma redução significativa na viscosidade também pode ser alcançada pela adição de solventes polares, como metanol ou acetona. Um efeito indesejado, especialmente observado quando os óleos são armazenados ou manuseados em temperaturas mais altas, é a viscosidade aumenta com o tempo.¹⁶ Supõe-se que isso seja resultado de reações químicas entre diversos compostos presentes no óleo, que levam à formação de moléculas de maior tamanho. Além disso, existem indícios de reação com o oxigênio atmosférico. (Czernik *et al.*, 1994).

Sobre a corrosividade, o bio-óleo contém quantidades substanciais de ácidos orgânicos, principalmente ácidos acético e fórmico, que resulta em um pH de 2-3. Por esta razão, os óleos são corrosivos para materiais de construção comuns, como aço carbono e alumínio e pode afetar alguns materiais de vedação. A corrosividade é especialmente severa em temperaturas elevadas e com o aumento da água também. Apesar dessa característica, os óleos são essencialmente não corrosivos para os aços inoxidáveis (Soltes; Lin, 1984).

Essas características exercem uma influência significativa no desempenho do bio-óleo durante a combustão, afetando suas aplicações na geração de energia em equipamentos convencionais. O bio-óleo é combustível, porém não inflamável devido à presença de uma quantidade considerável de componentes não voláteis. Sua ignição demanda uma quantidade substancial de energia, mas uma vez iniciada, a queima ocorre com uma chama estável e autossustentável (Bridgwater, 2004). Um extenso estudo sobre os fundamentos da combustão de bio-óleo foi feito em Laboratório Nacional Sandia usando bio-óleo produzido em a planta do reator de vórtice NREL (Wornat; Porter; Yang, 1994).

Uso do bio-óleo

Borrego (2021) declara que o bio-óleo é considerado uma matéria-prima renovável para a produção de energia, combustíveis, produtos químicos e materiais de carbono. Estas incluem especificamente a combustão direta do bio-óleo como combustível para caldeiras, a produção de biocombustível a partir de bio-óleo via hidrotratamento, produção de produtos químicos de valor agregado por separação e catálise ácida/hidrogenação ou a conversão de bio-óleo em materiais de carbono através de polimerização/craqueamento. São feitos esforços consideráveis para desenvolver um método viável através de pesquisas para a utilização do bio-óleo para a conversão do bio-óleo em produtos úteis.

Outra aplicação promissora de todo o bio-óleo explora seu alto teor de grupos carbonila. Ao reagir bio-óleo com amônia, ureia ou outro -NH₂ contendo materiais, várias ligações imida e amida são formadas entre carbonos carbonílicos e nitrogênio. Desta forma, cerca de 10% de nitrogênio pode ser incorporado em um produto orgânico matriz que provou ter propriedades de um eficiente fertilizante nitrogenado biodegradável de liberação lenta. Comparado aos fertilizantes minerais, tal produto tem menor lixiviabilidade, o que resulta em menos poluição das águas subterrâneas.

Além disso, é bom para o condicionamento do solo conter material com matéria do tipo húmico, lignina. A aplicação desse fertilizante devolve carbono ao solo e também pode ser considerado um método de sequestro de carbono (Bridgwater *et al.*, 1999).

O bio-óleo é um dos principais produtos do processo de pirólise rápida, e pode ser considerado também uma matéria-prima promissora para substituição do petróleo combustíveis para uso em aquecimento e energia. Além disso, pode ser usado também para produzir produtos químicos de valor agregado (Bridgwater, 2012).

Jacobson *et al.* (2013) afirmam que as tecnologias desenvolvidas até agora necessitam de muito mais melhorias para que o bio-óleo produzido possa se transformar em biocombustível. As propriedades do bio-óleo de pirólise rápida, como como alta viscosidade, instabilidade térmica, corrosividade, alto teor de oxigênio conteúdo são indesejáveis à substituição para combustíveis fósseis. Na maioria dos casos um alto teor de oxigênio resulta em um combustível com baixo poder calorífico.

Carrasco *et al.* (2017) alegam que vários processos de atualização são necessários para que o bio-óleo seja útil como combustível, desta forma, apesar de utilizar biomassa barata e renovável ainda não é lucrativo na escala comercial. Ademais o combustível é uma commodity que deve ter preço baixo no mercado para manter a economia global funcionando, assim sendo necessário estudos que facilitem e diminuam os custos de produção para que o uso do bio-óleo seja uma realidade.

Aplicações Energéticas

Lourençon *et al.* (2016) afirmam que se pode considerar o potencial do bio-óleo de pirólise rápida como agente antifúngico para proteção da madeira, e segundo os autores, o líquido em questão pode ser empregado para o tratamento de madeira de pinho para melhorar a sua resistência ao apodrecimento e hidrofobicidade, mostrando ser possível um uso inovador para o bio-óleo. Desta forma, destacam também que a utilização de materiais de biomassa como fonte de compostos conservantes poderia ser ainda mais atraente se fosse utilizado material residual, como aparas de madeira rejeitadas de uma pasta industrial processo, mas de qualquer forma já é considerado um grande avanço a descoberta de um novo uso para o bio-óleo.

No estudo sobre o bio-óleo derivado da pirólise rápida de resíduos de madeira de eucalipto, Lourençon *et al.* (2016) mostraram que o bio-óleo também pode ser utilizado como um eficiente agente antifúngico e hidrofóbico para proteção da madeira. A impregnação com bio-óleo também se mostrou eficaz para diminuir a absorção de água e molhabilidade do pinhal. O bio-óleo contido no pinho pode agir como repelente à água, bloqueando a microestruturas capilares responsáveis pela absorção e fluxo de líquidos. A absorção de água pelo pinheiro pode diminuir cinco vezes, de

acordo com o teor de bio-óleo. Porém a estabilidade térmica da madeira de pinho tende a diminuir com o aumento do teor de bio-óleo nele impregnado. Nos seus estudos o bio-óleo trouxe uma melhoria na resistência ao apodrecimento de 2.6 vezes, e 4.5 vezes melhor para a proteção contra fungos *T. versicolor* e *G. trabeum*, além de causar a mortalidade de toda a colônia fúngica presente nos primeiros dias de teste.

Thybring (2013) relata sobre as moléculas químicas de biocidas aplicados à proteção da madeira e a resistência ao apodrecimento da madeira que pode ser melhorada, controlando o teor de umidade das células para abaixo de 25%, que é onde foi estabelecido como o ponto crítico que a deterioração não ocorre. Muitos sintéticos polímeros, principalmente polímeros vinílicos, foram investigados para reduzir a capacidade de absorção de umidade de madeira, no entanto, é sempre mais interessante quando recursos renováveis são utilizados para obter tais respostas naturais hidrofóbicas e antifúngicas na madeira (Li *et al.*, 2013).

Ali *et al.* (2015) apontam sobre uma ampla gama de biomassas que tem sido utilizada como matéria-prima para a obtenção de bio-óleo utilizando a pirólise rápida. O bio-óleo obtido geralmente são constituídos em sua maioria por compostos fenólicos derivados dos compostos de Lignina, que podem ser úteis como proteção da madeira contra a decomposição de fungos (Yang *et al.*, 2016).

Tais compostos fenólicos monoméricos são capazes de neutralizar rapidamente os radicais livres gerando produtos estáveis e não reativos (Aadil *et al.*, 2014). São capazes também de quelar os íons metálicos que são dois mecanismos importantes para prevenir o ataque de fungos, gerando assim a capacidade fungicida para o bio-óleo e trazendo um novo uso para ele (Binbuga *et al.*, 2005).

Além disso, quando a madeira maciça é impregnada com bio-óleo, aglomera e reveste a superfície das microestruturas vasculares da madeira (Kim *et al.*, 2012). Desa forma o bio-óleo se torna capaz de bloquear o fluxo de água no interior da madeira e, consequentemente, diminuindo sua absorção de água, tornando-a impermeável também (Ali Temiz *et al.*, 2013).

Jinzen e Xiao (2014) abordam sobre os riscos biológicos para os produtos de madeira, que são separados em C1 (interior, seco condições), C2 (interior, condições molhadas), C3 (exterior, acima do solo), C4 (exterior, no solo contato) e C5 (contato com água do mar). De acordo com a classe de risco onde a madeira será utilizada, inevitavelmente, tratamentos conservantes são obrigatórios para melhorar a sua biodegradação, resistência e vida útil.

Hoje em dia os produtos para preservação de madeira mais aplicados são à base de creosoto pentaclorofenol e arseniato de cobre cromato à base de água. No curto prazo estimou que estes

produtos químicos podem continuar a ser utilizados, no entanto, restrições severas e os próximos regulamentos federais relacionados à sua aplicação serão cobrados (C. Jinzhen; J. Xiao, 2014).

Vélez *et al.* (2018) buscam em sua pesquisa os desenvolvimentos de outros produtos com valor agregado superior ao combustível originados do processo de pirólise rápido, a fim de tornar economicamente viável. Exemplos que podem ser citados sobre o uso diversificado do bio-óleo são como proteção para madeiras, biocidas de extrato aquoso de ácido pirolenhoso, carvão ativado e fertilizantes minerais de carvão vegetal, o biocarvão.

O bio-óleo de pirólise rápida pode ser usado também como precursor da fibra de carbono. A principal matéria-prima para fibra de carbono é a poli acrilonitrila e piche mesofásico, que consistem em alcatrão comum misturado com alcatrão de carvão residual. Ambos são matérias-primas de origem fóssil e possuem altos custos de processamento (Huang, 2009).

Durante o processo de produção de carvão vegetal através da pirólise lenta da madeira, são gerados gases que podem ser condensados para formar um líquido oleoso conhecido como alcatrão de madeira. Levando em consideração o potencial do teor de carbono presente nesse líquido, os pesquisadores desenvolveram fibra de carbono a partir desse alcatrão (Prauchner *et al.*, 2004).

Ferrari *et al.* (2022) afirmam também que o bio-óleo pode ser utilizado também como matéria-prima para geração de diversos outros produtos devido a suas características químicas. São exemplos desse uso alternativo as velas, tintas, vernizes, resinas, ração animal, lubrificante automotivo de máquinas agrícolas e sabões, mas devido ao alto custo os estudos foram pouco desenvolvidos, sendo limitada a quantidade de informações e caracterizações dos componentes. Gary *et al.* (2007) mencionam que no Canadá, o bio-óleo é comercializado por cerca de \$50,6 dólares canadenses por barril. Esse valor representa aproximadamente 70% do preço do óleo bruto convencional no país.

Conclusão

A crescente geração de óleo residual e seus impactos ambientais exigem uma reflexão sobre alternativas sustentáveis para sua gestão. Nesta revisão bibliográfica narrativa, exploramos as possibilidades de conversão do óleo residual em fontes de energia, com foco na pirólise e no uso do bio-óleo resultante. Ao analisar os estudos disponíveis, destacamos importantes contribuições para a compreensão desse campo em evolução, assim como é possível evidenciar os benefícios da quebra do óleo residual através do processo de pirólise.

A análise da literatura revelou que a gestão do óleo residual é um desafio global, com implicações significativas para o meio ambiente e a saúde pública (Zhang *et al.*, 2021). O trabalho de Zhang *et al.* (2021) destaca a necessidade urgente de estratégias abrangentes para a utilização do óleo residual, apontando para a complexidade do problema e ressaltando a importância de iniciativas que visem mitigar os impactos ambientais associados a esse resíduo.

A revisão da literatura também evidenciou a viabilidade do uso de óleo residual como matéria-prima para a produção de biodiesel, conforme abordado por Banu e Sivakumar (2020). A transformação do óleo residual em fontes de energia através do processo de pirólise, como o biodiesel, não apenas oferece uma alternativa sustentável ao descarte inadequado, mas também contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Ao considerarmos a pirólise como uma técnica promissora para a conversão do óleo residual em bio-óleo, conforme discutido por Demirbas (2017), observamos uma abordagem eficaz na valorização energética desses resíduos. A pirólise emerge como uma tecnologia chave, capaz de transformar o óleo residual em uma fonte de energia renovável, reduzindo assim o impacto ambiental associado ao descarte inadequado.

Apesar dos avanços significativos, a implementação efetiva dessas alternativas enfrenta desafios técnicos, econômicos e regulatórios. A necessidade de desenvolver tecnologias mais eficientes e economicamente viáveis para a pirólise do óleo residual é evidente, bem como a criação de políticas e regulamentações que incentivem a adoção de práticas mais sustentáveis.

Além disso, as oportunidades futuras residem na exploração de abordagens integradas que considerem toda a cadeia de valor, desde a coleta eficiente do óleo residual até a produção e utilização do bio-óleo. Investigar maneiras de otimizar esses processos, bem como explorar novas aplicações para o bio-óleo, são áreas promissoras para futuras pesquisas.

Esta revisão bibliográfica narrativa contribui para a consolidação do conhecimento sobre a conversão do óleo residual em fontes de energia sustentáveis. Ao integrar descobertas de estudos destacados, identificamos lacunas no conhecimento que apontam para a necessidade de pesquisas futuras. Além disso, a abordagem narrativa proporciona uma visão holística, contextualizando as descobertas em um cenário mais amplo de sustentabilidade e gestão de resíduos.

Em conclusão, esta revisão destaca a relevância da conversão do óleo residual em fontes de energia sustentáveis como uma resposta promissora para a gestão ambientalmente responsável desses resíduos. A combinação de práticas eficientes de gestão, como a produção de biodiesel e a pirólise para obtenção de bio-óleo, oferece uma abordagem integrada e inovadora. Com

esforços contínuos na pesquisa e implementação prática, podemos avançar em direção a um futuro mais sustentável, onde o óleo residual se transforma de um problema ambiental em uma fonte valiosa de energia renovável.

Esta revisão bibliográfica proporciona uma base sólida para pesquisadores, profissionais da indústria e responsáveis por políticas públicas, incentivando uma abordagem colaborativa na busca por soluções sustentáveis para a gestão do óleo residual. A integração de diferentes disciplinas e ações coordenadas são essenciais para alcançar progressos significativos e enfrentar os desafios complexos associados a esse cenário, promovendo assim a transição para práticas mais sustentáveis e resilientes em relação aos resíduos de óleo.

Referências bibliográficas

- Aadil, K. R., Barapatre, A., Sahu, S., Jha, H., Tiwary, B. N., (2014) Free radical scavenging activity and reducing power of *Acacia nilotica* wood lignin. *International Journal of Biological Macromolecules.*, **67**, 220–227.
- Ali, N., Saleem, M., Shahzad, K., Chughtai, A., (2015) Bio-Oil Production from Fast Pyrolysis of Cotton Stalk in Fluidized Bed Reactor. *Arabian Journal for Science and Engineering.*, **40**, 3019–3027.
- Antonic, B., Dordevic, D., Jancikova, S., Tremlova, B., Nejezchlebova, M., Goldová, K., Treml, J., (2021) Reused Plant Fried Oil: A Case Study with Home-Made Soaps. *Processes.*, **9**, 529.
- Binbuga, N., Chambers, K., Henry, W. P., Schultz, T. P., (2005) Metal chelation studies relevant to wood preservation.1. Complexation of propyl gallate with Fe2+. *Holzforschung.*, **59**, 205–209.
- Brännström, H., Kumar, H., Alén, R., (2018) Current and Potential Biofuel Production from Plant Oils. *BioEnergy Research.*, **11**, 592–613.
- Bridgwater, A., Czernik, S., Diebold, J., Meier, D., Oasmaa, A., Peacocke, C., Piskorz, J., Radlein, D., (1999) *Fast pyrolysis of biomass: a handbook*. Aston Univ., Birmingham (United Kingdom).
- Bridgwater, A. V., 2012: Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy.*, **38**, 68–94.
- C. Jinzhen, J. Xiao, (2014) *Deterioration and Protection of Sustainable Biomaterials*. American Chemical Society, Washington, DC, Vol. 1158.
- Carrasco, J. L., Gunukula, S., Boateng, A. A., Mullen, C. A., DeSisto, W. J., Wheeler, M. C., (2017) Pyrolysis of forest residues: An approach to techno-economics for bio-fuel production. *Fuel.*, **193**, 477–484.
- Cheng, G., Zhang, M., Lu, Y., Zhang, Y., Lin, B., Von Lau, E., (2024) A novel method for the green utilization of waste fried oil. *Particuology.*, **84**, 1–11.
- Chhetri, A., Watts, K., Islam, M., (2008) Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production. *Energies.*, **1**, 3–18.
- Czernik, S., Johnson, D. K., Black, S., (1994) Stability of wood fast pyrolysis oil. *Biomass and Bioenergy.*, **7**, 187–192.
- Czernik, S., Bridgwater, A. V., 2004: Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy and Fuels.*, **18**, 590–598.
- Daud, N. M., Sheikh Abdullah, S. R., Abu Hasan, H., Yaakob, Z., (2015) Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. *Process Safety and Environmental Protection.*, **94**, 487–508.
- Demirbas, A., (2008) Relationships derived from physical properties of vegetable oil and biodiesel fuels. *Fuel.*, **87**, 1743–1748.
- Demirbas, A., Al-Ghamdi, K., Sen, N., Aslan, A., Alalayah, W. M., (2017) Gasoline- and diesel-like products from heavy oils via catalytic pyrolysis. *Petroleum Science and Technology.*, **35**, 1607–1613.

- El-Araby, R., 2024: Biofuel production: exploring renewable energy solutions for a greener future. *Biotechnol Biofuels.*, **17**, 129.
- Elliott, D. C., (1994) Water, alkali and char in flash pyrolysis oils. *Biomass and Bioenergy.*, **7**, 179–185.
- Fonts, I., Gea, G., Azuara, M., Ábreo, J., Arauzo, J., 2012: Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, **16**, 2781–2805.
- Fortes, I. C. P., Baugh, P. J., (2004) Pyrolysis–GC/MS studies of vegetable oils from Macauba fruit. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **72**, 103–111.
- Gary, J. H., Handwerk, J. H., Kaiser, M. J., Geddes, D., (2007) *Petroleum Refining*. CRC Press.
- Huang, X., 2009: Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials.*, **2**, 2369–2403.
- Idem, R. O., Katikaneni, S. P. R., Bakhshi, N. N., (1996) Thermal Cracking of Canola Oil: *Reaction Products in the Presence and Absence of Steam*. *Energy & Fuels.*, **10**, 1150–1162.
- Jacobson, K., Maheria, K. C., Kumar Dalai, A., (2013) Bio-oil valorization: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, **23**, 91–106.
- Jalil, P. A., (2002) Investigations on polyethylene degradation into fuel oil over tungstophosphoric acid supported on MCM-41 mesoporous silica. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **65**, 185–195.
- Kim, K. H., Jeong, H. S., Kim, J. Y., Han, G. S., Choi, I. G., Choi, J. W., (2012) Evaluation of the antifungal effects of bio-oil prepared with lignocellulosic biomass using fast pyrolysis technology. *Chemosphere.*, **89**, 688–693.
- Kraiem, T., Hassen, A. Ben, Belayouni, H., Jeguirim, M., (2017) Production and characterization of bio-oil from the pyrolysis of waste frying oil. *Environmental Science and Pollution Research.*, **24**, 9951–9961.
- Li, Y., Liu, Z., Dong, X., Fu, Y., Liu, Y., (2013) Comparison of decay resistance of wood and wood-polymer composite prepared by in-situ polymerization of monomers. *International Biodeterioration & Biodegradation.*, **84**, 401–406.
- Li, Y., Jin, Y., Li, J., Chen, Y., Gong, Y., Li, Y., Zhang, J., (2016) Current Situation and Development of Kitchen Waste Treatment in China. *Procedia Environmental Sciences.*, **31**, 40–49.
- Lima, D. G., Soares, V. C. D., Ribeiro, E. B., Carvalho, D. A., Cardoso, É. C. V., Rassi, F. C., Mundim, K. C., Rubim, J. C., Suarez, P. A. Z., (2004) Diesel-like fuel obtained by pyrolysis of vegetable oils. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **71**, 987–996.
- Lourençon, T. V., Mattos, B. D., Cademartori, P. H. G., Magalhães, W. L. E., (2016) Bio-oil from a fast pyrolysis pilot plant as antifungal and hydrophobic agent for wood preservation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **122**, 1–6.
- Nerín, C., Domeño, C., Moliner, R., Lázaro, M. J., Suelves, I., Valderrama, J., (2000) Behaviour of different industrial waste oils in a pyrolysis process: metals distribution and valuable products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **55**, 171–183.
- Nigam, P. S., Singh, A., 2011: Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science.*, **37**, 52–68.
- Oasmaa, A., Van De Beld, B., Saari, P., Elliott, D. C., Solantausta, Y., (2015) Norms, Standards, and Legislation for Fast Pyrolysis Bio-oils from Lignocellulosic Biomass. *Energy and Fuels.*, **29**, 2471–2484.
- Pedroza, M. M., de Oliveira, M. C. C. R., da Cunha Silva Paz, E., Arruda, M. G., Júnior, J. C. Z., do Nascimento Lôbo, R., (2022) Mass balance and characterization of bio-oil from sludge pyrolysis generated in the treatment of effluent from the biodiesel industry. *Journal of Material Cycles and Waste Management.*, **24**, 2303–2313.
- Pires, A. P. P., Arauzo, J., Fonts, I., Domine, M. E., Fernández Arroyo, A., García-Perez, M. E., Montoya, J., Chejne, F., Pfromm, P., García-Perez, M., (2019) Challenges and Opportunities for Bio-oil Refining: A Review. *Energy & Fuels.*, **33**, 4683–4720.
- Prauchner, M. J., Pasa, V. M. D., Otani, C., Otani, S., de Menezes, S. M. C., (2004) Eucalyptus tar pitch pretreatment for carbon material processing. *Journal of Applied Polymer Science.*, **91**, 1604–1611.
- Sánchez-Borrego, F. J., Álvarez-Mateos, P., García-Martín, J. F., (2021) Biodiesel and Other Value-Added Products from Bio-Oil Obtained from Agrifood Waste. *Processes.*, **9**, 797.

- Schwab, A. W., Dykstra, G. J., Selke, E., Sorenson, S. C., Pryde, E. H., (1988) Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society.*, **65**, 1781–1786.
- Silva, R. F. B. Da, Batistella, M., Moran, E., Celidonio, O. L. D. M., Millington, J. D. A., 2020) The Soybean Trap: Challenges and Risks for Brazilian Producers. *Frontiers in Sustainable Food Systems.*, **4**, 1-13.
- Singh, S. P., Singh, D., (2010) Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, **14**, 200–216.
- Soltes, J., Lin, S. C. K., (1984) Hydroprocessing of Biomass Tars for Liquid Engine Fuels. *Progress in Biomass Conversion*, **5**, 1–68.
- Souza-Ferrari, J., Nascimento, G. K. R., Lima, R. M., Lucena, G. A. S., Oliveira, D. A. A., Tomaz, S. S., Barbosa, D. A., (2022) Produção artesanal de sabões, tintas e velas ecológicas a partir de óleo residual de fritura como estratégia de educação ambiental. *Extensão em foco.*, **27**, 311.
- Temiz, A., Akbas, S., Panov, D., Terziev, N., Alma, M. H., Parlak, S., Kose, G., (2013) Chemical Composition and Efficiency of Bio-oil Obtained from Giant Cane (*Arundo donax* L.) as a Wood Preservative. *BioRes.*, **8**, 2084-2098.
- Thybring, E. E., (2013) The decay resistance of modified wood influenced by moisture exclusion and swelling reduction. *International Biodeterioration & Biodegradation.*, **82**, 87–95.
- Vélez, D. C. P., Magalhães, W. L. E., Capobianco, G., (2018) Carbon fiber from fast pyrolysis bio-oil. *Science and Technology of Materials.*, **30**, 16–22.
- Vieira, G. E. G., Romeiro, G. A., Sella, S. M., Damasceno, R. N., Pereira, R. G., (2009) Low temperature conversion (LTC) – An alternative method to treat sludge generated in an industrial wastewater treatment station – Batch and continuous process comparison. *Bioresource Technology.*, **100**, 1544–1547.
- Vitolo, S., Bresci, B., Seggiani, M., Gallo, M. G., (2001) Catalytic upgrading of pyrolytic oils over HZSM-5 zeolite: behaviour of the catalyst when used in repeated upgrading-regenerating cycles. *Fuel.*, **80**, 17–26.
- Wang, S., Yuan, C., Esakkimuthu, S., Xu, L., Cao, B., El-Fatah Abomohra, A., Qian, L., Liu, L., Hu, Y., (2019) Catalytic pyrolysis of waste clay oil to produce high quality biofuel. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.*, **141**, 104633.
- Wang, Y., Ke, L., Peng, Y., Yang, Q., Du, Z., Dai, L., Zhou, N., Liu, Y., Fu, G., Ruan, R., Xia, D., Jiang, L., (2020) Characteristics of the catalytic fast pyrolysis of vegetable oil soapstock for hydrocarbon-rich fuel. *Energy Conversion and Management.*, **213**, 112860.
- Wiggers, V. R., Meier, H. F., Wisniewski, A., Chivanga Barros, A. A., Wolf Maciel, M. R., (2009) Biofuels from continuous fast pyrolysis of soybean oil: A pilot plant study. *Bioresource Technology.*, **100**, 6570–6577.
- Wornat, M. J., Porter, B. G., Yang, N. Y. C., (1994) Single Droplet Combustion of Biomass Pyrolysis Oils. *Energy & Fuels.*, **8**, 1131–1142.
- Xu, G., Yang, X., Spinoza, L., (2015) Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *Journal of Environmental Management.*, **151**, 221–232.
- Yang, Z., Kumar, A., Huhnke, R. L., Buser, M., Capareda, S., (2016) Pyrolysis of eastern redcedar: Distribution and characteristics of fast and slow pyrolysis products. *Fuel.*, **166**, 157–165.
- Zhang, X., Zhang, K., Wu, C., Liu, K., Jiang, K., (2020) Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: A review of the properties, practical application and life cycle assessment. *Construction and Building Materials.*, **262**, 120528.