



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



PHILIP ALEXANDRE ARAÚJO VENTURA DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIO-ÓLEO
PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DA PARAÍBA**

ORIENTADORA: Profa. Dra. Flávia de Medeiros Aquino

COORIENTADORA: Profa. Dra. Joelda Dantas

**JOÃO PESSOA – PB
2024**

PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 118

PHILIP ALEXANDRE ARAÚJO VENTURA DOS SANTOS

**CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIO-ÓLEO
PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Profa. Dra. Flávia de Medeiros Aquino

Coorientadora: Profa. Dra. Joelda Dantas

**JOÃO PESSOA – PB
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237c Santos, Philip Alexandre Araújo Ventura dos.
Caracterização e potencial energético do bio-óleo
pirolítico oriundo de lodo de estação de tratamento de
esgoto da Paraíba / Philip Alexandre Araújo Ventura dos
Santos. - João Pessoa, 2024.
95 f. : il.

Orientação: Flávia de Medeiros Aquino.
Coorientação: Joelda Dantas.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Pirólise - Bio-óleo. 2. Estudo cinético -
Proknow-C. 3. Lodo de esgoto - Bioprodutos. I. Aquino,
Flávia de Medeiros. II. Dantas, Joelda. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA nº 118 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao nono dia do mês de agosto de dois mil e vinte e quatro foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 09h00, no Auditório do Centro de Energias Alternativas e Renováveis a que se submeteu a defesa pública de **PHILIP ALEXANDRE ARAÚJO VENTURA DOS SANTOS**, matrícula 20221004241, com o título “**CARACTERIZAÇÃO E POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA PARAÍBA**”. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: FLÁVIA DE MEDEIROS AQUINO (UFPB), JOELDA DANTAS (UFPB), KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA (UFPB) e MARTA CELIA DANTAS (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi APROVADO pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: O aluno deverá realizar os ajustes necessários para a finalização deste trabalho.

Membros da Banca Examinadora:

Flávia de Medeiros Aquino
Prof.^a. Dr.(a) **FLÁVIA DE MEDEIROS AQUINO**
Orientador(a)

Joelda Dantas
Prof.^a. Dr.(a) **JOELDA DANTAS**
Coorientador(a)

Kelly Cristiane Gomes
Prof.^a. Dr.(a) **KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA**
Examinador(a) Interno(a)

Marta Celia Dantas
Prof.^a. Dr.(a) **MARTA CELIA DANTAS**
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar força e otimismo.

Às professoras orientadoras Joelda Dantas e Flávia de Medeiros Aquino pela oportunidade de trabalhar, aprender e por me ajudarem a conquistar esse objetivo.

À minha família e amigos pelo incentivo e apoio.

À banca examinadora pela disposição e atenção.

A todos que contribuíram de forma direta e indireta a essa conquista.

Agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pela concessão da bolsa com o Termo nº 16/2022.

A empresa inPyro por colaborar na formação de recursos humanos qualificados na UFPB, e a Cagepa pelo apoio abrindo as portas para as coletas dos lodos.

RESUMO

Os biocombustíveis são uma das alternativas mais promissoras aos combustíveis fósseis e exercem um papel significativo no cenário energético global. As principais características dos combustíveis alternativos são a sustentabilidade, o custo-benefício, a eficiência e menos prejudiciais ao meio ambiente do que os combustíveis fósseis convencionais. Dentre os resíduos de difícil destinação encontra-se o lodo de esgoto. A maior parte dos contaminantes encontrados nos efluentes das estações de tratamento de esgoto (ETE) está concentrada no lodo, sendo impreterivelmente obrigatório descartá-los de forma segura e razoável. O lodo contém substâncias nocivas e tóxicas, devido a isto, um tratamento inadequado representa uma séria de ameaça ao meio ambiente. Neste sentido, destaca-se a pirólise como um processo eficiente de sanitização, além de poder transformar o lodo de esgoto orgânico em bioprodutos valiosos que são simples de armazenar, transportar e utilizar. O bio-óleo é o subproduto mais comum da pirólise de alta temperatura, este óleo pode ser utilizado como combustível ou convertido em um produto químico. No estudo foi utilizada a metodologia ProKnow-C e a ferramenta VOSviewer para analisar o tema da pesquisa, revelando um aumento nas publicações ao longo dos anos, com um portfólio final de 52 artigos. A análise bibliométrica destacou a pirólise, lodo de esgoto e bio-óleo como principais focos, com a China liderando as publicações e o Brasil ausente, indicando uma lacuna na pesquisa nacional. A análise sistêmica mostrou que a produção de bio-óleo enfrenta desafios como a gestão de emissões tóxicas e a complexidade do processo, mas traz benefícios como a redução de resíduos e a produção de combustível utilizável. Na etapa experimental foi realizada a caracterização de bio-óleos pirolíticos a partir de lodos de ETE das cidades de Campina Grande e João Pessoa, denominados LCG e LJP, respectivamente. As amostras de bio-óleo resultantes do lodo de Campina Grande e João Pessoa, BOCG e BOJP, respectivamente, apresentaram um poder calorífico médio de 39.675,33 J/g para BOCG e 40.841 J/g para BOJP, evidenciando aumentos de 325% e 365%, respectivamente, em relação às amostras de lodo de esgoto originais. As amostras apresentaram pH alcalino, o que pode reduzir a corrosão nos sistemas de combustível, e densidades de 838 kg/m³ (BOCG) e 842 kg/m³ (BOJP), comparáveis a petróleos leves. O grau API corrigido foi de 36,37° para BOCG e 35,57° para BOJP, classificando-os como combustíveis leves, valorizados no mercado. A análise FTIR apresentou grupos hidroxila, compostos alifáticos e anéis aromáticos, adequando o bio-óleo para biocombustíveis ou produtos químicos renováveis. A termogravimetria mostrou comportamento térmico semelhante entre as amostras, com perda de massa de 95%. A energia de ativação aumentou com a conversão, indicando reações mais complexas, cruciais para otimizar processos como a destilação de bio-óleos. Os resultados mostram o bio-óleo pirolítico de lodo de esgoto como uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, com alto potencial energético e estabilidade térmica. A amostra BOJP alcançou 42.349 J/g, semelhante ao diesel não renovável, sugerindo competitividade energética com combustíveis fósseis. Assim, este estudo contribui para os objetivos de desenvolvimento sustentável e critérios ambientais, sociais e de governanças, promovendo práticas sustentáveis e beneficiando o meio ambiente e a sociedade, oferecendo diretrizes para políticas públicas.

Palavras-chave: Proknow-C, estudo cinético, pirólise, lodo de esgoto, bio-óleo, Paraíba, Brasil.

ABSTRACT

Biofuels are one of the most promising alternatives to fossil fuels and play a significant role in the global energy scenario. The main characteristics of alternative fuels are that they are sustainable, cost-effective, efficient and less harmful to the environment than conventional fossil fuels. Among the waste that is difficult to dispose of is sewage sludge. Most of the contaminants found in the effluent from sewage treatment plants (STPs) are concentrated in the sludge, which must be disposed of safely and reasonably. Sludge contains harmful and toxic substances, so inadequate treatment poses a serious threat to the environment. In this sense, pyrolysis stands out as an efficient sanitization process, as well as being able to transform organic sewage sludge into valuable bioproducts that are simple to store, transport and use. Bio-oil is the most common by-product of high-temperature pyrolysis, which can be used as a fuel or converted into a chemical product. The study used the ProKnow-C methodology and the VOSviewer tool to analyze the research topic, revealing an increase in publications over the years, with a final portfolio of 52 articles. The bibliometric analysis highlighted pyrolysis, sewage sludge and bio-oil as the main focuses, with China leading the publications and Brazil absent, indicating a gap in national research. The systemic analysis showed that bio-oil production faces challenges such as the management of toxic emissions and the complexity of the process, but brings benefits such as waste reduction and the production of usable fuel. The experimental stage involved the characterization of pyrolytic bio-oils from wastewater treatment plant sludge from the cities of Campina Grande and João Pessoa, called LCG and LJP, respectively. The bio-oil samples resulting from the Campina Grande and João Pessoa sludge, BOCG and BOJP, respectively, had an average calorific value of 39,675.33 J/g for BOCG and 40,841 J/g for BOJP, showing increases of 325% and 365%, respectively, in relation to the original sewage sludge samples. The samples had an alkaline pH, which can reduce corrosion in fuel systems, and densities of 838 kg/m³ (BOCG) and 842 kg/m³ (BOJP), comparable to light oils. The corrected API grade was 36.37° for BOCG and 35.57° for BOJP, classifying them as light fuels, valued on the market. FTIR analysis showed hydroxyl groups, aliphatic compounds and aromatic rings, making the bio-oil suitable for biofuels or renewable chemical products. Thermogravimetry showed similar thermal behavior between the samples, with a mass loss of 95%. The activation energy increased with conversion, indicating more complex reactions, crucial for optimizing processes such as bio-oil distillation. The results show sewage sludge pyrolytic bio-oil as a sustainable alternative to fossil fuels, with high energy potential and thermal stability. The BOJP sample reached 42,349 J/g, similar to non-renewable diesel, suggesting energy competitiveness with fossil fuels. Thus, this study contributes to the objectives of sustainable development and environmental, social and governance criteria, promoting sustainable practices and benefiting the environment and society, offering guidelines for public policies.

Keywords: Proknow-C, kinetic study, pyrolysis, sewage sludge, bio-oil, Paraíba, Brazil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta de energia interna do Brasil 2013-2023.	17
Figura 2. Fluxograma do método Procknow-C.	36
Figura 3. Coleta de Lodo de Esgoto.	38
Figura 4. Amostra de Bio-óleo.	39
Figura 5. Distribuição anual de artigos do portfólio final entre 2008 e 2024.	48
Figura 6. Número de artigos dos autores e coautores que mais aparecem no portfólio final.	50
Figura 7. Principal rede de coautoria do portfólio final.	51
Figura 8. Palavras-chave que aparecem com mais frequência na base final de artigos sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto.	53
Figura 9. Distribuição geográfica do número de publicações científicas dedicadas à aplicação do processo de pirólise no tratamento de lodo de esgoto e produção de bio-óleo de 2006 a 2024.	54
Figura 10. Espectro de FTIR para a amostra do bio-óleo pirolítico BOCG.....	63
Figura 11. Espectro de FTIR para a amostra do bio-óleo pirolítico BOJP.....	64
Figura 12. Análise termogravimétrica da amostra de bio-óleo pirolítico BOCG.....	68
Figura 13. Análise termogravimétrica da amostra de bio-óleo pirolítico BOJP.	69
Figura 14. Curvas de conversão em função da temperatura para amostra de bio-óleo pirolítico BOCG.	72
Figura 15. Curvas de conversão em função da temperatura para amostra de bio-óleo pirolítico BOJP.....	73
Figura 16. Logaritmo da razão de aquecimento em função do inverso da temperatura para vários níveis de conversão da etapa de decomposição térmica do bio-óleo BOCG.....	74
Figura 17. Logaritmo da razão de aquecimento em função do inverso da temperatura para vários níveis de conversão da etapa de decomposição térmica do Bio-óleo BOJP.....	75
Figura 18. Relação da energia de ativação <i>versus</i> o grau de conversão para a amostra de bio- óleo BOCG.	76
Figura 19. Relação da energia de ativação <i>versus</i> o grau de conversão para a amostra BOJP.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Seleção de portfólio bibliométrico.	28
Quadro 2. Eixos de pesquisa.....	29
Quadro 3. Palavras-chave definidas em função dos eixos condizentes ao tema do trabalho.	30
Quadro 4. <i>Strings</i> de pesquisa gerado a partir da seleção de palavras-chave do tema para os diferentes eixos.	31
Quadro 5. Quantitativo de documentos encontrados utilizando as <i>strings</i> de buscas.	31
Quadro 6. Primeiro filtro aplicado.....	32
Quadro 7. Artigos selecionados no portfólio final.	44
Quadro 8. Comprimento de onda e grupos funcionais para a amostra BOCG.....	65
Quadro 9. Comprimento de onda e grupos funcionais para a amostra BOJP.	66
Quadro 10. Etapas da análise termogravimétrica do bio-óleo.....	70
Quadro 11. Frações para destilação do Petróleo.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Oferta Interna Brasileira de Energia no Ano de 2023.	18
Tabela 2. Condições operacionais comuns e rendimentos dos processos de pirólise primária.	24
Tabela 3. Porcentagem de bio-óleo por reação de pirólise.....	26
Tabela 4. Número de artigos sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto, por periódico.	52
Tabela 5. pH do bio-óleo pirolítico de lodo de estação de tratamento de esgoto.....	57
Tabela 6. Densidade do bio-óleo pirolítico comparado a diferentes combustíveis.	58
Tabela 7. Classificação do grau API.	59
Tabela 8. Poder calorífico do bio-óleo pirolítico de lodo de ETE.....	61
Tabela 9. Energias de ativação para as conversões de 5 a 90% para as amostras BOCG e BOJP.....	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA.....	15
1.2	OBJETIVO GERAL.....	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	16
2.2	BIOMASSAS E BIOCOMBUSTÍVEIS	19
2.3	LODO DE ESGOTO SANITÁRIO	20
2.4	PIRÓLISE	23
2.4.1	Classificação do processo de pirólise	24
2.4.2	Bio-Óleo	25
2.4.3	Método Procknow-C	26
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	ETAPA 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO E SISTÊMICO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DE LODO DE ETE	29
3.1.1	Método de pesquisa e filtragem do banco de artigos que envolvem o tema...	29
3.1.2	Seleção e filtragem do banco de dados pelo método ProKnow-C.....	29
3.1.3	Análise bibliométrica do banco de dados bibliográfico final	37
3.1.4	Análise sistêmica do banco de dados bibliográfico final.....	37
3.2	ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÕES DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODOS DE ETE.....	38
3.2.1	Análise de pH do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE.....	39
3.2.2	Densidade e grau API do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE	40
3.2.3	Poder calorífico do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE	41
3.2.4	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).....	41
3.2.5	Análise termogravimétrica do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE... 42	42
3.2.5.1	Metodologia para o Estudo Cinético a partir da Análise Térmica	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO FINAL E DE SUAS REFERÊNCIAS	44
4.2	ANÁLISE SISTÊMICA.....	55
4.2.1	Relatório Final da Análise Sistêmica	55

4.3	ANÁLISE DE pH DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM	57
4.4	DENSIDADE DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM	58
4.4.1	Grau API do bio-óleo pirolítico dos lodos ETE de origem	59
4.5	PODER CALORÍFICO DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO E DOS LODOS ETE DE ORIGEM	61
4.6	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM	63
4.7	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM	67
4.7.1	Análise Cinética do bio-óleo pirolítico dos lodos ETE de origem	72
4.7.1.1	Conversão (α)	72
4.7.1.2	Determinação da Energia de Ativação	74
5	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos dois séculos, os combustíveis fósseis foram usados extensivamente para atender às necessidades energéticas de uma população crescente em um mundo em desenvolvimento (Hameed *et al.*, 2020). Os setores de geração de energia, transporte e indústria na maioria dos países em desenvolvimento respondem por cerca de 80% da demanda global de energia de combustíveis fósseis, e a dependência excessiva de fontes únicas de energia tem grandes impactos adversos na segurança energética (Mutsengerere *et al.*, 2019; Su *et al.*, 2022). Historicamente, o mundo tem se voltado para o petróleo, gás natural e carvão para abastecer suas necessidades de energia, atendendo atualmente 30,95% do petróleo, 24,42% do gás natural e 26,90% do carvão (Xaba *et al.*, 2022).

O aumento do consumo de energia, o efeito das alterações climáticas e as emissões de gases do efeito de estufa tornaram necessário o estudo de combustíveis sustentáveis (Gohar *et al.*, 2022). Uma das questões ambientais mais significativas é a mudança climática, com isso a necessidade de incorporar fontes de energia renováveis é fundamental para reduzir o consumo de combustíveis fósseis (Shalini *et al.*, 2021).

A transição para energia renovável com objetivo de substituir a energia fóssil é uma escolha necessária para alcançar a segurança energética, a proteção ambiental e o desenvolvimento econômico (Cheng *et al.*, 2020). As políticas energéticas promovem o uso de recursos sustentáveis para a produção de energia. Fontes tradicionais de energia, como solar e eólica, apresentam limitações devido a fatores ambientais, como geografia e clima (Peng *et al.*, 2021).

O uso de biomassa é uma opção promissora devido à sua fácil disponibilidade e abundância, uma fonte de energia alternativa barata e ambientalmente correta, com emissões de gases de efeito estufa menores do que a queima de combustíveis fósseis (Abdullah *et al.*, 2020). A energia da biomassa é sustentável, pouco poluente, possui uma ampla gama de fontes e se desenvolve rapidamente, sendo considerada a terceira maior energia do mundo depois do carvão e do petróleo (Ren *et al.*, 2019).

O biocombustível é uma das alternativas mais promissoras aos combustíveis fósseis e espera-se que tenha um papel significativo no cenário energético global (Leng *et al.*, 2021). As principais características dos combustíveis alternativos sustentáveis são sustentabilidade, custo-benefício, eficiência e menos prejudiciais ao meio ambiente do que os combustíveis fósseis convencionais (Bora; Gupta; Durbha, 2020; Xaba *et al.*, 2022).

Visando a produção mais sustentável dos biocombustíveis em geral, os materiais residuais devem ser levados em consideração. O lodo de esgoto, por exemplo, é um produto residual do processo de tratamento de esgoto, sua composição é complexa e crescente, e tem sido considerado uma preocupação ambiental significativa (Hu, W. *et al.*, 2020). A destinação adequada do lodo de esgoto é vital devido à presença de microrganismos e patógenos, altos teores de metais, que são prejudiciais ao meio ambiente, plantas, animais e aos seres humanos (Liu, X. *et al.*, 2020).

À medida que a população e a urbanização aumentam, as estações de tratamento de esgoto (ETEs) geram grandes volumes de lodo de esgoto, sendo que este lodo deve ser processado e posteriormente deve ser descartado (Liu, H. *et al.*, 2022). Os métodos de tratamento para o lodo de esgoto, incineração e aterro sanitário, liberam emissões indesejadas para o solo e a água, essa poluição pode se acumular e causar danos aos seres humanos e à vida selvagem (Hu, Y. *et al.*, 2020). A despesa de tratamento e descarte de lodo é extremamente alta e normalmente representa mais da metade das despesas operacionais das ETEs (Yang, T. *et al.*, 2019).

A pirólise é um método promissor para o tratamento do lodo de esgoto, com potencial para substituir outros métodos. Pode ter um efeito direto e eficaz na redução do volume de lodo de esgoto, eliminando parasitas e patógenos, minimizando o teor de poluentes orgânicos e fixando metais pesados no biocarvão obtido por pirólise a alta temperatura (Wang *et al.*, 2020).

O bio-óleo gerado a partir do processo de pirólise é um significativo substituto do combustível líquido. Possui alta densidade energética e potencial para substituir os combustíveis fósseis. O bio-óleo é um dos subprodutos da pirólise, este óleo pode ser utilizado como combustível. A capacidade de compreender as características de geração, estrutura e composição durante a pirólise é crucial para sua futura aplicação na indústria (Andreides *et al.*, 2022; Leng *et al.*, 2020; Qing *et al.*, 2022).

Diante do crescente desafio das mudanças climáticas e da crescente demanda energética global, a transição para fontes de energia mais sustentáveis torna-se imperativa. Os biocombustíveis e métodos alternativos, como a pirólise do lodo de esgoto, destacam-se não apenas por reduzirem a dependência de combustíveis fósseis, mas também por oferecerem soluções práticas para questões de gestão de resíduos. Com a aplicação eficaz dessas tecnologias renováveis e práticas de reciclagem de resíduos, é possível alcançar uma maior segurança energética e um desenvolvimento sustentável.

1.1 JUSTIFICATIVA

O tratamento de resíduos, especialmente lodo de esgoto, é um desafio ambiental. Transformar esses resíduos em bio-óleo por meio da pirólise não só oferece uma solução para a gestão de resíduos, mas também contribui para a produção de energia renovável.

1.2 OBJETIVO GERAL

Investigar as características do lodo de esgoto e o processo de extração do bio-óleo mediante o processo de pirólise, visando a sua utilização como biocombustível alternativo.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar um estudo bibliométrico e sistemático sobre a aplicação da pirólise no tratamento de lodos de esgoto para a produção de bio-óleo, identificando tendências e lacunas de pesquisa.
- Analisar a composição e as propriedades do bio-óleo pirolítico produzido em escala piloto por uma empresa paraibana, com foco em amostras provenientes de lodos de estações de tratamento de esgoto de Campina Grande e João Pessoa.
- Avaliar o poder calorífico, pH, densidade, e Grau API dos bio-óleos para comparação com lodos de esgoto originais e combustíveis fósseis, discutindo suas possíveis implicações para aplicações como combustíveis renováveis.
- Utilizar técnicas analíticas, como espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e análise térmicas (termogravimetria), para identificar grupos funcionais e avaliar a estabilidade térmica das amostras de bio-óleo, visando otimizar a produção de biocombustíveis.
- Analisar o estudo cinético do bio-óleo para identificar prováveis pontos de destilação que favoreçam a produção de diferentes biocombustíveis.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS

No cenário energético atual, a maior parte da energia é derivada dos combustíveis fósseis, incluindo petróleo bruto, carvão e gás natural. A crescente demanda global por energia está tendo um grande impacto no sistema energético, não apenas no que diz respeito à segurança econômica e sustentabilidade, mas também às questões ambientais e sociais (Shrivastava *et al.*, 2021). Tanto é assim que, a necessidade de integração econômica, política e social entre as economias e um sistema de governança doméstica eficaz para criar uma economia de energia mais inclusiva e limpa não pode ser subestimada (Acheampong; Opoku; Dogah, 2023).

Um cenário que retrata bem essa problemática é a de que a poluição do ar causada por gases inorgânicos, como óxidos de nitrogênio (NO₂), óxidos de enxofre (SO₂), ozônio (O₃), CO, H₂S e compostos orgânicos voláteis (COVs), foi reconhecida como tendo efeitos graves na saúde dos seres humanos, que de acordo com declaração da Organização Mundial da Saúde, 92% das pessoas são expostas a estes gases poluidores do ar, sendo a causa mais considerável de morte (Askari *et al.*, 2025).

O uso excessivo de combustíveis fósseis leva à liberação de gases de efeito estufa (GEE), como metano, dióxido de carbono e óxido nitroso. Olabi e Abdelkareem, (2022) alertam que se as fontes de energia permanecerem as mesmas, espera-se que esses gases aumentem com o tempo, à medida que as cidades crescem e se tornam mais industrializadas. Estes autores acrescentaram que as atuais concentrações de GEE afetam as mudanças climáticas, aumento do nível do mar e outras mudanças ambientais, além de serem prejudiciais aos seres vivos.

A utilização massiva de combustíveis fósseis, custos crescentes, disponibilidade limitada, regulamentações rígidas e o desejo de um ambiente mais ecológico levaram à adoção de fontes alternativas de energia. Como resultado, muitos países desenvolvidos e em desenvolvimento estão tentando superar essas preocupações por meio do desenvolvimento e utilização de energia renovável. Fontes de energia alternativas e renováveis incluem energia eólica, hídrica, solar, geotérmica, das ondas e biomassa. Explorar fontes alternativas de energia e melhorar a eficiência energética são formas de atender às crescentes demandas energéticas de diferentes setores (Fakayode *et al.*, 2020; Palamanit *et al.*, 2019; Shahbeig; Nosrati, 2020; Wang *et al.*, 2021).

Muitos países consideram a energia renovável um componente importante do desenvolvimento de tecnologias futuras e se dedicam a metas ambiciosas. Com a expansão das políticas nacionais e os avanços nas tecnologias de energias renováveis, a tendência geral na transição energética global é converter os sistemas de energia fóssil em sistemas de energia de baixo carbono e, eventualmente, em energia sustentável dominada por renováveis (Usman; Lorente, 2022).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), o Brasil é um dos maiores produtores de energia renovável do mundo, alcançando em 2023, 49,1% de sua matriz energética interna, como representado na Figura 1.

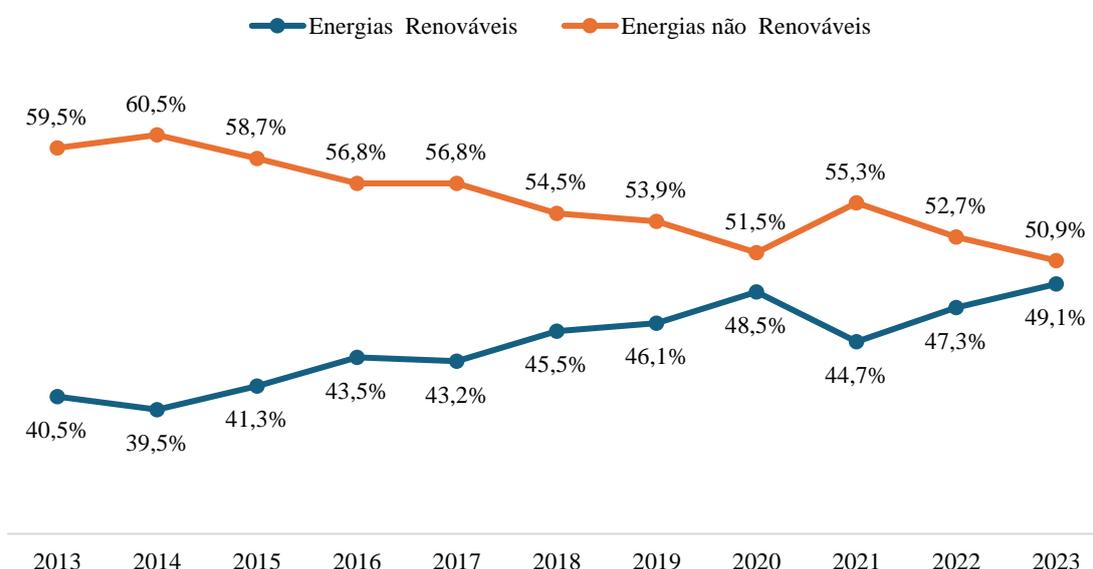


Figura 1. Oferta de energia interna do Brasil 2013-2023.

Fonte: (EPE, 2024).

Todos os estados membros das Nações Unidas criaram os ‘Objetivos de Desenvolvimento Sustentável’, uma iniciativa global para erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima, promover a paz e a prosperidade para todos, em todos os lugares. Como componente fundamental da produção universal, a energia tem um papel único na condução da economia global. É por isso que a utilização de fontes de energia renováveis e não renováveis é crucial para o crescimento econômico e a sustentabilidade ambiental (Usman *et al.*, 2022).

Segundo Li *et al.* (2022), o Brasil, maior país da América do Sul, foi o primeiro país a utilizar biomassa como combustível, e também, a assumir o posto de maior produtor e

consumidor de combustíveis. Como resultado de sua estratégia de diversificação energética, o Brasil tem dedicado recursos significativos para o desenvolvimento de energia hidrelétrica e biomassa, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1. Oferta Interna Brasileira de Energia no Ano de 2023.

Fontes	2023
Energia não renovável	50,90%
Petróleo e Derivados	35,10%
Gás Natural	9,60%
Carvão Mineral	4,40%
Urânio	1,20%
Outras não renováveis	0,60%
Energia renovável	49,10%
Biomassa da Cana	16,90%
Hidráulica	12,10%
Lenha e Carvão Vegetal	8,60%
Outras Renováveis	7,20%
Eólica	2,60%
Solar	1,70%

Fonte: (EPE, 2024).

Apesar da crescente demanda por energia primária, as fontes convencionais de energia podem não ser suficientes para atender este mercado. Portanto, encontrar combustíveis alternativos para uma produção sustentável é de suma importância. A fonte alternativa permite a conversão de resíduos de biomassa em energia limpa, que tem um enorme potencial energético (Trabelsi *et al.*, 2020).

Neste contexto, encontram-se estudos dedicados ao planejamento da produção em biorrefinarias que tratam diferentes tipos de biomassa e os transformam em bioenergia ou biocombustível (Razm *et al.*, 2023). De acordo com Mularski e Li (2023) a exploração da energia da biomassa é uma opção promissora para reduzir as emissões de CO₂, devido à sua renovabilidade e neutralidade carbônica.

O tema da descarbonização foi tratado na 26ª Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em Glasgow (COP26) em 2021, em que foram pontuadas as expectativas originais do Acordo de Paris e o limite do aumento da temperatura média global a 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Na COP27 que ocorreu em 2022, tais cenários de expectativas foram reforçados como meta para 2050 (Tzeremes; Dogan; Alavijeh, 2023).

2.2 BIOMASSAS E BIOCOMBUSTÍVEIS

O uso de biomassa na produção de energia tem o potencial de reduzir as emissões de GEE e outros poluentes como parte das metas anunciadas recentemente na COP27. A biomassa é considerada a fonte alternativa de energia mais eficiente devido à sua abundância e neutralidade de carbono. Até 2050, 60% dos combustíveis industriais e a redução do aquecimento global dependerão de biomassas (Mędrala *et al.*, 2021; Zhong *et al.*, 2021).

Cerca de 1,7 trilhão de toneladas de biomassa são colhidas anualmente, o equivalente a 850 bilhões de toneladas de carvão ou 600 bilhões de toneladas de petróleo. A Agência Internacional de Energia prevê que até 2023, 10% da energia mundial virá da biomassa, até 2050, cerca de 27% do combustível de transporte do mundo será derivado da biomassa. A biomassa tem capacidade e potencial para abordar o desenvolvimento sustentável e as questões ambientais. Muitos países têm programas destinados a promover a utilização de biomassa (Wang, W. *et al.*, 2022).

Os resíduos de biomassa são polímeros naturais que são comuns na natureza, derivados de matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Como resultado, vários tipos de resíduos, incluindo esterco bovino, lodo, papel e resíduos orgânicos industriais, são considerados biomassa. De acordo com diferentes fontes de energia, a biomassa é adequada para produção de energia, podendo ser classificada em biomassa agrícola, florestal, plantas aquáticas e resíduos orgânicos industriais urbanos, entre outras. Os resíduos de biomassa são biodegradáveis, o que os torna uma importante fonte de matéria orgânica renovável (Ethaib *et al.*, 2020; Leng *et al.*, 2022; Qiu *et al.*, 2022).

A biomassa pode ser colhida, gerenciada, transportada e processada de maneira previsível, resultando em produção consistente. A bioenergia é considerada ambiental, social e economicamente benéfica e classificada como neutra em carbono em termos de emissões. Os métodos de conversão incluem térmicos, biológicos e mecânicos, incluindo combustão, pirólise, liquefação e gaseificação. Além disso, a biomassa pode ser convertida em produtos químicos valiosos (Ali *et al.*, 2022; Khodaparasti *et al.*, 2022).

A biomassa é empregada principalmente como combustível para substituir as fontes de energia tradicionais. As propriedades da biomassa que a tornam uma matéria-prima adequada para a produção de hidrocarbonetos, por exemplo, incluem alta capacidade de produção, baixo consumo de energia, baixos custos de conversão, poluição mínima e baixa

necessidade de nutrientes adicionais. Estes requisitos destinam-se principalmente a produtos agrícolas, resíduos animais, resíduos reciclados e resíduos urbanos (Hanif *et al.*, 2019).

O biocombustível, é um combustível derivado da biomassa, e tem se destacado como uma promissora fonte de energia devido às suas propriedades renováveis, abundantes e ecológicas. Os biocombustíveis são a maior fonte de energia renovável usada para geração de energia e transporte, eles têm o potencial de ter um impacto significativo nas emissões em comparação com o uso de derivados de petróleo. Essas vantagens incluem garantir a segurança energética, reduzir as emissões e criar sistemas mais eficientes em termos energéticos. Os biocombustíveis alternativos e convencionais devem ser promovidos tanto nos países consumidores quanto nos importadores de petróleo (Morni *et al.*, 2021; Vasu *et al.*, 2020).

No Brasil, foi sancionada a Política Nacional de Biorrenováveis (RenovaBio), instituída pela Lei nº 13.576/2017, que faz parte de uma estratégia para cumprir os compromissos de mudanças climáticas do Acordo de Paris, conforme declaração feita na COP-23 em 2017. Os participantes do projeto receberão uma compensação pela redução de emissões de GEE através do uso de biocombustíveis em vez de combustíveis fósseis. Os produtores de bioenergia devem aderir a regulamentos específicos para se beneficiar do RenovaBio: o biocombustível não pode vir de áreas desmatadas; o biocombustível deve ser produzido em áreas licenciadas para a produção de matérias-primas específicas; os produtores devem seguir as leis florestais. Essa legislação incentiva os produtores de biocombustíveis a melhorar suas práticas para reduzir as emissões de GEE e promover novas ideias no campo (Cherubin *et al.*, 2021).

Dentre os vários métodos de produção de biocombustíveis, como digestão anaeróbica, compostagem e gaseificação, a pirólise é considerada àquela com maior potencial, isso porque não só é compatível com as matérias-primas existentes, como também pode ser realizada de forma rápida e eficiente, produzindo biocombustíveis como o biogás e bio-óleo (Luo *et al.*, 2021).

2.3 LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

Dentre as biomassas residuais, o lodo de esgoto é um resíduo do tratamento de esgoto e pode ser usado para aquecimento e geração de energia. Preocupações ambientais e socioeconômicas levaram ao interesse em desenvolver métodos alternativos para o seu tratamento e descarte. O lodo de esgoto é um dos principais subprodutos das ETE's e espera-

se que o volume desse sólido poluidor produzido aumente no futuro como resultado do rápido crescimento populacional em todo o mundo (Arias *et al.*, 2020; Liu, Y. *et al.*, 2022).

Em geral, o lodo de esgoto é uma mistura de componentes orgânicos (carboidratos, proteínas, lipídios, ácidos nucleicos, entre outros), micro e macronutrientes (nitrogênio, fósforo, entre outros) e compostos inorgânicos. O lodo contém substâncias nocivas e tóxicas, como vírus, bactérias e metais pesados, e o tratamento inadequado representa uma séria ameaça ao meio ambiente (Chen *et al.*, 2019).

A maior parte dos contaminantes encontrados nos efluentes das ETE's está concentrada no lodo, sendo recomendável descartá-los de forma segura e razoável. O lodo de esgoto é frequentemente incinerado e também é usado na agricultura como parte de fertilizante ou composto, no entanto, os requisitos econômicos e ambientais desses métodos são estritamente limitados. Alternativamente, a pirólise de lodo de esgoto tem sido proposta como uma alternativa ao tratamento de lodo convencional (Moško *et al.*, 2020).

Os métodos tradicionais de tratamento do lodo de esgoto são flotação, sedimentação, floculação, digestão anaeróbica (Alekseeva *et al.*, 2020). Aterros sanitários, incineração e despejo no oceano são alguns dos métodos mais tradicionais de descarte de lodo de esgoto, sendo práticas prejudiciais à saúde humana, além do mais, o despejo no oceano é proibido pelo Protocolo da Convenção de Londres em 1996, a fim de preservar os ecossistemas marinhos (Xaba *et al.*, 2022; Zaker *et al.*, 2019). O Governo da Paraíba (2024) lançou a Operação Praia Limpa, com o objetivo de identificar e combater ligações clandestinas nas galerias pluviais e na rede de esgotamento sanitário, visando preservar a limpeza e a qualidade das praias, revelando despejos nas praias do litoral paraibano, que colocam o estado da Paraíba num cenário negativo dentro do contexto, o que emerge como uma contundente evidência da necessidade de práticas como as desenvolvidas nesta pesquisa.

O lodo apresenta alto teor de umidade e ainda necessita de tratamento adicional para alcançar a redução e promover a segurança do resíduo (Liu; Xu; Li, 2021). Aterros sanitários são de baixo custo e prontamente disponíveis, sendo solução mais comum para a disposição de lodo de esgoto, porém, são limitados pela quantidade de terra disponível e pela energia necessária. A compostagem pode converter matéria orgânica em fertilizante, mas a liberação de odores, partículas de aerossóis e metais pesados deve ser considerada. Considerado o método mais eficaz para redução de volume e geração de energia do lodo de esgoto, a incineração está se tornando mais comum, mas as cinzas e as emissões da incineração do lodo de esgoto são prejudiciais ao meio ambiente (Xue *et al.*, 2019).

Esses métodos tradicionais levam a problemas adicionais, favorecendo ao aumento de impactos ambientais com metais pesados, emissões de NO_x, SO_x e dioxinas produzidas pela incineração, bem como poluição secundária de aterros sanitários e sistemas de águas subterrâneas (Al-Mrayat *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022). As preocupações com o impacto ambiental do tratamento convencional de lodo levaram a uma mudança na atenção ao conteúdo energético dos resíduos, e o lodo agora é considerado uma fonte de energia (Xaba *et al.*, 2022).

O tratamento de lodo é um empreendimento de engenharia difícil devido ao seu volume crescente e aos riscos potenciais à saúde e ao meio ambiente associados a este tipo de resíduo sólido orgânico. O tratamento de lodo representa mais de 50% dos custos operacionais totais de um processo de tratamento de águas residuais. A redução, reutilização e reciclagem são os princípios fundamentais da gestão de lodo (Lin *et al.*, 2020). A utilização do lodo de esgoto como fonte de energia renovável é considerada uma opção ideal, pois pode fornecer cerca de 10% da energia mundial (Gu *et al.*, 2020; Naqvi *et al.*, 2021).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2024) apesar de sua reputação de nação emergente, o Brasil precisa urgentemente melhorar sua taxa de tratamento de esgoto, apenas 50,8% do esgoto no país é tratado.

Com isso, espera-se que o volume de lodo de esgoto produzido diariamente pelas estações de tratamento de efluentes nacionais, aumente, mas devido às suas propriedades nocivas, esse lodo requer tratamento adequado e gerenciamento cuidadoso (Languer *et al.*, 2020).

Em resposta a essa problemática, a pirólise em comparação com outras tecnologias de processamento de lodo de esgoto, tem as vantagens de ser uma reação rápida, ter baixa emissão, fácil imobilização de metais pesados, fácil controle e aumento de escala de produção. A pirólise pode transformar o lodo de esgoto orgânico em produtos valiosos que são simples de armazenar, transportar e utilizar (Li *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2021). Desde o ano de 2020, uma empresa de base científico-tecnológica vem promovendo pioneiramente o tratamento completo e conversão em bioprodutos como biochar, biogás e bio-óleo, por processo de engenharia de pirólise, utilizando como matéria-prima lodos de ETE e ETA oriundos de representativas cidades da Paraíba.

2.4 PIRÓLISE

A conversão termoquímica da biomassa tem potencial para produzir biocombustíveis, uma abordagem sustentável que garante o atendimento das necessidades futuras sem comprometer os recursos existentes (Alves *et al.*, 2019). A pirólise tem recebido grande atenção como uma técnica de conversão termoquímica para converter matérias-primas de biomassa em materiais ricos em carbono de alto desempenho (Mumbach *et al.*, 2019; Zhang, P. *et al.*, 2020; Zhang, Y. *et al.*, 2020).

A pirólise é um processo de decomposição térmica de materiais sólidos em altas temperaturas, realizado sob uma atmosfera inerte, sem a presença de oxigênio, é uma reação endotérmica que converte a matéria-prima em três componentes: um produto sólido (biochar), vapor condensável (bio-óleo) e gases não condensáveis com alto valor energético (Barry *et al.*, 2019). O volume dos produtos irá depender principalmente dos parâmetros operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento, duração, volume de biomassa e presença de gás inerte (Hai *et al.*, 2021).

A eficácia do processo de pirólise depende principalmente do tipo de biomassa e das variáveis envolvidas. Entre os produtos da pirólise, espera-se que o bio-óleo seja um combustível direto no futuro. A mistura de gases de pirólise pode ser empregada diretamente para fins energéticos. O biochar produzido pode ser usado para melhorar as propriedades do solo ou como combustível (Kumar *et al.*, 2020).

A pirólise tem um grande valor para a matriz energética, por exemplo, produtos líquidos e gasosos podem ser empregados como combustível, e produtos sólidos podem ser empregados como carvão, sorventes e materiais de construção (Ran *et al.*, 2019). É considerado um método eficaz de tratamento de lodo de esgoto por ser um processo termoquímico. O procedimento também facilita a redução significativa do volume de lodo de esgoto em uma faixa de temperatura de 350 - 700 °C (Yue *et al.*, 2019).

Devido à sua simplicidade e eficácia, a pirólise foi reconhecida como um método viável de conservação e utilização do recursos lodo de esgoto (Wang *et al.*, 2019). A pirólise tem um efeito significativo no tratamento de contaminantes difíceis de eliminar como patógenos, resíduos orgânicos (microplásticos, por exemplo), hidrocarbonetos e outros contaminantes que ainda não foram descobertos podem ser eliminados em altas temperaturas (Huang; Mohamed; Li, 2022). É considerado um método promissor de tratamento de esgoto

por causa de seus benefícios, incluindo um tempo de resposta rápido, estrutura compacta, reduz o volume de resíduos e estabiliza metais pesados (Liu, Yang *et al.*, 2020b).

2.4.1 Classificação do processo de pirólise

Existem vários tipos de pirólise, geralmente classificados de acordo com a taxa de aquecimento, temperatura e tempo de residência no reator, como pirólise lenta (carbonização e convencional), pirólise intermediária, pirólise rápida e pirólise *flash*, (Gu *et al.*, 2019). Os processos citados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2. Condições operacionais comuns e rendimentos dos processos de pirólise primária.

Processo	Temperatura (°C)	Taxa de Aquecimento (°C/s)	Residência	Tamanho da Partícula na Alimentação (mm)	Referência
Carbonização	< 400	0,1 a 1	Dias	5 a 50	(Arun <i>et al.</i> , 2022)
Convencional	400 a 600	0,1 a 1	30 min - Horas	5 a 50	(Sekar <i>et al.</i> , 2021)
Intermediária	500 a 650	10 a 100	5 - 10 min	0,5	(Zimmer <i>et al.</i> , 2022)
Rápida	450 a 800	100 a 1000	1 - 10 Seg	< 1	(Yang, C. <i>et al.</i> , 2019)
<i>Flash</i>	1000	1000 a 2500	0,1 - 0,5 Seg	< 0,1	(Vuppaladadiyam <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Autoria própria (2024).

A pirólise lenta é o processo de pirólise que ocorre em temperaturas mais baixas, o que leva a taxas de aquecimento mais lentas e períodos de tempo mais longos para sólidos. Residências mais longas resultam em alterações químicas secundárias nos produtos primários, o que faz com que a produção de coque aumente. A lenta taxa de pirólise e os longos períodos de residência das matérias-primas facilitam a produção de carvão (Harussani *et al.*, 2022).

A pirólise intermediária produz uma porcentagem semelhante dos produtos, carvão, gás e óleo. A pirólise intermediária é apropriada para processar materiais com tamanhos de partícula pequenos e teor de umidade que não exceda 40%. O procedimento produz pouco ou nenhum alcatrão. O biocarvão pirolítico intermediário é apropriado como fertilizante e condicionador de solo. O óleo de pirólise tem alto valor calorífico e baixo teor de umidade (Bieniek *et al.*, 2022).

A pirólise rápida é normalmente utilizada para produzir a máxima quantidade de bio-óleo, pois o menor tempo de permanência dos produtos voláteis no reator evita que ocorra um grande número de efeitos negativos que resultarão em menor quantidade de bio-óleo produzido. A alta temperatura e a alta velocidade na taxa de aquecimento são exigidas na reação, no qual a matéria-prima é introduzida como pequenas partículas, geralmente menores que 2 mm, que se decompõem rapidamente em temperaturas mais altas. Finalmente, o vapor é convertido em um combustível líquido (bio-óleo) (Sun; Norouzi; Mašek, 2022).

A pirólise *flash* é uma reação extremamente acelerada. No entanto, embora a velocidade seja essencial para o processo, ela também depende muito do método pelo qual o calor e a massa são transferidos através do material. Semelhante a pirólise rápida, a pirólise *flash* também produz um óleo a partir da decomposição da substância, seguida de resfriamento e condensação. A pirólise produz principalmente vapor, bem como uma pequena quantidade de carbono (Rumaihi *et al.*, 2022).

2.4.2 Bio-Óleo

O bio-óleo (também conhecido como alcatrão ou água de pirólise) derivado da pirólise é tipicamente composto por múltiplos compostos orgânicos, cuja composição e quantidade variam dependendo da fonte do resíduo pirolisado e do processo empregado (Hu, Y. *et al.*, 2020).

O bio-óleo normalmente tem duas fases: uma fase orgânica e uma fase aquosa. A fase orgânica da fase são compostos aromáticos e alifáticos, incluindo alcanos, alcenos, derivados de benzeno, fenóis, cetonas, aldeídos e nitrilas. A fase aquosa é composta principalmente de água e oxigenados polares como ácidos carboxílicos, amidas, aldeídos e traços de álcoois (Udayanga *et al.*, 2019).

Alguns estudos voltados para a utilização de diferentes tipos de bio-óleo são difundidos na literatura especializada. Pode-se destacar o seguinte relevante trabalho, no qual os autores sintetizaram bio-óleo da pirólise de *Pistacia Lentiscus*, e chegaram a conversões de rendimento máximo de bio-óleo em 63,86%, que foi obtido a uma temperatura de 475 °C (Farissi; Talhaoui; Bachiri, 2022).

A produção de bio-óleo a partir da pirólise pode variar significativamente dependendo do tipo de processo de pirólise utilizado (Lu *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020).

Na Tabela 3 estão listados uma comparação entre os diferentes tipos de pirólise e os percentuais típicos de bio-óleo que cada um pode gerar.

Tabela 3. Porcentagem de bio-óleo por reação de pirólise.

Processo	Bio-óleo (%)	BioChar (%)	Gases (%)	Referência
Carbonização	Menor que 30	35 - 45	Menor que 15	(Brindhadevi <i>et al.</i> , 2021)
Convencional	30 - 40	20 - 35	15 - 25	(Yrjälä; Ramakrishnan; Salo, 2022)
Intermediária	40 - 50	20 - 35	20 - 30	(Arantes <i>et al.</i> , 2023)
Rápida	60 - 75	10 - 15	10 - 20	(Mishra <i>et al.</i> , 2023)
Flash	75 a 80	10 - 20	5 - 10	(Yogalakshmi <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Autoria própria (2024).

Esses valores são típicos e podem variar dependendo da biomassa utilizada, das condições operacionais específicas, e da tecnologia de pirólise empregada.

Ao desenvolver tecnologias para converter matéria-prima renovável em combustíveis convencionais, uma economia baseada em energia sustentável pode ser alcançada sem exigir a adaptação da infraestrutura atual a uma nova fonte de energia (Mularski; Li, 2023).

Por outro lado, o desenvolvimento de tecnologias necessita de bastante embasamento científico, e, neste sentido, um estudo bibliométrico e sistêmico utilizando o método Proknow-C representa uma importante ferramenta para aprofundar a compreensão sobre o estado da arte dentro do tema que abrange bio-óleo pirolítico obtido de ETE. E isto se deve ao fato de que a utilização do método citado permite identificar e analisar um portfólio de artigos difundidos sobre o tema, revelando as principais contribuições científicas e destacando lacunas na literatura. Ademais, um levantamento sistemático de publicações é fundamental para mapear o conhecimento existente e orientar futuras pesquisas e inovações tecnológicas na área, buscando aprimorar a conversão de biomassa em combustíveis e, conseqüentemente, avançar em direção a uma economia mais sustentável e de baixo carbono.

2.4.3 Método Proknow-C

Para selecionar combinações bibliográficas relevantes e reconhecidas por pesquisas científicas e determinar o estágio atual do conhecimento sobre um determinado campo da ciência, é necessário revisar a literatura acadêmica sobre o tema que se deseja investigar.

O ProKnow-C oferece uma abordagem estruturada para a seleção e análise da literatura, garantindo que a revisão seja abrangente e focada nas fontes mais relevantes e de maior impacto. Isso é especialmente importante em áreas de pesquisa complexas e dinâmicas, como a produção de bio-óleo por pirólise de lodo de esgoto, onde a qualidade e a relevância das fontes são cruciais para o desenvolvimento de soluções eficazes e inovadoras (Sanabria *et al.*, 2022).

Ao seguir o método ProKnow-C, pesquisadores podem assegurar que suas revisões de literatura sejam rigorosas e bem fundamentadas, proporcionando uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimento tecnológico (Guignone *et al.*, 2023; Vieira *et al.*, 2019). O ProKnow-C tem sido utilizado pela comunidade científica para pesquisas qualitativas sobre um determinado tema (Roger; Alfonso; Pedregosa, 2018; Vaz; Selig; Viegas, 2019; Warke *et al.*, 2021).

Este método é dividido em 4 (quatro) blocos estruturais: seleção e filtragem de artigos, bibliometria, análise sistemática e identificação de lacunas na literatura (Lacerda; Ensslin; Ensslin, 2012).

No método Proknow-C, o primeiro estágio, conhecido como a etapa da seleção de portfólio, estabelece as diretrizes para a seleção de um conjunto de publicações significativas para a pesquisa. O segundo estágio envolve uma análise bibliométrica descritiva, que inclui a avaliação de variáveis como o número de artigos publicados por ano, por periódico ou por autor, além das referências mais citadas. O terceiro estágio consiste em uma revisão sistemática tradicional dos artigos selecionados no portfólio. Por fim, o quarto estágio utiliza as informações dos estágios anteriores para formular novas questões de pesquisa, destacando-se como uma síntese e extensão dos resultados obtidos anteriormente. (Carvalho *et al.*, 2020).

Em relação a esta primeira etapa bibliométrica, os artigos são selecionados para facilitar o processo de revisão e busca em bases de dados de materiais científicos. Assim, primeiro, são definidos um tópico e as palavras-chave mais representativas ao tema a ser investigado. Em seguida, seleciona-se uma base de dados para a busca de publicações científicas utilizando uma série de filtros para gerar correspondências entre os registros bibliográficos mais relevantes para o tema requerido. Depois, o significado e a importância dos artigos recuperados devem ser avaliados e os seus respectivos resumos (Souza *et al.*, 2022).

o Proknow-C é originalmente organizado em termos de um fluxograma com diversos subprocessos que posteriormente podem ser organizados em 2 sequências e um total de 9 fases, apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Seleção de portfólio bibliométrico.

Investigação preliminar	1) Definição de palavras-chave.
	2) Definição de bancos de dados.
	3) Busca de artigos nas bases de dados com as palavras-chave.
	4) Aplicação de teste de aderência de palavras-chave (a descoberta de outras palavras-chaves importantes exige o reinício de toda a sequência de investigação preliminar).
Filtragem de portfólio	5) Eliminação de artigos repetidos.
	6) Alinhamento pela leitura do título.
	7) Alinhamento conforme o reconhecimento científico, por exemplo, número de citações e artigos recentes.
	8) Alinhamento pela leitura do resumo.
	9) Alinhamento pela leitura completa dos artigos.

Fonte: Adaptado de Lacerda; Ensslin; Ensslin, 2012.

Desta maneira, a análise bibliométrica e sistêmica do tema bio-óleo pirolítico obtido de ETE, realizada por meio do método Proknow-C, foi essencial para revelar o panorama detalhado do estado da arte na área. No item metodológico foram descritos detalhadamente os critérios e processos utilizados na seleção e análise dos artigos, bem como as ferramentas e técnicas aplicadas para garantir a robustez e a relevância dos resultados obtidos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ETAPA 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO E SISTÊMICO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DE LODO DE ETE

3.1.1 Método de pesquisa e filtragem do banco de artigos que envolvem o tema

Nesta etapa, foram selecionados os artigos para facilitar o processo de revisão e a busca em bases de dados que difundem trabalhos científicos.

Primeiramente, foram definidas as palavras-chave mais representativas ao tema deste presente trabalho. Seguidamente, foram adotadas as bases de dados para a busca de publicações científicas utilizando uma série de filtros para gerar correspondências entre os registros bibliográficos mais relevantes sobre bio-óleo pirolítico oriundo de ETE. Posteriormente, o significado e a importância dos artigos recuperados foram avaliados e lidos os seus respectivos resumos.

3.1.2 Seleção e filtragem do banco de dados pelo método ProKnow-C

1. Definição das palavras-chave que envolvem o tema em questão

Para determinar as palavras-chave mais apropriadas, é essencial analisar aquelas que apresentam maior relevância e coerência com o tema proposto.

Os eixos de pesquisa escolhidos são fundamentais para estudar a produção de bio-óleo devido às suas especificidades e impactos em cada etapa da conversão de biomassa.

Na área de energias renováveis, por exemplo, o processo de seleção dos artigos pode ser iniciado com a identificação dos seguintes eixos gerais de pesquisa adotados e apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Eixos de pesquisa.

Eixos	Pesquisa
Eixo 1	Matéria-prima
Eixo 2	Processo
Eixo 3	Produto

Fonte: Autoria própria (2024).

Para cada eixo, foram definidas palavras-chave estratégicas com o objetivo de cobrir extensivamente os artigos pertinentes ao objeto de estudo, conforme descrito no Quadro 3.

Quadro 3. Palavras-chave definidas em função dos eixos condizentes ao tema do trabalho.

Eixo	Palavras-chave
Eixo 1	<i>Sewage-sludge</i>
	<i>Sewage sludge</i>
	<i>Sewage</i>
Eixo 2	<i>Pyrolysis</i>
Eixo 3	<i>Bio-oil</i>
	<i>Biooil</i>
	<i>Bio oil</i>

Fonte: Autoria própria (2024).

Para organizar eficientemente a busca na literatura, empregou-se operadores *booleanos* como parte essencial da estratégia de pesquisa.

O operador "AND" foi utilizado para conectar palavras-chave de eixo diferentes formando *strings* de acordo com a Equação (1) e o operador "OR" foi aplicado para agrupar diversas combinações de *strings*, de acordo com a Equação (2).

$$\text{String} = \text{Eixo 1 AND Eixo 2 AND Eixo 3} \quad (1)$$

$$\text{String 1 OR String 2 OR String 3 OR ... OR String 9} \quad (2)$$

A seleção de palavras-chave em torno do tema em questão para os diferentes eixos considerados e supracitados no Quadro 3, gerou um número de 9 *strings* de pesquisa, conforme detalhado no Quadro 4.

Quadro 4. *Strings* de pesquisa gerado a partir da seleção de palavras-chave do tema para os diferentes eixos.

<i>Strings</i>	Eixo 1	Eixo 2	Eixo 3
1	<i>Sewage-sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio-oil</i>
2	<i>Sewage sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio-oil</i>
3	<i>Sewage</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio-oil</i>
4	<i>Sewage-sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Biooil</i>
5	<i>Sewage sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Biooil</i>
6	<i>Sewage</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Biooil</i>
7	<i>Sewage-sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio oil</i>
8	<i>Sewage sludge</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio oil</i>
9	<i>Sewage</i>	<i>Pyrolysis</i>	<i>Bio oil</i>

Fonte: Autoria própria (2024).

II. Definição das bases de dados para o levantamento do portfólio de artigos do tema

As bases de dados utilizadas na finalidade de buscas dos artigos que envolvem o tema bio-óleo pirolítico de ETE foram a Web of Science e Scopus; essas bases são reconhecidas e utilizadas mundialmente, o que significa que as suas publicações indexadas têm uma visibilidade global, aumentando as chances de serem citadas por outros pesquisadores, além de terem passado em revisões por pares.

III. Buscas de artigos nas bases de dados Scopus e Web of Science

As strings de busca foram aplicadas nas bases de dados Web of Science e Scopus, focando nos títulos, resumos e palavras-chave, resultando na criação de um banco de documentos inicial. Os resultados das buscas estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5. Quantitativo de documentos encontrados utilizando as *strings* de buscas.

Base de Artigos	Número de Documentos
Web of Science	716
Scopus	231
Banco de documentos inicial	947

Fonte: Autoria própria (2024).

O primeiro processo de filtragem de artigo foi realizado como segue descrito:

- 1) Foram excluídos artigos de revisão, capítulos de livro, artigo de conferência, deixando apenas artigo de pesquisa como documento principal do portfólio;
- 2) Optou-se pelo inglês como idioma principal do portfólio, excluindo-se publicações em outros idiomas.

Os resultados dos primeiros filtros estão descritos no Quadro 6.

Quadro 6. Primeiro filtro aplicado.

Filtro Aplicado	Documentos Excluídos
Filtro - Tipo de documento	244
Filtro - Idioma do artigo	5
Total de documentos excluídos	249

Fonte: Autoria própria (2024).

IV. Testes de Aderência das Palavras-Chaves

Não foram encontradas palavras-chave alternativas para testar a aderência daquelas que foram adotadas. Diante disso, optou-se por utilizar as palavras-chave iniciais na análise.

V. Filtragem do banco bruto de artigos quanto a redundância

Esta etapa tem como objetivo eliminar artigos duplicados que foram recuperados durante a busca inicial. Utilizando ferramentas de *software* ou técnicas manuais de comparação de títulos e DOI, identificaram-se e removeram-se os artigos duplicados.



Desta maneira, após a remoção das redundâncias, o banco de dados foi reduzido para 582 artigos únicos.

VI. Filtragem do banco bruto de artigos quanto alinhamento do título

Este filtro foi aplicado com o objetivo de avaliar se os títulos dos artigos estão diretamente relacionados ao tema de interesse.

Uma análise detalhada dos títulos dos 582 artigos foi realizada para verificar a relevância e o alinhamento com o tema de produção de bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto.

Artigos cujos títulos não estavam claramente alinhados com o tema foram inicialmente rejeitados.

Dos 582 artigos, 65 foram aprovados com base no alinhamento dos títulos.



No entanto, dos 517 artigos inicialmente rejeitados, uma análise mais aprofundada das palavras-chave permitiu recuperar 40 artigos adicionais.



Assim, ao final dessa etapa, 105 artigos foram considerados potencialmente relevantes.

VII. Filtragem do banco de artigos não repetidos considerando o seu reconhecimento científico e com títulos alinhados ao tema

A aplicação deste filtro foi para identificar os artigos mais influentes e relevantes, considerando o reconhecimento científico.

Ao aplicar a regra de Pareto (80/20), verificou-se que 80% do total de citações foi atribuído a 20% dos artigos. Entre os 105 artigos relevantes identificados na etapa IV, 37 artigos concentraram 80% das citações totais, e, por isso, foram selecionados para inclusão no portfólio final.



Dos 65 artigos restantes, constatou-se que 25 foram publicados nos últimos dois anos (2022 e 2023), ressaltando sua relevância atual e pertinência temporal no campo de estudo.



Os autores dos 37 artigos que representam 80% das citações foram identificados e compilados em um banco de dados de autores. Com base nesse banco, avaliou-se a relevância dos autores dos 43 artigos restantes, resultando na seleção de 15 artigos cujos autores estavam incluídos nesse banco de autores.



Ao final desta etapa, um total de 77 artigos foram considerados cientificamente relevantes.

VIII. Filtragem do banco de artigos quanto ao resumo

Este filtro foi aplicado com o objetivo de avaliar se os resumos dos artigos selecionados estavam alinhados com o tema da produção de bio-óleo pirolítico de lodo de esgoto.

Os resumos dos 77 artigos foram analisados detalhadamente para verificar a pertinência e o alinhamento com o tema em questão. Artigos cujos resumos não apresentavam um claro alinhamento com o tema, foram rejeitados.

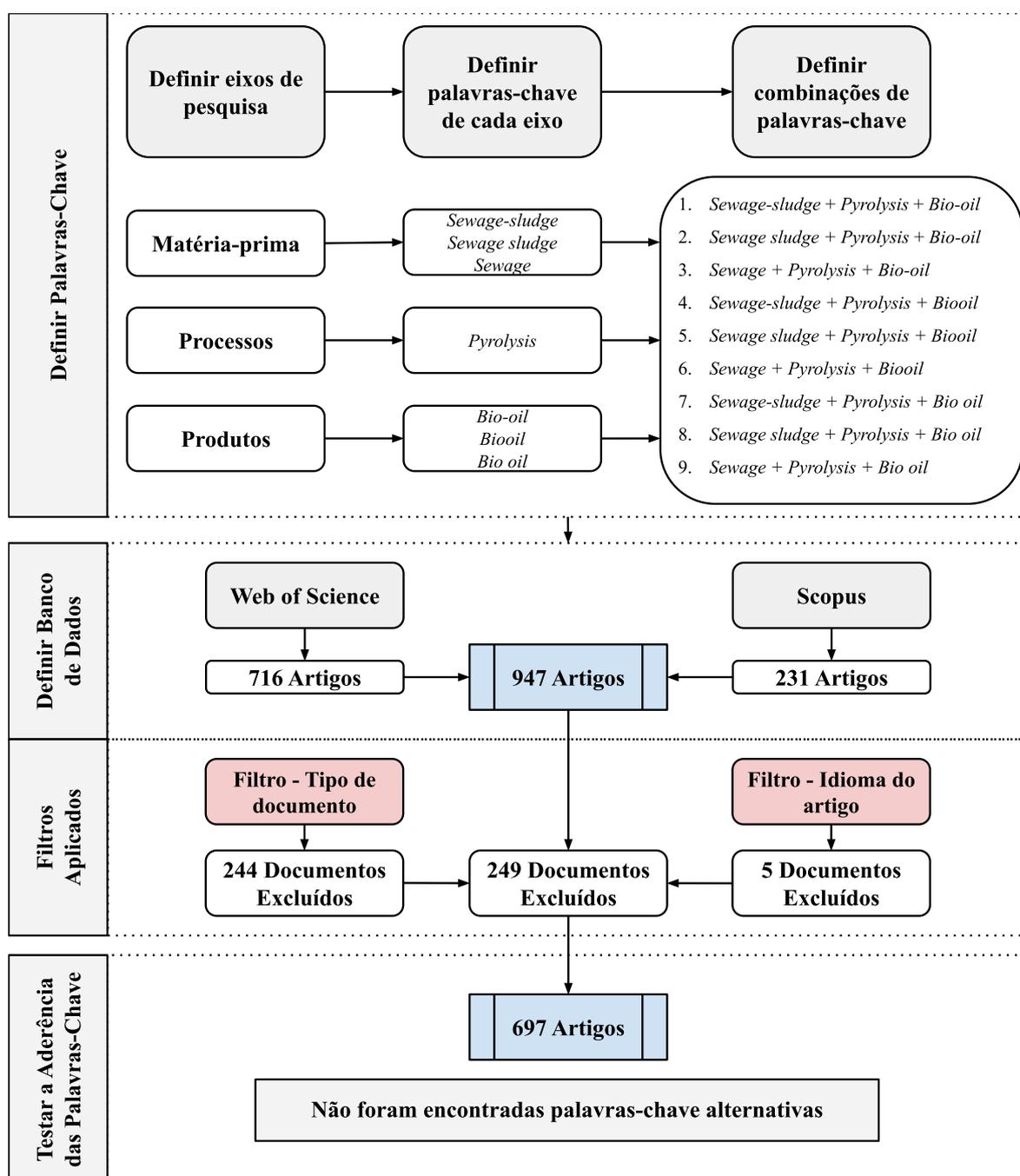
Dos 77 artigos, 52 apresentaram resumos que estavam claramente alinhados com o tema da pesquisa, confirmando sua pertinência para o portfólio final.



IX. Filtragem do banco de artigos quanto a leitura integral

Ao final das etapas seguidas referentes ao método ProKnow-C, o portfólio bibliográfico foi refinado de 947 artigos iniciais para 52 artigos altamente relevantes e alinhados com o tema da produção de bio-óleo a partir da pirólise de lodo de esgoto.

Este processo garantiu a construção de um portfólio robusto e cientificamente reconhecido, proporcionando uma base sólida para uma análise bibliométrica. Na Figura 2 está apresentado um fluxograma das etapas do método ProKnow-C, detalhando o processo de seleção e filtragem de artigos.



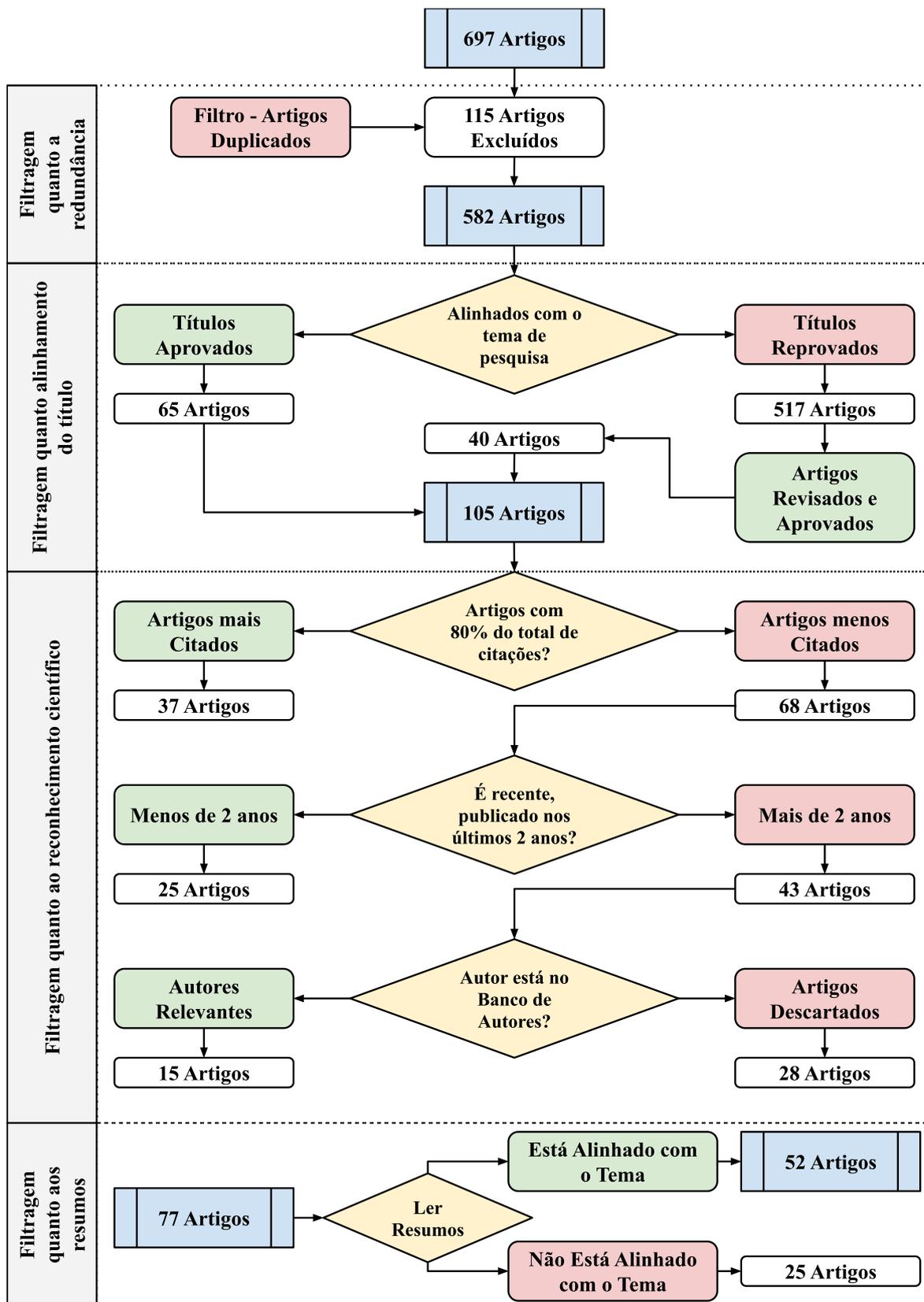


Figura 2. Fluxograma do método Procknow-C.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.1.3 Análise bibliométrica do banco de dados bibliográfico final

Esta nova etapa envolveu as seguintes análises descritas:

I – Portfólio Final de Artigos:

- **Autores:** Foram identificados e analisados os principais autores que contribuem significativamente para a pesquisa na área de produção de bio-óleo por pirólise de lodo de esgoto, avaliando suas afiliações e colaborações.
- **Periódicos:** Foram identificadas as revistas científicas mais influentes e de maior impacto no campo.
- **Palavras-chave:** As palavras-chave utilizadas nos artigos foram analisadas para identificar os principais temas e tendências da pesquisa em questão, bem como para entender as áreas de foco dentro do tópico de estudo.
- **Países Mais Relevantes:** A origem dos estudos foi mapeada para identificar os países que estão na vanguarda da pesquisa sobre pirólise de lodo de esgoto, destacando aqueles com maior número de publicações e contribuições significativas.

3.1.4 Análise sistêmica do banco de dados bibliográfico final

I – Análise do Portfólio Final de Artigos:

- **Barreiras Encontradas:** Procedeu-se com a identificação dos principais obstáculos técnicos, operacionais e econômicos relatados nos artigos, como a variabilidade na composição do lodo, a necessidade de controle rigoroso das condições de pirólise e a gestão de emissões tóxicas.
- **Resultados Apresentados:** Avaliação dos resultados obtidos em cada estudo, destacando os rendimentos de bio-óleo, a qualidade dos produtos gerados e as eficiências energéticas alcançadas.
- **Dificuldades na Aplicação das Técnicas de Pirólise:** Investigação das complicações enfrentadas durante a implementação das técnicas de pirólise, como o ajuste dos parâmetros operacionais e a integração de pré-tratamentos para melhorar a qualidade do bio-óleo.

3.2 ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÕES DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODOS DE ETE

Duas amostras de bio-óleo derivadas de lodo de esgoto foram obtidas por meio de um processo de pirólise realizado a temperaturas médias de 350 °C. Estas amostras foram estudadas e caracterizadas para avaliar seu potencial energético como biocombustível alternativo e renovável. As amostras de bio-óleo foram produzidas em escala piloto por uma microempresa de base científico-tecnológica da Paraíba, que desenvolve tecnologia de pirólise para a sanitização de lodos de ETE e ETA e sua conversão em bioprodutos de alto valor agregado, cuja atuação foi validada também para lodos do estado do Paraná e do Distrito Federal. Além disso, para este estudo, duas amostragens do lodo de esgoto *in natura* foram coletadas nas estações de tratamento de esgoto de Campina Grande e João Pessoa, a coleta em uma das ETEs é apresentada na Figura 3, contando com o apoio logístico de transporte da UFPB, sendo analisadas com o objetivo de comparar o poder calorífico entre a matéria-prima de origem e o produto final.

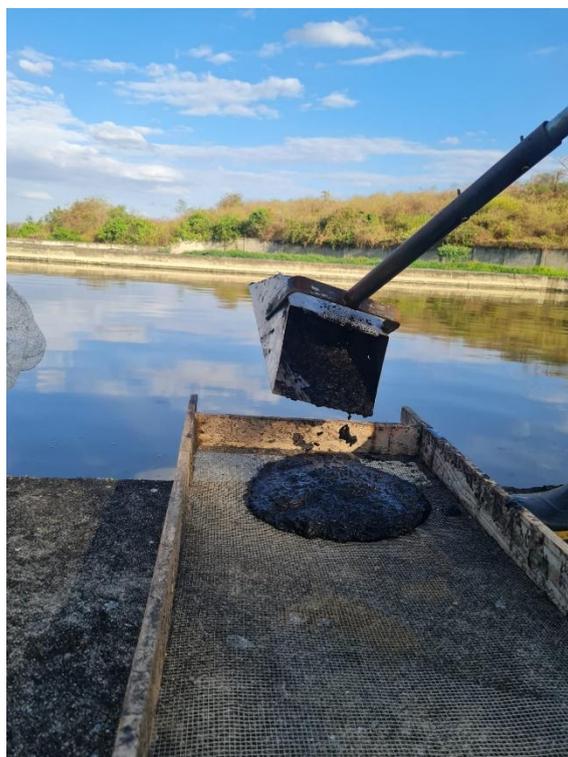


Figura 3. Coleta de Lodo de Esgoto.

Fonte: Autoria própria (2023).

As amostras de bio-óleo foram nomeadas de BOCG (bio-óleo derivado do lodo de esgoto de Campina Grande - PB) e BOJP (bio-óleo derivado do lodo de esgoto de João Pessoa - PB). Da mesma forma, as amostras de lodo de esgoto foram denominadas LCG (lodo de esgoto de Campina Grande - PB) e LJP (lodo de esgoto de João Pessoa - PB). Na Figura 4 está um registro fotográfico de uma amostra do Bio-óleo estudado.



Figura 4. Amostra de Bio-óleo.

Fonte: Autoria própria (2024).

3.2.1 Análise de pH do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE

As medições de pH dos bio-óleos BOCG e BOJP foram realizadas utilizando o analisador de pH AK95, que é conhecido por sua precisão e capacidade de fornecer leituras consistentes em uma ampla gama de amostras líquidas. Antes de iniciar as medições, o AK95 foi calibrado para garantir precisão nos resultados. O processo de calibração seguiu as especificações do fabricante, utilizando soluções tampão com valores de pH conhecidos de 4, 7 e 10. A calibração foi verificada após ajustes iniciais para assegurar que o equipamento mantivesse a precisão ao longo do período de teste.

As amostras foram homogeneizadas e climatizadas à temperatura ambiente (25°C) para garantir consistência nas leituras de pH. Para cada medição, uma amostra de 10 mL de

combustível foi transferida para o eletrodo do AK95. O tempo de resposta para estabilização do eletrodo foi de aproximadamente 30 segundos após a imersão na amostra, conforme recomendado pelo manual do equipamento. Após a estabilização, o valor do pH foi registrado. Este procedimento foi repetido três vezes para cada amostra para garantir a reprodutibilidade dos dados. Esta análise foi realizada no Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos (LabFilm) do CEAR/UFPB.

3.2.2 Densidade e grau API do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE

Foi empregada uma metodologia detalhada para determinar a densidade dos bio-óleos BOCG e BOJP utilizando técnicas gravimétricas e volumétricas. A análise foi realizada em condições controladas de laboratório, com a temperatura mantida constante a 21 °C. A densidade foi calculada a partir da relação entre a massa e o volume do bio-óleo, medidos com precisão usando um béquer de 10 mL e uma balança analítica. Os dados coletados foram analisados e comparados com literatura pertinente, proporcionando dados valiosos para aplicações práticas e teóricas das amostras do bio-óleo em questão. Esta análise foi realizada no LabFilm/CEAR/UFPB.

Também procedeu-se com cálculos para conhecimento do Grau API (American Petroleum Institute) do bio-óleo pirolítico.

O Grau API é uma medida que indica a densidade relativa de petróleo e derivados líquidos em relação à água. Ele é utilizado para caracterizar se um petróleo é leve, médio ou pesado. O cálculo é realizado usando a Equação (3):

$$\text{API} = \frac{141,5}{\text{Densidade específica}} - 131,5 \quad (3)$$

em que a densidade específica é a relação entre a densidade do petróleo e a densidade da água, de acordo com a Equação (4).

$$\text{Densidade específica} = \frac{\text{Densidade do líquido}}{\text{Densidade da água}} \quad (4)$$

Segundo a Petrobrás (2009), visando corrigir o Grau API na temperatura medida para a temperatura padrão de 60 °F, utiliza-se a Equação (5):

$$\text{API Corrigido} = \text{API Calculado} + \frac{60 - T}{10} \quad (5)$$

API Corrigido = Grau API corrigido para temperatura padrão;

API Calculado = Grau API calculado na temperatura medida na análise de densidade;

T = temperatura medida na análise de densidade.

3.2.3 Poder calorífico do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE

A análise do poder calorífico das amostras de bio-óleo BOCG e BOJP, e das amostras dos lodos *in natura* LCG e LJP foram realizadas utilizando o calorímetro de bomba IKA C200. Cada amostra foi pesada utilizando uma balança analítica com precisão de 0,0001 g para garantir a exatidão nas medidas de poder calorífico. Este procedimento foi conduzido em condições controladas com excesso de oxigênio (O₂) e uma pressão de 30 bar, facilitando a combustão completa das amostras. O calor liberado durante a combustão foi quantificado em Joules por grama. Para assegurar a precisão e a consistência dos resultados, cada medição foi realizada em triplicata. O poder calorífico de cada amostra foi comparado entre si e com valores da literatura.

Esta análise foi realizada no Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LABMAQ) do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

3.2.4 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) dos bio-óleos BOCG e BOJP foi realizada utilizando o espectrômetro FTIR IR Prestige 21 da Shimadzu. As amostras foram analisadas na faixa de espectro de 4000 a 500 cm⁻¹. Uma pequena quantidade de cada amostra de bio-óleo foi aplicada diretamente na célula de amostra do equipamento. O tratamento dos dados incluiu a correção de linha de base e a normalização dos estiramentos para permitir comparações quantitativas entre as amostras. Para cada espectro, as principais bandas foram identificadas e suas intensidades foram analisadas. A presença de grupos funcionais específicos foi correlacionada com as vias de decomposição térmica da biomassa e a formação de produtos durante a pirólise.

Esta análise foi realizada no Laboratório de Combustíveis e Materiais (LACOM) da UFPB.

3.2.5 Análise termogravimétrica do bio-óleo pirolítico oriundo de lodo de ETE

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) das amostras BOCG e BOJP foi conduzida utilizando um aparelho TA Instruments, modelo SDT650. A fim de investigar o comportamento da decomposição térmica da matéria orgânica, as análises foram realizadas em uma atmosfera de nitrogênio, utilizando suporte de alumina e uma vazão de gás de arraste de 100 mL/min. As taxas de aquecimento utilizadas foram de 5, 10 e 15°C/min, partindo da temperatura (ambiente) até 800 °C. Esta análise foi realizada no LabFilm/CEAR/UFPB.

3.2.5.1 Metodologia para o Estudo Cinético a partir da Análise Térmica

O estudo das amostras BOCG e BOJP utilizou a análise termogravimétrica (TG) para examinar a decomposição térmica do bio-óleo e determinar os parâmetros cinéticos, incluindo a energia de ativação. A seleção da região de estudo nas curvas TG e DTG baseou-se na primeira região de decomposição. O início desta região é marcado como 0% de conversão e o final como 100% de conversão, permitindo uma análise detalhada da decomposição do material.

Neste estudo, a energia de ativação (E_a) foi determinada usando o método não isotérmico de Flynn e Wall (ASTM E 1641) ou em taxas de aquecimento constante. Esse método emprega dados integrais das curvas TG em diferentes taxas de aquecimento (β) (5, 10 e 15 °C/min). A energia de ativação é estimada para cada grau de conversão (α), definido como a variação de massa na amostra. Os graus de conversão (α) são calculados com base na diferença entre a massa inicial e final da amostra, conforme registrado nas curvas TG. Para o cálculo da conversão utilizou-se a Equação 6.

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_0 - m_\infty} \quad (6)$$

α é a conversão;

m_0 é a massa inicial da amostra;

m_∞ é a massa da amostra no final do estágio em estudo;

m_t é a massa da amostra que varia com o tempo (t) ou Temperatura (T).

As temperaturas correspondentes a cada grau de conversão são identificadas através da curva de perda de massa. A energia de ativação de Arrhenius é calculada plotando a razão do logaritmo da taxa de aquecimento ($\log \beta$) *versus* o inverso da temperatura absoluta ($1/T$) para diferentes níveis de conversão. Utilizando as curvas TG/DTG, seleciona-se a região de estudo e calcula-se a conversão (α) em função da temperatura (T) para todas as taxas de aquecimento, determinando as temperaturas absolutas para cada conversão.

A energia de ativação pelo método Flynn e Wall faz uso do Método dos Mínimos Quadrados (Regressão Linear) para se determinar a inclinação da reta, $\Delta(\log \beta) / \Delta(1/T)$. Portanto, a energia de ativação estimada (E_{ae}) pode ser calculada por meio da Equação (7), empregando-se o valor da inclinação da reta ($\Delta(\log \beta) / \Delta(1/T)$) e fixando o valor de B em 0,457 e $R = 8,3$ (Doyle, 1962).

$$E_{ae} = -\frac{R}{B} * \frac{\Delta(\log \beta)}{\Delta(1/T)} \quad (7)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

ETAPA 1 – ESTUDO BIBLIOMÉTRICO E SISTÊMICO SOBRE A PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODO DE ETE

4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DO PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO FINAL E DE SUAS REFERÊNCIAS

O aumento no número de publicações ao longo dos anos reflete tanto os avanços tecnológicos quanto o crescente reconhecimento da importância da pirólise como uma solução sustentável para a gestão de resíduos e recuperação de energia. A análise das tendências de publicação pode ajudar a identificar os períodos de maior inovação e os tópicos emergentes na área, além de orientar futuros esforços de pesquisa e desenvolvimento.

O portfólio final, resultante das etapas de busca e filtragem, incluem 52 artigos sobre a aplicação do processo de pirólise no tratamento de lodo de esgoto e aproveitamento do bio-óleo, sendo todos descritos no Quadro 7. Os artigos são classificados por sua importância científica, que é baseada no número de citações.

Quadro 7. Artigos selecionados no portfólio final.

Títulos	Referências	Citações
Avaliação técnica e econômica da pirólise de lodo de esgoto para a produção de bio-óleo	(Kim; Parker, 2008)	280
Estudo dos líquidos de pirólise obtidos de diferentes lodos de esgoto	(Fonts <i>et al.</i> , 2009)	229
Copirólise rápida de lodo de esgoto e biomassa lignocelulósica em reator de leito cônico de jorro	(Alvarez <i>et al.</i> , 2015)	175
Pirólise catalítica rápida assistida por micro-ondas de lodo de esgoto para produção de bio-óleo	(Xie <i>et al.</i> , 2014)	160
Estudo de bio-óleos e sólidos da pirólise <i>flash</i> de lodos de esgoto	(Pokorna <i>et al.</i> , 2009)	158
Uma revisão sobre pirólise de biomassa rica em proteínas: transformação de nitrogênio	(Leng <i>et al.</i> , 2020)	138
Estimativa de um novo método para produzir bio-óleo a partir de lodo de esgoto por pirólise de micro-ondas considerando eficiência e segurança	(Tian <i>et al.</i> , 2011)	108
Produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto seco por pirólise rápida em reator de leito	(Arazo <i>et al.</i> , 2017)	107

fluidizado aquecido eletricamente		
Especiação e avaliação de risco ambiental de metais pesados em bio-óleo proveniente da liquefação/pirólise de lodo de esgoto	(Yuan <i>et al.</i> , 2015)	100
Influências das condições de pirólise na produção e composição química dos bio-óleos provenientes da pirólise rápida de lodo de esgoto	(Huang <i>et al.</i> , 2014)	97
Caracterização do bio-óleo obtido por pirólise rápida de lodo de esgoto em um reator de leito jorrante cônico	(Alvarez <i>et al.</i> , 2016)	94
Fracionamento e identificação de espécies de nitrogênio orgânico do bio-óleo produzido por pirólise rápida de lodo de esgoto	(Cao <i>et al.</i> , 2010a)	83
Características da fase superior do bio-óleo obtido a partir da copirólise de lodo de esgoto com madeira, colza e palha	(Samanya <i>et al.</i> , 2012)	83
Influência da temperatura de pirólise na distribuição de produtos do lodo de esgoto, bio-óleo e propriedades do carvão vegetal	(Trinh <i>et al.</i> , 2013)	83
Caracterização de resíduos de óleos de pirólise intermédios derivados para utilização como combustíveis para motores diesel	(Yang <i>et al.</i> , 2013)	77
Recuperação de óleos com alto valor calórico e baixo teor de contaminantes por pirólise de lodo de esgoto digerido e seco contendo flocculantes poliméricos	(Park; Kang; Kim, 2008)	75
Produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto: uma revisão sobre a conversão térmica e catalítica por pirólise	(Haghighat <i>et al.</i> , 2020)	65
Caracterização do bio-óleo a partir da pirólise por indução-aquecimento de lodos de esgoto de processamento de alimentos utilizando análise cromatográfica	(Tsai <i>et al.</i> , 2009a)	61
Aumento de escala do processo de aquecimento por micro-ondas para a produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto	(Lin; Chen; Liu, 2012)	56
Copirólise catalítica de lodo de esgoto e casca de arroz sobre catalisador de biochar: melhoramento de bio-óleo e mecanismo catalítico	(Qiu <i>et al.</i> , 2020)	52
Pirólise supercrítica de água de lodo de esgoto	(Ma <i>et al.</i> , 2017)	52
Avaliação comparativa do ciclo de vida de processos de pirólise para produção de bio-óleo,	(Huang; Mohamed; Li, 2022)	51

biocarvão e carvão ativado a partir de lodo de esgoto		
Investigação da distribuição de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em lodo de esgoto de águas residuárias e seus bio-óleos de pirólise resultantes	(Hu <i>et al.</i> , 2014)	46
Pirólise de lodo de esgoto para produção de biocombustíveis sustentáveis e biocarvão de valor agregado	(Ghodke <i>et al.</i> , 2021)	43
Produção de bio-óleo com baixos teores de oxigênio e nitrogênio por pré-tratamento hidrotérmico combinado e pirólise de lodo de esgoto	(Liu, Yali <i>et al.</i> , 2020)	42
Efeito de catalisadores na distribuição de hidrocarbonetos policíclico-aromáticos (HPAs) em bio-óleos provenientes da pirólise de lodo de esgoto desidratado em altas e baixas temperaturas	(Hu <i>et al.</i> , 2019)	38
Investigação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) formados em produtos trifásicos a partir da pirólise de lodo de esgoto de águas residuárias	(Hu, Y. <i>et al.</i> , 2020)	36
Avaliação da produção de biodiesel a partir de bio-óleo derivado de lodo de esgoto	(Arazo; De Luna; Capareda, 2017)	35
Formação de triacetonamina em um bio-óleo a partir de pirólise rápida de lodo de esgoto utilizando acetona como solvente de absorção	(Cao <i>et al.</i> , 2010b)	34
Níveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos nos bioóleos da pirólise por indução-aquecimento de lodos de esgoto de processamento de alimentos	(Tsai <i>et al.</i> , 2009b)	31
Caracterização de bio-óleo e biocarvão a partir da pirólise a alta temperatura de lodo de esgoto	(Chen <i>et al.</i> , 2015)	31
Reforma Termocatalítica de Fluxos de Resíduos de Biomassa	(Conti <i>et al.</i> , 2017)	27
Copirólise de lodo de esgoto municipal e microalga <i>Chlorella Vulgaris</i> : Otimização de produtos; estudo termocinético e modelagem de redes neurais artificiais	(Khodaparasti <i>et al.</i> , 2022)	22
Comportamento de distribuição e avaliação de risco de metais em bio-óleos produzidos por liquefação/pirólise de lodo de esgoto	(Leng <i>et al.</i> , 2015)	13
Copirólise de lodo de esgoto e serragem de pinus: efeito sinérgico e características do bio-óleo	(Bai <i>et al.</i> , 2023)	8

Viabilidade econômica da produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto através da pirólise	(Xin <i>et al.</i> , 2018)	7
Copirólise ótima de lodo de esgoto municipal e microalgas <i>Chlorella Vulgaris</i> : caracterização de produtos, efeitos sinérgicos, mecanismo e vias de reação	(Khodaparasti <i>et al.</i> , 2023)	7
Conversão catalítica a baixa temperatura de bio-óleo de lodo de esgoto alcalino em biodiesel: características do produto e mecanismos de reação	(Arazo <i>et al.</i> , 2021)	5
Otimização do lodo primário de esgoto e da lignite de carvão por pirólise assistida por micro-ondas para a produção de bio-óleo	(Xaba <i>et al.</i> , 2022)	5
Copirólise de lodo de esgoto com biomassa lignocelulósica e algal para produção sustentável de combustíveis líquidos e gasosos: avaliação do ciclo de vida e análise técnico-econômica	(Mohamed; O'Boyle; Li, 2023)	5
Reforma catalítica de produtos de pirólise de lamas de depuração sobre o carvão auto-derivado	(Bai <i>et al.</i> , 2022)	3
Efeitos da pré-digestão biológica de lamas de depuração processadas por pirólise rápida no rendimento de bio-óleo e na toxicidade do biochar	(Merdun <i>et al.</i> , 2023)	2
Avanço da aplicação do líquido de pirólise (bio-óleo) através da melhoria das suas propriedades de combustível por reforma termo-catalítica	(Khan <i>et al.</i> , 2022)	2
Análise do carácter e da composição das fracções de destilação do óleo de pirólise de lamas de depuração	(Ji <i>et al.</i> , 2013)	1
Melhoria do óleo de pirólise derivado de lamas de depuração através de hidrotreatamento com catalisadores à base de NiMo	(Sukhorukov <i>et al.</i> , 2024)	0
Pirólise por micro-ondas de lodo de esgoto para produção de bio-óleo: efeitos de componentes e mecanismos orgânicos	(Liu <i>et al.</i> , 2024)	0
Comparação e Otimização da Composição do bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto e microalgas <i>Spirulina</i>	(Hematkhah; Majidian; Hallajisani, 2023)	0
Correção crucial do método de Faix para a determinação de carbonilas em bio-óleos de pirólise e liquefação hidrotérmica com alto teor de nitrogênio	(Šiman <i>et al.</i> , 2023)	0
Produção e otimização de bio-óleo a partir de	(Haghighat <i>et al.</i> , 2022)	0

lodo de efluentes municipais por processo de pirólise térmica e catalítica		
Pirólise termocatalítica de lodo de esgoto e análise técnico-econômica: efeito de zeólitas sintéticas e catalisadores de origem natural	(Csutoras; Miskolczi, 2024)	0
Copirólise de resíduos de microalgas e lodo de esgoto: uma caracterização aprofundada da cinética, dos condutores e dos comportamentos gás-óleo-carvão	(Kumar <i>et al.</i> , 2024)	0
Copirólise de lodo de esgoto com resíduos agrícolas/florestais: uma avaliação comparativa do ciclo de vida	(Mohamed <i>et al.</i> , 2024)	0

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 5 está ilustrada a evolução do número de publicações anuais sobre bio-óleo de pirólise do lodo de esgoto, desde 2008 até 2024.

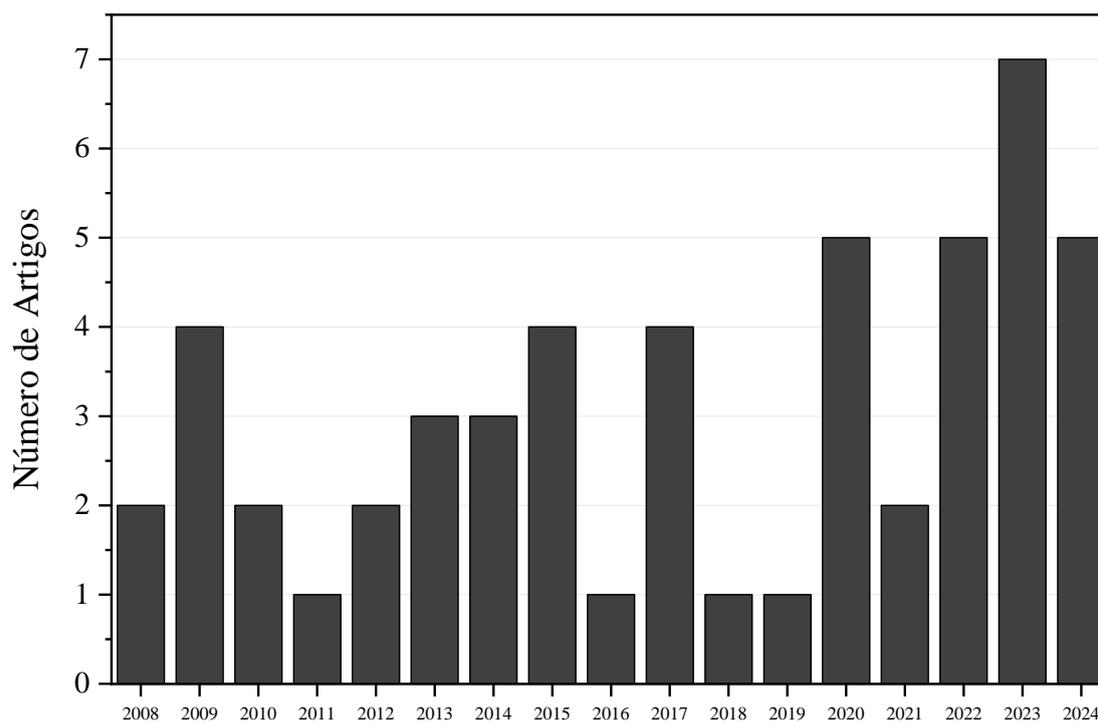


Figura 5. Distribuição anual de artigos do portfólio final entre 2008 e 2024.

Fonte: autoria própria (2024).

O aumento no volume de publicações sugere que a comunidade científica está dedicando mais atenção a essa tecnologia, indicativo de descobertas inovadoras e avanços no campo.

O aumento significativo nas publicações sobre bio-óleo de pirólise de 2020 a 2024, que representa 48,08% do total de publicações sobre este tema, reflete um crescimento notável em relação aos anos anteriores. Esse aumento pode ser atribuído a uma série de fatores. Primeiramente, há um crescente interesse global por fontes de energia renováveis, motivado pelas mudanças climáticas e pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Adicionalmente, avanços significativos na tecnologia de pirólise podem ter melhorado a eficiência e a viabilidade econômica desses processos. Por fim, o aumento do financiamento para pesquisas em energia renovável e o fortalecimento de políticas governamentais de apoio também têm desempenhado um papel crucial no estímulo ao estudo e ao desenvolvimento do bio-óleo.

Observa-se um pico significativo no número de publicações em 2023, o maior durante o período analisado, o que pode refletir um avanço tecnológico recente ou um aumento na visibilidade e interesse pela tecnologia de pirólise para a produção de bio-óleo. Considerando que esta análise foi realizada em maio de 2024 e, até o momento, foram registrados dois artigos a menos em comparação ao total de 2023, com isso é plausível que o ano de 2024 ainda possa alcançar ou até superar o número de publicações de 2023.

Existem algumas flutuações notáveis na quantidade de artigos publicados, essas flutuações podem ser influenciadas por diversos fatores, incluindo ciclos de financiamento para pesquisa, mudanças nas prioridades de pesquisa, ou até mesmo desenvolvimentos tecnológicos específicos que impulsionaram o interesse em certos anos.

O interesse contínuo e o crescimento no número de publicações podem indicar uma maturação da tecnologia de pirólise, destacando seu potencial para se consolidar como uma alternativa viável e sustentável, tanto na produção de biocombustíveis quanto como produção de matéria-prima.

Em relação a análise realizada sobre os autores e coautores que mais publicaram sobre bio-óleo de pirólise, observa-se uma interessante distribuição de contribuições, como observado na Figura 6.

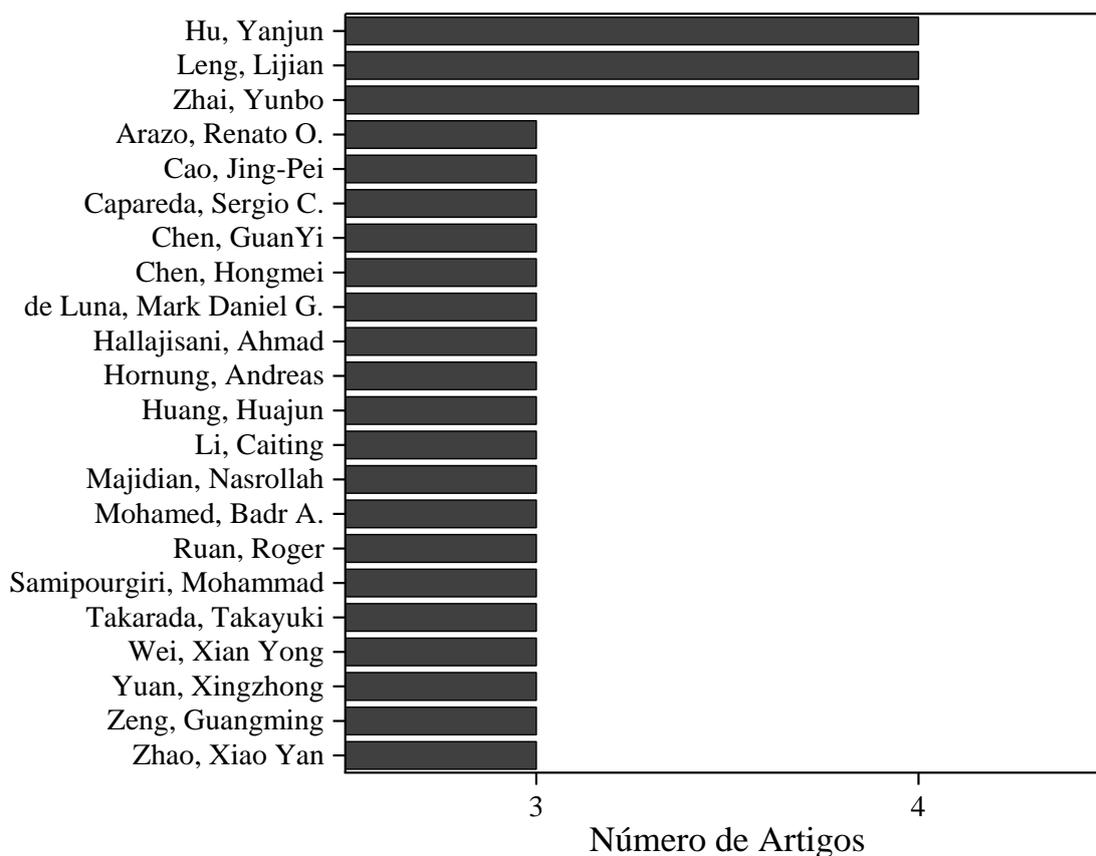


Figura 6. Número de artigos dos autores e coautores que mais aparecem no portfólio final.

Fonte: Autoria própria (2024).

Zhai Yunbo, Leng Lijian e Hu Yanjun se destacam como os três principais autores, cada um com um total de 4 artigos, o que sugere uma liderança ou especialização notável nesta área. Eles são seguidos por outros autores proeminentes que publicaram 3 artigos cada, indicando uma atividade intensa e uma possível colaboração mútua.

Na Figura 7, observa-se que quanto maior o círculo associado a um autor, maior é o número de suas conexões com outros autores ou coautores, indicando uma ampla rede de colaboração. As linhas que interligam os círculos representam coautoria, enquanto as diferentes cores das linhas podem indicar variados tipos de colaborações entre eles.

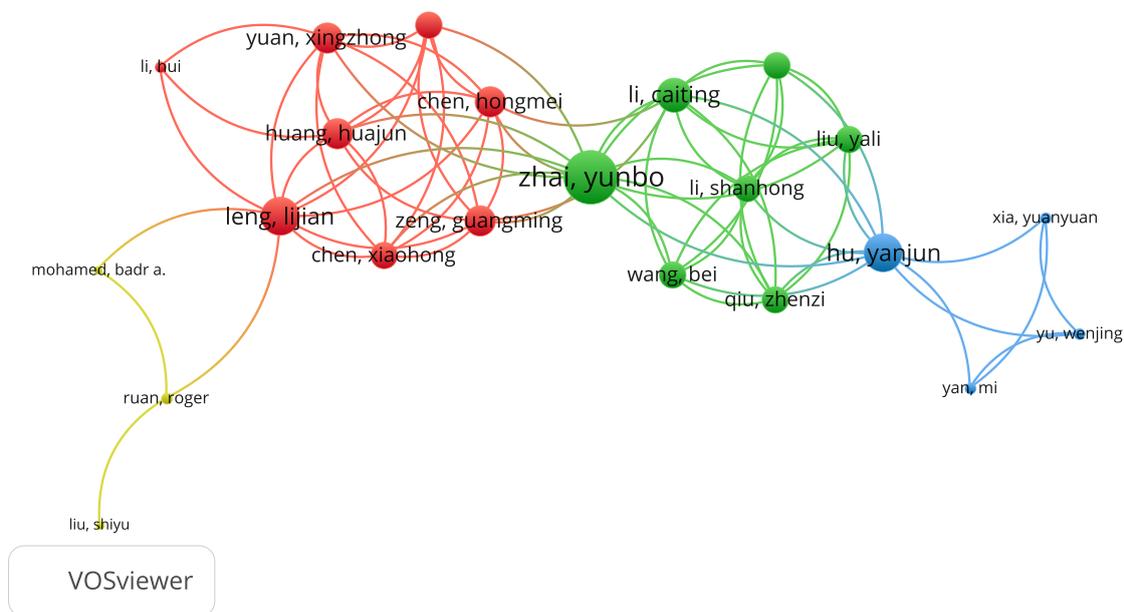


Figura 7. Principal rede de coautoria do portfólio final.

Fonte: Autoria própria (2024).

As conexões entre os principais autores demonstram que Zhai, Yunbo; Leng, Lijian e Hu, Yanjun atuam como pontos centrais de ligação entre as redes de pesquisa, facilitando colaborações e potencialmente liderando projetos de pesquisa conjuntos.

- O grupo vermelho; liderado por Leng, Lijian; possui muitas conexões internas, sugerindo uma colaboração frequente dentro deste grupo.
- O grupo verde; centrado em Zhai, Yunbo; também mostra uma alta densidade de conexões, indicando uma comunidade de pesquisa coesa e possivelmente uma colaboração intensa em projetos comuns.
- O grupo azul; liderado por Hu, Yanjun; é menos denso, com menos autores, mas ainda assim mostra conexões significativas entre eles, sugerindo um nível moderado de colaboração.

A presença de múltiplos grupos indica que existem diversas abordagens e focos de pesquisa dentro do campo do bio-óleo de pirólise. Essa diversidade é benéfica para o avanço da área, pois permite a exploração de várias soluções e melhorias tecnológicas.

Os periódicos com maior número de artigos sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Número de artigos sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto, por periódico.

Periódicos	Artigos	Qualis
Bioresource technology	8	A1
Journal of analytical and applied pyrolysis	8	A2
Fuel	4	A1
Energy & fuels	3	A1
Waste management	3	A1
Environmental technology	2	A1
Fuel processing technology	2	A1
Journal of chemical and petroleum engineering	2	A1
Science of the total environment	2	A1
Applied energy	1	A1
Biocatalysis and agricultural biotechnology	1	A3
Biomass conversion and biorefinery	1	A4
Chemosphere	1	A1
Energy	1	A1
Energy conversion and management	1	A1
Energy sources, part a: recovery, utilization, and environmental effects	1	A4
Energy technology	1	A2
Environmental science and pollution research	1	A2
Environmental technology & innovation	1	A2
Journal of business research	1	A1
Journal of environmental management	1	A1
Journal of hazardous materials	1	A1
Renewable & sustainable energy reviews	1	A1
Resources conservation and recycling	1	A1
Sustainable Energy Technologies and Assessments	1	A2
Sustainable environment research	1	A1
Thermal science	1	A1

Fonte: Autoria própria (2024).

A análise dos periódicos mostra que a pesquisa sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto é publicada em uma variedade de fontes, desde periódicos altamente especializados,

como o Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, até periódicos mais amplos, como Bioresource technology. A diversidade de fontes indica um campo de pesquisa interdisciplinar, com contribuições significativas de áreas como biotecnologia, engenharia química e gestão ambiental.

A nuvem de palavras mostra as palavras-chave que aparecem com mais frequência em artigos relacionados à produção de bio-óleo a partir da pirólise. A análise dessas palavras-chave permite entender as áreas de foco e os tópicos mais discutidos na literatura científica.

Na Figura 8 estão ilustradas as 21 palavras-chave mais utilizadas pelos autores presentes no portfólio final, sendo que a mais comum foi "*pyrolysis*", utilizada 20 vezes, seguida de "*sewage*" por 11 vezes, "*bio-oil*" por 8 vezes e "*sewage-sludge*" por 7 vezes.

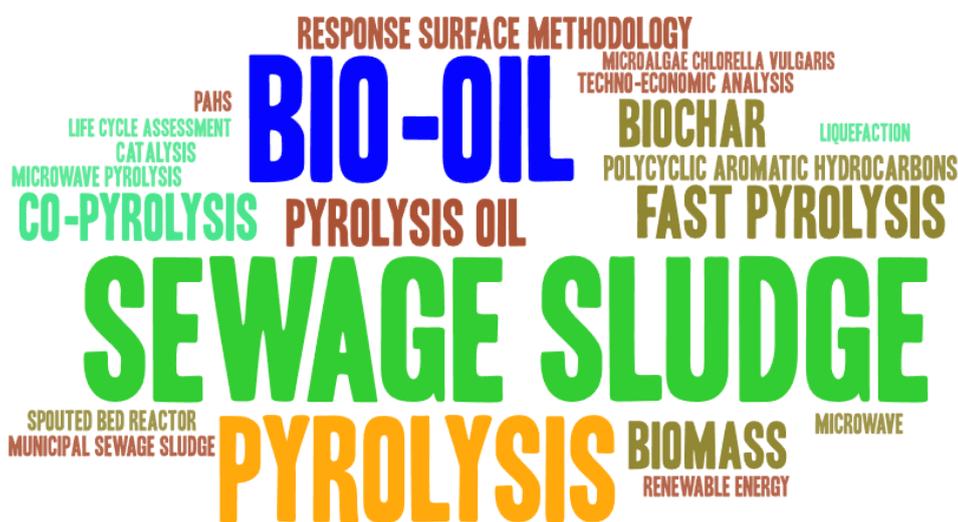


Figura 8. Palavras-chave que aparecem com mais frequência na base final de artigos sobre bio-óleo de pirólise de lodo de esgoto.

Fonte: Autoria própria (2024).

A nuvem de palavras revela que a pesquisa sobre bio-óleo de pirólise está focada principalmente no processo de pirólise em si, na utilização de lodo de esgoto como matéria-prima, e na caracterização e melhoria dos produtos resultantes, principalmente bio-óleo e biochar.

A ênfase em termos como pirólise, lodo de esgoto, bio-óleo e catalisadores, reflete a busca por soluções sustentáveis e eficientes para a gestão de resíduos e produção de energia renovável. As palavras-chave relacionadas a técnicas analíticas, como temperatura e catalisadores, indicam um foco em otimizar e entender melhor a produção e as propriedades

do bio-óleo. Essa análise ajuda a identificar as tendências atuais e as áreas de maior interesse na pesquisa de bio-óleo de pirólise.

Tem-se que um total de 20 países foram encontrados na análise geográfica do portfólio final de artigos, conforme ilustrado na Figura 9.

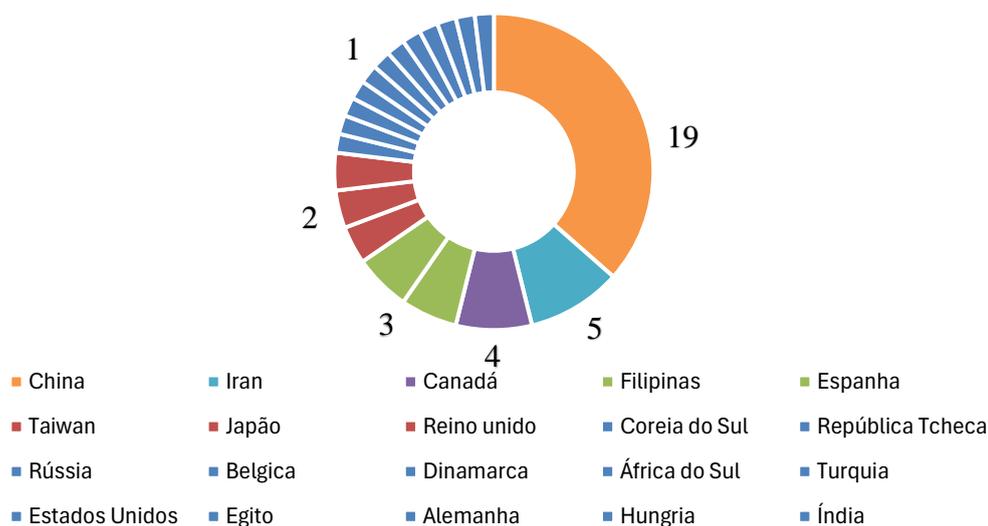
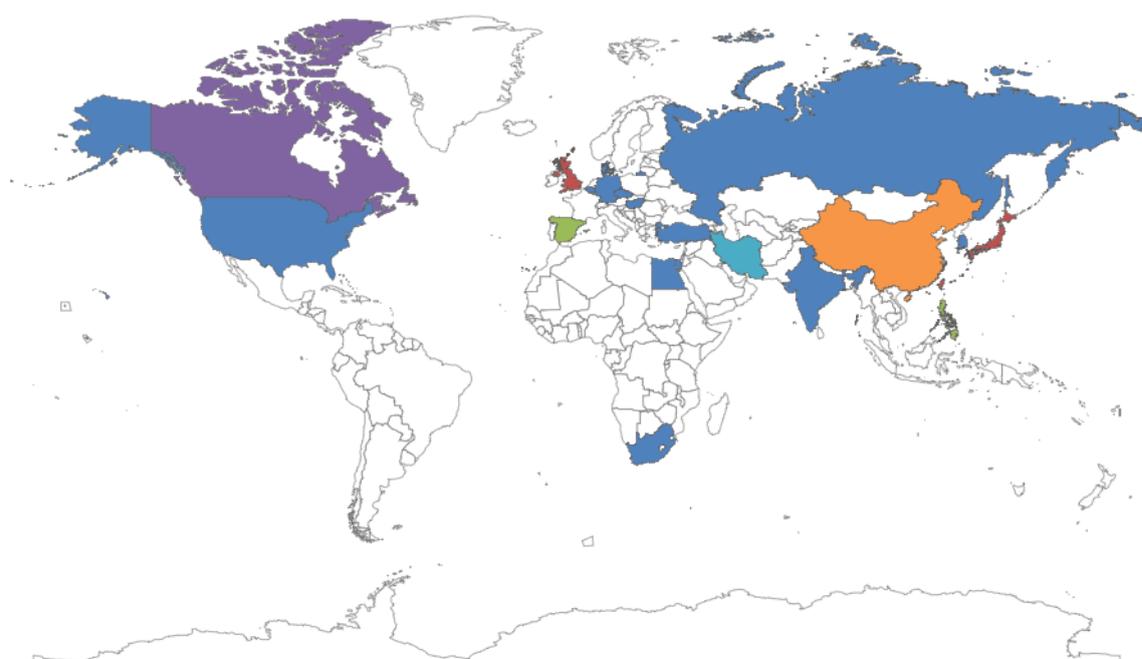


Figura 9. Distribuição geográfica do número de publicações científicas dedicadas à aplicação do processo de pirólise no tratamento de lodo de esgoto e produção de bio-óleo de 2006 a 2024.

Fonte: Autoria própria (2024).

A China lidera com 19 publicações, mostrando um forte foco em pesquisa sobre bio-óleo de pirólise. Esse interesse pode ser atribuído ao vasto investimento do país em energias renováveis e tecnologias de conversão de resíduos.

Com 5 publicações, o Irã também mostra um interesse significativo. A pesquisa nesse campo pode estar relacionada aos esforços do país para diversificar suas fontes de energia e gerenciar resíduos de forma mais eficiente.

O Canadá, com sua forte base em pesquisa científica e recursos naturais, pode estar explorando a pirólise como uma solução sustentável.

As Filipinas e a Espanha, por sua vez, podem estar focadas na gestão de resíduos e desenvolvimento de tecnologias verdes.

O Brasil não aparece como um dos países com publicações significativas sobre bio-óleo de pirólise. Isso pode indicar que a produção científica brasileira nesse campo específico ainda é limitada ou não está suficientemente destacada em relação aos outros países mencionados. A ausência do Brasil nos gráficos pode ser vista como um indicador de que há espaço para crescimento e desenvolvimento no campo da pirólise para produção de bio-óleo.

Quando é acrescentado palavras-chave Brasil, Nordeste e Paraíba na pesquisa, não são encontrados artigos referentes ao tema em questão, isto então demonstra uma lacuna nesta área e ressalta a relevância do tema presente nesta dissertação, especialmente iniciando-se no Estado da Paraíba.

4.2 ANÁLISE SISTÊMICA

Após a seleção do portfólio bibliográfico e a realização da análise bibliométrica dos artigos, procedeu-se à análise sistêmica do portfólio final com o objetivo de identificar os pontos em comum, enfatizando os métodos aplicados e examinando as diferentes dificuldades encontradas, bem como os impactos positivos e negativos em cada pesquisa selecionada.

4.2.1 Relatório Final da Análise Sistêmica

A produção de bio-óleo por pirólise de lodo de esgoto apresenta diversos pontos em comum, desafios e estratégias de mitigação. A variabilidade na composição do lodo e a complexidade do processo são obstáculos significativos. Assim, como a necessidade de pré-tratamentos para melhorar a qualidade do bio-óleo e reduzir a toxicidade do biochar. Apesar disso, os benefícios são consideráveis, incluindo a redução do volume de resíduos, a

produção de compostos químicos valiosos e a criação de biochar rico em carbono, que pode ser utilizado para melhorar o solo.

Os pontos negativos incluem a toxicidade do bio-óleo, emissões tóxicas e altos custos operacionais, que necessitam de soluções eficazes.

Dentre os desafios enfrentados estão a otimização das condições de pirólise, a gestão de emissões e o transporte de biomassa.

Para superar esses desafios, várias estratégias foram implementadas com sucesso. A implementação de turbinas a gás para a recuperação de energia mostrou-se eficaz, utilizando o calor gerado para a secagem do lodo. Além disso, a integração de tecnologias como pré-tratamentos biológicos, incluindo a digestão aeróbica, tem demonstrado melhorar a qualidade do bio-óleo e reduzir a toxicidade do biochar.

ETAPA 2 – CARACTERIZAÇÕES DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO ORIUNDO DE LODOS DE ETE

4.3 ANÁLISE DE pH DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM

O pH é uma medida que indica o quão ácida ou básica uma substância é em uma escala de 0 a 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam acidez e valores acima de 7 indicam basicidade (Erdogdu; Polat; Ozbay, 2019).

Os resultados apresentados mostram as medições de pH para as amostras de bio-óleos estudadas, identificadas como BOCG e BOJP, com 3 (três) amostras para cada tipo, como é observado na Tabela 5.

Tabela 5. pH do bio-óleo pirolítico de lodo de estação de tratamento de esgoto.

Combustíveis	pH	Referências
Amostra 1 - BOCG	9.22	(Autoria própria, 2024)
Amostra 2 - BOCG	9.08	(Autoria própria, 2024)
Amostra 3 - BOCG	8.91	(Autoria própria, 2024)
Amostra 1 - BOJP	8.83	(Autoria própria, 2024)
Amostra 2 - BOJP	8.77	(Autoria própria, 2024)
Amostra 3 - BOJP	8.68	(Autoria própria, 2024)

Fonte: autoria própria (2024).

Todos os valores de pH apresentados são básicos da escala (acima de 7). Isso indica que todas as amostras do bio-óleo pirolítico em questão têm características alcalinas.

As amostras de BOCG mostram uma tendência de redução gradual no pH, de 9.22 na Amostra 1 para 8.91 na Amostra 3. As amostras BOJP também mostram uma redução no pH de uma amostra para outra, começando em 8.83 e indo para 8.68. A variação de pH entre as amostras é um pouco menor em comparação com a categoria BOCG, sendo observado um percentual de apenas 1.70% quando comparadas as amostras Amostra 1 - BOCG e Amostra 3 - BOCG. Porém, de forma geral, para todas as amostras estudadas, não foram observadas variações significativas de pH.

A maior alcalinidade desses combustíveis pode ser uma vantagem em termos de redução de corrosão nos componentes do sistema de combustível. No entanto, pode também resultar em desafios únicos, como maior propensão a formar depósitos alcalinos nos

componentes do motor, afetando potencialmente a eficiência e a vida útil do motor (Patil; Singh; Kumar, 2024).

Vale destacar que as amostras estudadas são de bio-óleos brutos, podendo-se inferir desta forma, e que processos adicionais como purificação e refino, podem contornar este desafio. A consistência no controle de pH observada nas amostras BOCG e BOJP pode refletir um processo de fabricação que mantém uma qualidade uniforme, o que é vantajoso para os consumidores e fabricantes de motores.

4.4 DENSIDADE DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM

Na Tabela 6, tem-se uma visão detalhada sobre as densidades de diferentes tipos de combustíveis e das amostras de bio-óleo BOCG e BOJP, sendo um aspecto fundamental na indústria de energia e transporte.

Tabela 6. Densidade do bio-óleo pirolítico comparado a diferentes combustíveis.

Combustíveis	Densidades (Kg/m³)	Referências
BOCG	838	(Autoria própria, 2023)
BOJP	842	(Autoria própria, 2023)
Petróleo	820 a 950	(ANP, 2023)
Biodiesel	850 a 900	(ANP, 2022c)
Querosene	771,3 a 836,6	(ANP, 2021)
Diesel	815 a 850	(ANP, 2022a)
Gasolina A*	715	(ANP, 2022b)

Fonte: autoria própria (2024).

Gasolina A*: é a produzida nas refinarias ou petroquímicas e não possui etanol.

As densidades dos bio-óleos estão na faixa inferior do espectro do petróleo bruto. As densidades de ambos os bio-óleos estão próximas do limite inferior da faixa de densidade do biodiesel, e dentro do limite do diesel.

A densidade mais elevada, em comparação com a gasolina e o querosene, pode sugerir que o bio-óleo pirolítico investigado precisará de condições similares ao diesel em termos de armazenamento e transporte.

As densidades do bio-óleo (BOCG e BOJP) são bastante comparáveis ao petróleo, indicando um potencial uso substitutivo em aplicações que requerem combustíveis fáceis de manusear.

4.4.1 Grau API do bio-óleo pirolítico dos lodos ETE de origem

As categorias do Grau API que definem o petróleo como leve, médio, pesado, ou extra leve são amplamente utilizadas na indústria do petróleo para classificar diferentes tipos de petróleo bruto baseados na sua densidade. Essas categorias são padronizadas pela American Petroleum Institute (API), que é a organização que desenvolveu a escala do Grau API (Farah, 2012).

O Grau API ajuda a categorizar os petróleos e seus derivados, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7. Classificação do grau API.

API	Classificação
$API \geq 40$	Extra leve
$40 > API \geq 33$	Leve
$33 > API \geq 27$	Médio
$27 > API \geq 19$	Pesado
$19 > API \geq 15$	Extrapesado
$API < 15$	Asfáltico

Fonte: (Farah, 2012).

Grau API de bio-óleos pirolíticos permite comparar diretamente suas propriedades físicas com as do petróleo e seus derivados. Isso é importante para a integração de bio-óleos em infraestruturas e processos já estabelecidos para combustíveis fósseis.

Para calcular o Grau API para as amostras BOJP e BOCG foi utilizada a Equação (3).

$$API = \frac{141,5}{\text{Densidade específica}} - 131,5$$

Calculou-se o Grau API para as amostras usando suas densidades, calculadas experimentalmente, sendo elas:

$$BOCG = 838 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

$$\text{BOJP} = 842 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

Em seguida, procedeu-se com a conversão da densidade para a sua densidade específica:

$$\text{Densidade específica da amostra BOCG} = \frac{838}{1000} = 0,838$$

$$\text{Densidade específica da amostra BOJP} = \frac{842}{1000} = 0,842$$

Aplicando-se a fórmula do Grau API, tem-se então que:

$$\text{API BOCG} = \frac{141,5}{0,838} - 131,5 = 37,35$$

$$\text{API BOJP} = \frac{141,5}{0,842} - 131,5 = 36,55$$

Corrigindo-se os valores para a temperatura de 69,8 Fahrenheit, medidos para 60 Fahrenheit padrão, fez-se uso da Equação (5).

$$\text{API Corrigido} = \text{API medido} + \frac{60 - T}{10}$$

$$\text{API Corrigido BOCG} = 37,35 + \frac{60 - 69,8}{10} = 36,37^\circ$$

$$\text{API Corrigido BOJP} = 36,55 + \frac{60 - 69,8}{10} = 35,57^\circ$$

As amostras BOCG e BOJP, com Graus API de aproximadamente 36,37° e 35,57°, respectivamente, são classificadas como leves.

Isso pode indicar que o bio-óleo pirolítico avaliado possui menor densidade e são mais fluidos em comparação com os tipos mais pesados de petróleo, podendo ser mais facilmente processado em produtos refinados de alta qualidade. Essas características podem

classificar este biocombustível alternativo em produtos valiosos no mercado e mais eficientes em termos de custos de transporte e refinamento (Farah, 2012).

4.5 PODER CALORÍFICO DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO E DOS LODOS ETE DE ORIGEM

Ao analisar o poder calorífico, pode-se confirmar a quantidade de energia liberada na forma de calor durante os processos termoquímicos, com isso, verifica-se o potencial energético do bio-óleo. Pesquisas demonstraram que o óleo que é pirolisado, normalmente tem um alto poder calorífico, o que o torna uma alternativa potencial ao combustível fóssil (Djandja *et al.*, 2020).

O poder calorífico das amostras de bio-óleo gerado da conversão do lodo de esgoto sanitário (BOCG e BOJP), produzidas por pirólise a uma temperatura entre 300 e 400°C, foram analisadas, e os respectivos resultados observados na Tabela 8.

Tabela 8. Poder calorífico do bio-óleo pirolítico de lodo de ETE.

Amostras	Poder Calorífico (J.g ⁻¹)	Referências
1 - BOCG	39.752,00	(Autoria própria, 2024)
2 - BOCG	39.406,00	(Autoria própria, 2024)
3 - BOCG	39.868,00	(Autoria própria, 2024)
1 - BOJP	39.250,00	(Autoria própria, 2024)
2 - BOJP	42.349,00	(Autoria própria, 2024)
3 - BOJP	40.924,00	(Autoria própria, 2024)
1 - LCG	11.683,00	(Autoria própria, 2024)
2 - LCG	12.658,00	(Autoria própria, 2024)
1 - LJP	11.381,00	(Autoria própria, 2024)
2 - LJP	11.088,00	(Autoria própria, 2024)
Petróleo	42.634,96	(ANP, 2023)
Biodiesel	37.681,00	(ANP, 2023)
Querosene	43.513,60	(ANP, 2023)
Diesel	42.252,40	(ANP, 2023)
Gasolina A*	43.513,60	(ANP, 2023)

Fonte: autoria própria (2024).

Gasolina A*: é a produzida nas refinarias ou petroquímicas e não possui etanol.

As amostras estudadas de bio-óleos BOCG e BOJP apresentam poder calorífico significativamente superior ao das respectivas amostras da matéria-prima para produzi-los,

os lodos de ETE, LCG e LJP, respectivamente. As médias do poder calórico dos bio-óleos, aproximadamente $39.675,33 \text{ J.g}^{-1}$ para BOCG e 40.841 J.g^{-1} para BOJP, são mais do que 3 vezes maiores do que as médias dos seus respectivos lodos de origem, aproximadamente $12.170,5 \text{ J.g}^{-1}$ para LCG e $11.234,5 \text{ J.g}^{-1}$ para LJP.

O poder calorífico da Amostra BOJP tem o resultado máximo de 42.349 J.g^{-1} , o qual se aproxima alguns combustíveis fósseis, e é superior ao diesel com $42.252,40 \text{ J.g}^{-1}$. Esse resultado é encorajador porque demonstra que o bio-óleo em questão, pode, de fato, competir em termos de densidade energética com os combustíveis fósseis em certos contextos.

As amostras de BOCG mostram uma consistência notável em seu poder calorífico, com uma variação de apenas 462 J.g^{-1} entre a menor e a maior medida, o que equivale a apenas 1,17% de diferença. Isso evidencia que a sua produção ocorreu de forma controlada e uniforme para este tipo de biocombustível.

A variação no BOJP é mais significativa, especialmente devido à Amostra 2, que apresentou um poder calorífico equivalente a 7,89% superior à amostra de menor poder calorífico.

Assim, pode-se dizer que os resultados obtidos para todas as amostras de bio-óleo pirolítico estudadas são potenciais matérias-primas para reação de combustão, uma vez que são superiores ao valor de referência da ANP (2023) para o poder calorífico do próprio biodiesel, que é de $37.681,00 \text{ J.g}^{-1}$, o qual é um importante biocombustível já consolidado no Brasil e mundo todo.

Os resultados obtidos são superiores aos obtidos por Liu *et al.* (2020a), em que o poder calorífico do bio-óleo de lodo de esgoto ficou na faixa de $22.000 - 34.000 \text{ J.g}^{-1}$, isso sugere que as amostras testadas nesse estudo possuem uma qualidade energética superior, possivelmente devido a alguns fatores como, a qualidade e o tipo da biomassa utilizada, biomassas mais puras, métodos de conversão avançados, processos bem controlados, maior conteúdo de carbono e hidrogênio.

Segundo Lin *et al.* (2018), o aumento do teor dos componentes de alto poder calorífico, eleva o potencial energético do combustível. Portanto, a seleção da temperatura final ótima de pirólise é vital para aumentar o rendimento e o poder calorífico do bio-óleo.

Conforme os autores Zaker *et al.* (2019) quanto maior o poder calorífico do bio-óleo, maior o seu potencial para aplicação como combustível. De acordo com Gao *et al.* (2020) o

conteúdo de energia do bio-óleo pode aumentar com a diminuição do oxigênio e maior poder calorífico.

Desta maneira, pode ser afirmado que o processo de pirólise utilizado possibilitou com sucesso a produção de um bio-óleo de lodo de esgoto sanitário, o qual apresenta excelente propriedade em relação ao poder calorífico esperado.

4.6 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM

Foram explorados por (FTIR) duas amostras de bio-óleos diferentes, identificados como BOCG e BOJP, ilustrados respectivamente na Figura 10 e Figura 11. Esta análise proporciona uma base para investigações futuras mais detalhadas sobre as propriedades químicas do bio-óleo. O objetivo foi identificar e comparar os grupos presentes em cada amostra, destacando as diferenças e semelhanças na composição química que podem influenciar suas aplicações finais.

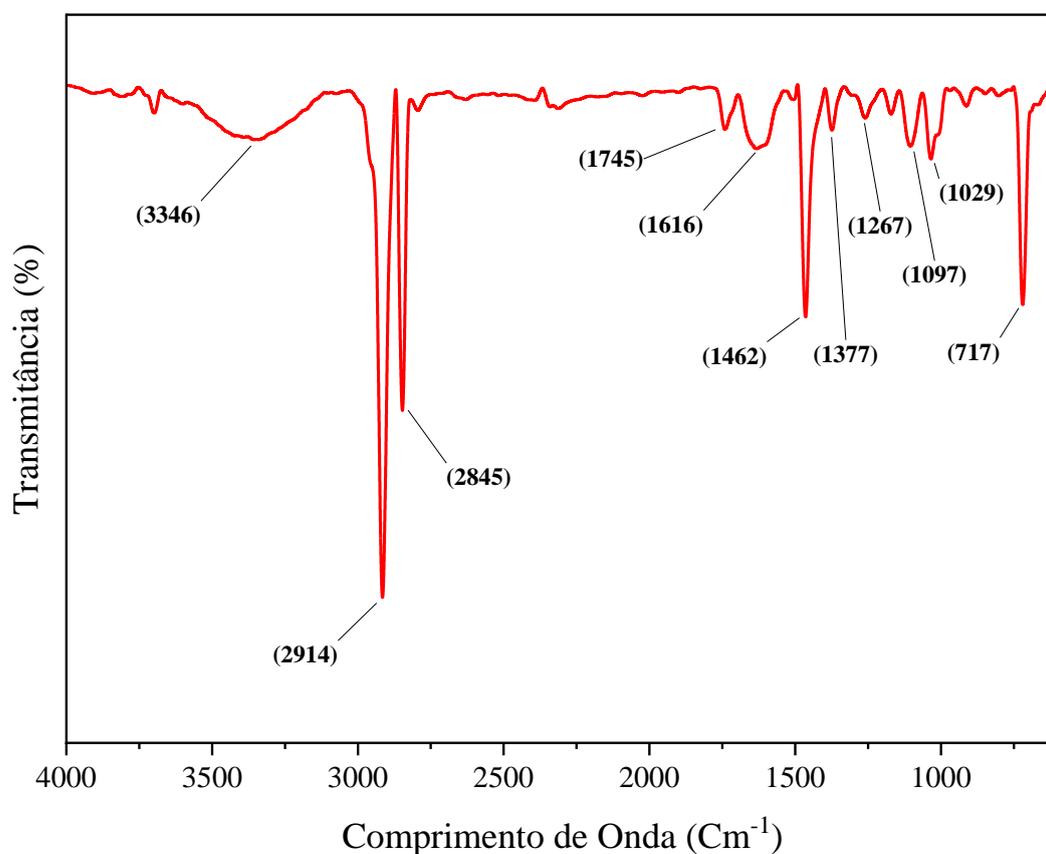


Figura 10. Espectro de FTIR para a amostra do bio-óleo pirolítico BOCG.

Fonte: Autoria própria (2024).

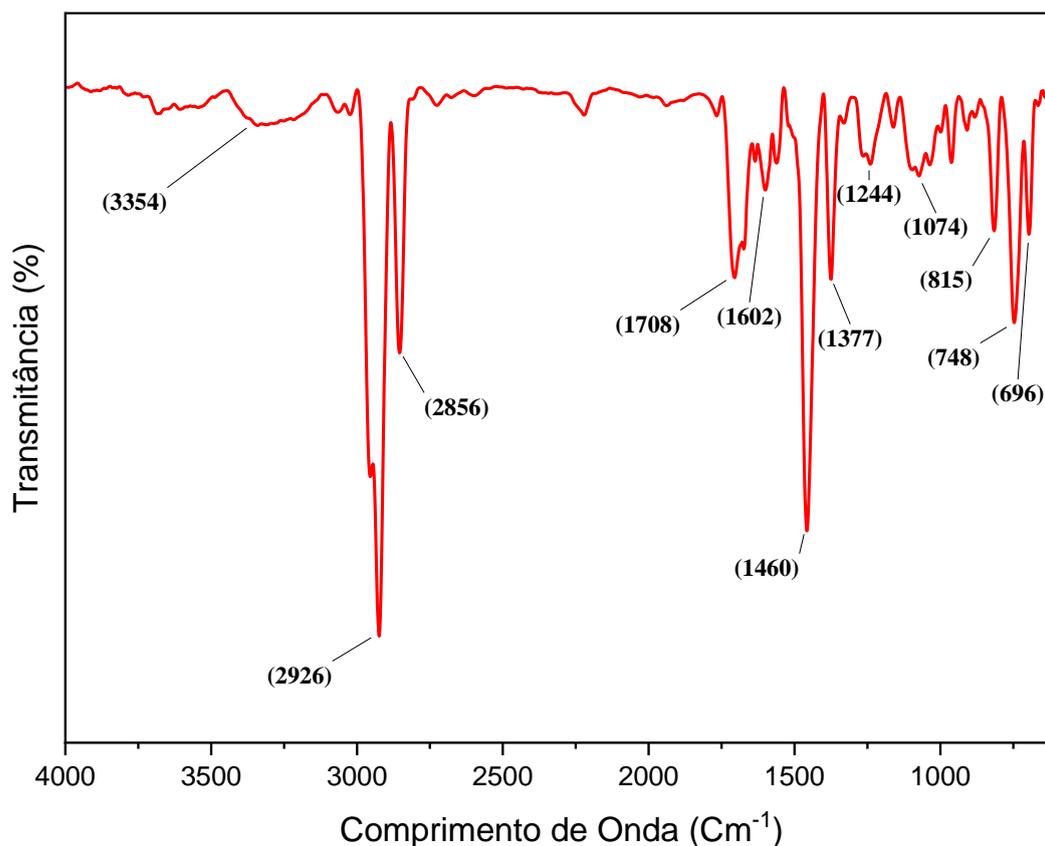


Figura 11. Espectro de FTIR para a amostra do bio-óleo pirolítico BOJP.

Fonte: Autoria própria (2024).

I. Análise da amostra BOCG

- **3346 cm⁻¹**: Indica a presença de grupos hidroxila, típicos de moléculas como álcoois e fenóis. Este pico largo pode também indicar a presença de água absorvida (Wang *et al.*, 2024).
- **2914 e 2845 cm⁻¹**: Representa estiramentos de CH em grupos metil e metileno, comum em cadeias alifáticas longas, que podem especificar a existência de alcanos (Varma *et al.*, 2019).
- **1745 cm⁻¹**: Estiramento de grupos carbonila C=O, típico de ésteres ou cetonas (Soni; Karmee, 2020).
- **1616 cm⁻¹**: Esta vibração pode indicar ligações duplas carbono-carbono em anéis aromáticos ou grupos carbonila em aldeídos e cetonas (Ren *et al.*, 2021).
- **1462 cm⁻¹**: Deformações de CH em grupos metil e metileno (Shah *et al.*, 2020).

- **1377 cm^{-1}** : Esta vibração é indicativo de deformações de CH em grupos metil, comum em estruturas de parafinas ou alcanos (Xaba *et al.*, 2022).
- **1267, 1097, 1029 cm^{-1}** : Estiramento C-O, sugerindo álcoois, éteres ou ácidos (Tahir *et al.*, 2020).
- **717 cm^{-1}** : Pode indicar a presença de anéis benzênicos com um substituinte, como fenil ou tolueno (Xaba *et al.*, 2022).

No Quadro 8 estão ilustrados os comprimentos de onda identificados no espectro de infravermelho da amostra analisada.

Quadro 8. Comprimento de onda e grupos funcionais para a amostra BOCG.

Comprimento de Onda	Grupos Funcionais
3346 cm^{-1}	Álcoois e fenóis
2914 e 2845 cm^{-1}	Alcanos
1745 cm^{-1}	Ésteres ou cetonas
1616 cm^{-1}	Anéis aromáticos ou aldeídos e cetonas
1462 cm^{-1}	Metil e metileno
1377 cm^{-1}	Parafinas ou alcanos
1267, 1097, 1029 cm^{-1}	Álcoois, éteres ou ácidos
717 cm^{-1}	Fenil ou tolueno

Fonte: Autoria própria (2024).

II. Análise da amostra BOJP

- **3354 cm^{-1}** : Similar ao BOCG, indicando a presença de álcoois, fenóis ou água (Wang *et al.*, 2024).
- **2926 e 2856 cm^{-1}** : Indica estiramentos CH semelhantes aos do BOCG, sugerindo também uma presença substancial de compostos alifáticos (Varma *et al.*, 2019).
- **1708 cm^{-1}** : Grupo carbonila C=O, sugerindo ácidos carboxílicos (Soni; Karmee, 2020).

- **1602 cm⁻¹**: Este pico é ligeiramente deslocado em comparação com o BOCG, possivelmente indicando uma diferente composição ou estrutura de compostos aromáticos ou aldeídos (Ren *et al.*, 2021).
- **1460 cm⁻¹**: Deformações de CH (Shah *et al.*, 2020).
- **1377 cm⁻¹**: Vibração de CH em grupos metil (Xaba *et al.*, 2022).
- **1244, 1074, 815 cm⁻¹**: Estiramento C-O, possivelmente em éteres ou álcoois (Tahir *et al.*, 2020).
- **748, 696 cm⁻¹**: Indicam anéis benzênicos monossustituídos, mas em uma posição ligeiramente diferente do BOCG, sugerindo diferentes tipos de substituintes ou configurações (Xaba *et al.*, 2022).

No Quadro 9 estão evidenciados os diferentes grupos funcionais associados a cada comprimento de onda, da amostra BOJP.

Quadro 9. Comprimento de onda e grupos funcionais para a amostra BOJP.

Comprimento de Onda	Grupos Funcionais
3354 cm ⁻¹	Álcoois e fenóis
2926 e 2856 cm ⁻¹	Compostos alifáticos
1708 cm ⁻¹	Ácidos carboxílicos
1602 cm ⁻¹	Anéis aromáticos ou aldeídos e cetonas
1460 cm ⁻¹	Metil e metileno
1377 cm ⁻¹	Parafinas ou alcanos
1244, 1074, 815 cm ⁻¹	Éteres ou álcoois
748, 696 cm ⁻¹	Anéis benzênicos

Fonte: Autoria própria (2024).

A análise das energias vibracionais no espectro de infravermelho sugere a presença de uma variedade de grupos funcionais que caracterizam a complexidade e a diversidade da amostra analisada.

A presença de grupos hidroxila, metil e metileno, carbonila, além de anéis aromáticos e benzênicos, indica uma mistura rica em compostos orgânicos variados. Esses grupos funcionais são típicos de muitos tipos de compostos orgânicos, incluindo biomassa, produtos

de pirólise, e misturas de resíduos orgânicos, sugerindo possíveis aplicações e implicações ambientais da amostra (Shah *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2024).

Os espectros de FTIR refletem estruturas moleculares que podem incluir álcoois, fenóis, ésteres, cetonas, aldeídos, parafinas e compostos aromáticos, indicando potenciais usos em áreas como bioenergia, materiais renováveis e química verde (Wang *et al.*, 2024).

Ambos os bio-óleos mostram a presença de grupos hidroxila, compostos alifáticos, e possíveis anéis aromáticos monossustituídos. Isso sugere que ambos são derivados de processos que envolvem a decomposição térmica de material orgânico com estruturas semelhantes (Ghodke *et al.*, 2021; Xaba *et al.*, 2022).

O estiramento em 1708 cm^{-1} no BOJP, associado a grupos carbonila mais evidentes, sugere possivelmente uma quantidade maior de cetonas, aldeídos ou ácidos carboxílicos em comparação com o BOCG. O BOCG parece ter mais diversidade em ligações C-O, o que pode indicar uma variação nos tipos de álcoois, éteres ou ácidos presentes.

A presença mais evidente de grupos carbonila no BOJP pode indicar condições de oxidação mais intensas ou decomposição de compostos específicos que não são tão prevalentes no BOCG.

Essas diferenças nas bandas de carbonila e nas regiões específicas dos anéis aromáticos entre BOCG e BOJP podem ser atribuídas a pequenas possíveis variações em relação a localidade de origem, pois embora sejam amostras oriundas de ETE do mesmo estado da Paraíba, há prováveis influências do entorno, como correntes jusantes e montantes, presença de diferentes indústrias, entre outros fatores, e/ou nas condições de processamento de pirólise que influenciam a formação de diferentes tipos de compostos químicos.

Ambos os bio-óleos possuem composições complexas com componentes alifáticos e aromáticos, sugerindo prováveis aplicações como potenciais biocombustíveis ou produtos químicos renováveis, embora suas propriedades específicas e aplicações possam variar de acordo com a composição detalhada observada nos espectros FTIR.

4.7 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DO BIO-ÓLEO PIROLÍTICO DOS LODOS ETE DE ORIGEM

Segundo Wang *et al.* (2022) a análise termogravimétrica tem como função monitorar a perda de massa em função da temperatura com taxas controladas de aquecimento.

O bio-óleo foi analisado para observar o perfil termogravimétrico, sendo a amostra BOCG e BOJP aquecida da temperatura ambiente até 800 °C.

Na Figura 12 pode-se observar os perfis das curvas para a amostra BOCG a taxas de aquecimento de 5, 10 e 15 °C/min, sob atmosfera de nitrogênio (N₂).

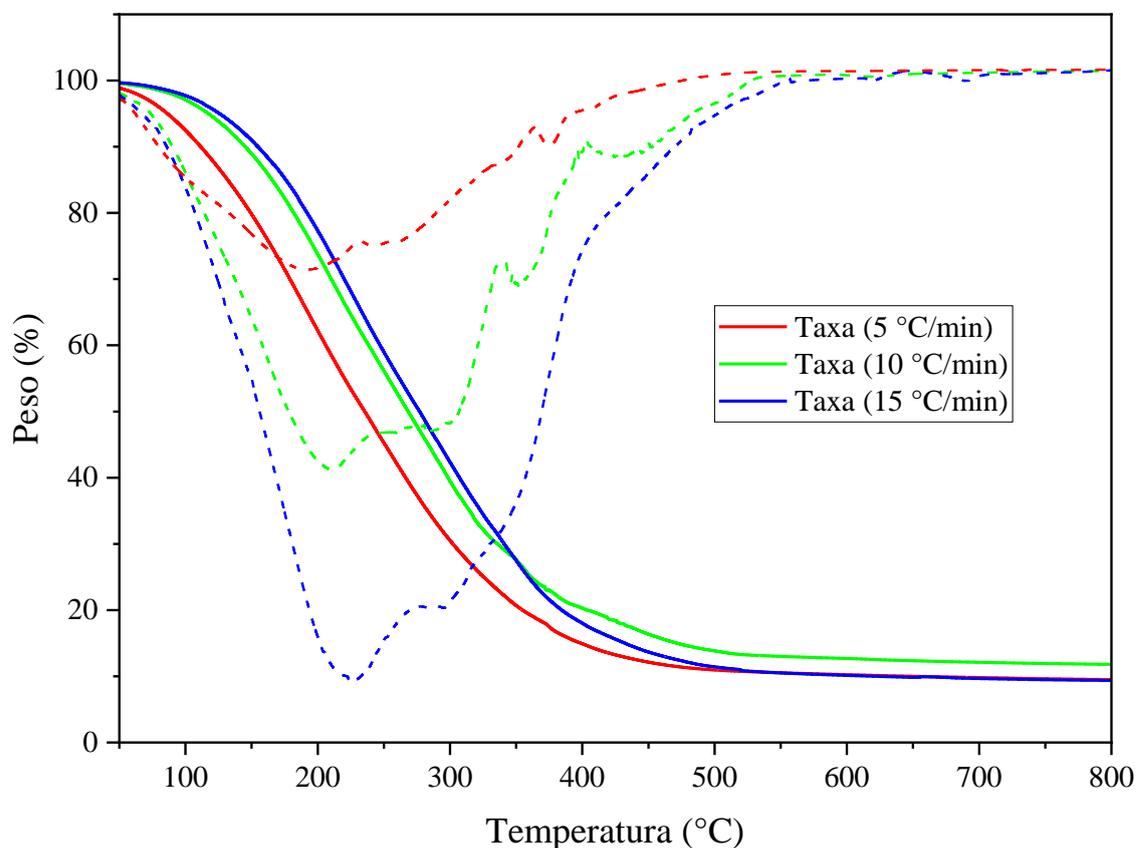


Figura 12. Análise termogravimétrica da amostra de bio-óleo pirolítico BOCG.

Fonte: Autoria própria (2024).

Na Figura 13 estão ilustrados os perfis das curvas obtidas para a amostra BOJP em taxas de aquecimento de 5, 10 e 15 °C/min, sob atmosfera de N₂.

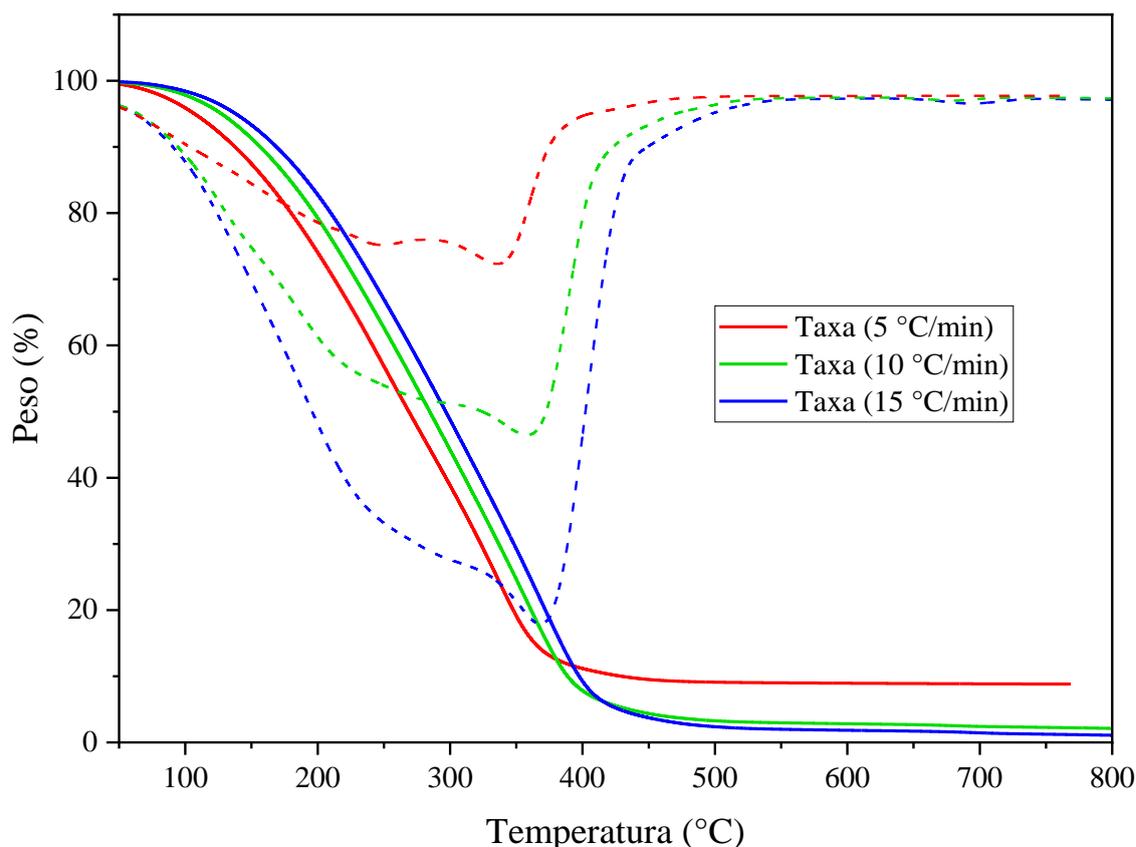


Figura 13. Análise termogravimétrica da amostra de bio-óleo pirolítico BOJP.

Fonte: Autoria própria (2024).

De maneira geral, as 2 amostras BOCG e BOJP apresentam semelhança no perfil das curvas de degradação térmica, as taxas de aquecimento obtidas apresentaram comportamentos térmicos semelhantes.

Pode-se dividir os eventos da DTG do bio-óleo pirolítico analisado nas etapas a seguir.

(I) 100 °C a 200 °C: A perda inicial de massa em ambas as amostras é provavelmente devido à evaporação de compostos voláteis de baixo peso molecular. Esta fase indica a presença de umidade ou solventes leves nos bio-óleos (Buyang *et al.*, 2023).

(II) 200 °C a 500 °C: Esta é a faixa de temperatura onde ocorre a maior perda de massa. A decomposição térmica dos componentes principais, como lipídios, ácidos graxos e possivelmente alguns ésteres ou polímeros ocorre aqui. A velocidade de degradação aumenta com taxas de aquecimento mais altas, o que é típico devido à menor capacidade de transferência de calor para acompanhar a taxa de aumento de temperatura, levando à

decomposição mais rápida (Chen *et al.*, 2018; Erdogdu; Polat; Ozbay, 2019; Huang *et al.*, 2019).

(III) Acima de 500 °C: A massa dos bio-óleos começa a estabilizar, indicando que a maioria dos componentes voláteis já foi perdida. O material restante pode ser um resíduo carbonoso ou compostos de alto peso molecular mais resistentes à decomposição térmica (Allende; Brodie; Jacob, 2022).

No Quadro 10 estão apresentadas as faixas de temperatura associadas à degradação térmica dos bio-óleos, detalhando os processos que ocorrem em cada estágio.

Quadro 10. Etapas da análise termogravimétrica do bio-óleo.

Faixa de Temperatura (°C)	Descrição do Processo
100 °C a 200 °C	Perda inicial de massa devido à evaporação de compostos voláteis de baixo peso molecular, indicando a presença de umidade ou solventes leves.
200 °C a 500 °C	Maior perda de massa ocorre devido à decomposição térmica dos componentes principais, como lipídios, ácidos graxos, ésteres ou polímeros. A degradação é mais rápida com taxas de aquecimento mais altas.
Acima de 500 °C	Estabilização da massa, indicando que a maioria dos componentes voláteis foi perdida. O resíduo restante pode ser composto de alto peso molecular mais resistentes à decomposição térmica.

Fonte: Autoria própria (2024).

As curvas mostram que quanto maior a taxa de aquecimento (15 °C/min), o perfil da curva do percentual de peso durante a decomposição se desloca para temperaturas maiores, isso indica que velocidade de decomposição é menor do que a taxa de aquecimento, se a taxa de aquecimento for maior do que a capacidade de decomposição dos componentes, a reação pode precisar de mais energia para iniciar, deslocando as faixas de decomposição para temperaturas mais altas, em contraste, com uma taxa de aquecimento mais lenta, a decomposição ocorre a temperaturas mais baixas, resultando em uma curva mais bem definida e em estágios distintos de decomposição.

Ambos os bio-óleos parecem ter estabilidade térmica comparável até cerca de 500 °C, após o qual a decomposição torna-se menos acentuada. Isso pode indicar a decomposição de componentes mais estáveis ou de maior peso molecular.

A análise das propriedades térmicas e espectroscópicas das amostras BOJP e BOCG revela uma correlação importante entre a degradação térmica observada e os grupos funcionais identificados nas análises de FTIR.

O gráfico de FTIR para as amostras apresenta estiramentos significativos em comprimentos de onda como 3354 cm^{-1} (indicando fenóis); 2926 e 2856 cm^{-1} (indicando compostos alifáticos). Esses estiramentos sugerem a presença de compostos que possuem ligações mais fortes e cadeias mais longas, que requerem temperaturas mais altas para se degradarem, o que está em concordância com a perda de peso observada na análise térmica.

Por outro lado, a presença de vibrações em 1708 cm^{-1} (indicando ácidos carboxílicos) e 1602 cm^{-1} (indicando anéis aromáticos ou aldeídos e cetonas) também suportam a ideia de que as amostras possuem uma composição química complexa.

Os ácidos carboxílicos e compostos aromáticos são conhecidos por suas estruturas mais estáveis, que tendem a degradar a temperaturas elevadas, explicando a perda de peso em temperaturas mais altas (Allende; Brodie; Jacob, 2022).

Essas observações corroboram entre si, mostrando que a combinação de análises térmicas e espectroscópicas fornece uma visão complementar da composição e comportamento das amostras de bio-óleo. A consistência entre os dados de perda de peso térmica e os grupos funcionais identificados pelo FTIR fortalece a conclusão de que o bio-óleo contém uma variedade de compostos que contribuem para sua estabilidade térmica e reatividade.

De acordo com Chen *et al.* (2018) em $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre um pico característico da volatilização de compostos orgânicos, como o grupo carbonila, e entre $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre a decomposição de grupos orgânicos como hidrocarbonetos pesados e aromáticos.

Outros autores ao estudarem o bio-óleo do lodo de esgoto sanitário obtido por pirólise também observaram a presença dos eventos mencionados e obtidos neste trabalho. Destaca-se por exemplo o estudo de Allende; Brodie; Jacob (2022) que a última decomposição térmica do bio-óleo é entre $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ conduzida pela quebra de compostos pesados e apresentou estabilidade logo em seguida.

Além disto, encontram-se também difundidos estudos envolvendo bio-óleo da pirólise de diferentes matérias-primas, como a *Reutealis trisperma*, em que foram observados uma diminuição significativa de peso em 82,5% entre 378 e $486\text{ }^{\circ}\text{C}$ devido à decomposição de triacilglicerídeos (Buyang *et al.*, 2023).

4.7.1 Análise Cinética do bio-óleo pirolítico dos lodos ETE de origem

4.7.1.1 Conversão (α)

É possível observar como a temperatura varia com a conversão para diferentes taxas de aquecimento (β): 5 °C/min, 10 °C/min e 15 °C/min.

Este método é frequentemente usado na análise termogravimétrica para determinar a energia de ativação de processos de decomposição sem a necessidade de conhecer o mecanismo de reação específico (Dantas *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2024).

Com o aumento da taxa de aquecimento, a temperatura requerida para qualquer percentual de conversão também aumenta. Isso pode ser visto pelo deslocamento progressivo das curvas para direção superior na Figura 14 e na Figura 15, para as amostras BOCG e BOJP.

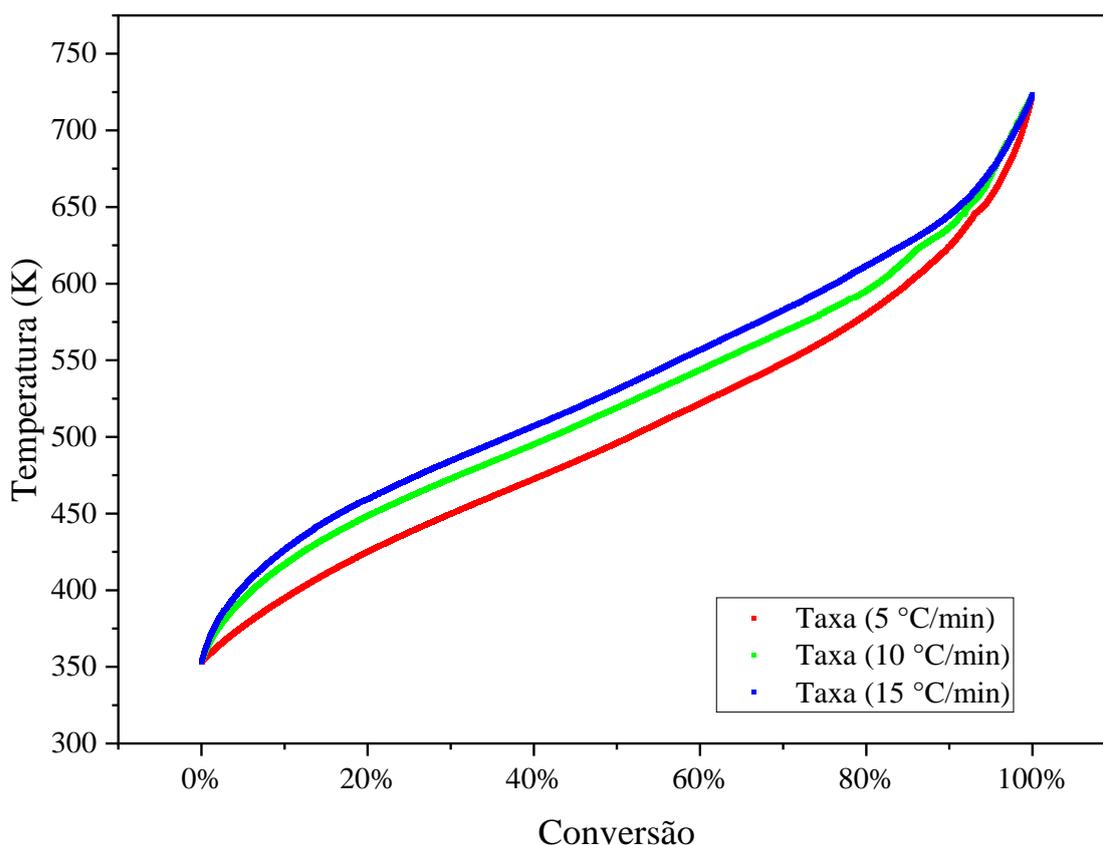


Figura 14. Curvas de conversão em função da temperatura para amostra de bio-óleo pirolítico BOCG.

Fonte: Autoria própria (2024).

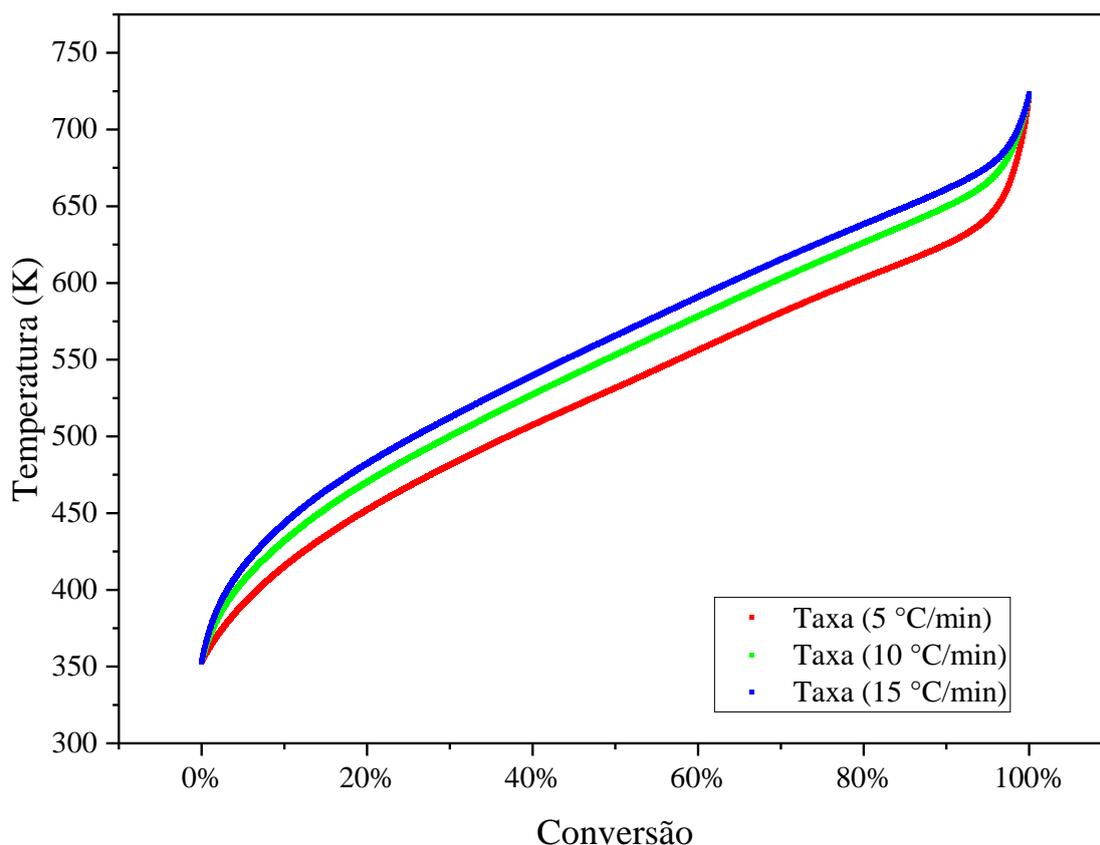


Figura 15. Curvas de conversão em função da temperatura para amostra de bio-óleo pirolítico BOJP.

Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com a Figura 14 e a Figura 15, as curvas mostram um comportamento similar, à medida que a taxa de aquecimento aumenta, a curva se desloca para temperaturas mais altas em uma mesma conversão.

Segundo Kumar *et al.*, (2024), para alcançar o mesmo grau de conversão, são necessárias temperaturas mais elevadas quando o material é aquecido mais rapidamente, este comportamento é esperado devido à limitação na transferência de calor e na difusão de massa dentro do material à medida que a taxa de aquecimento aumenta.

Em todos os casos, curvas com taxas de aquecimento mais altas estão acima daquelas com taxas mais baixas, refletindo que, sob aquecimento mais rápido, a temperatura necessária para atingir um determinado nível de conversão é maior. Segundo Dantas *et al.*, (2024), o atraso na decomposição química ou mudanças físicas não conseguem acompanhar as taxas mais rápidas de aquecimento.

As curvas tendem a se aproximar à medida que a conversão se aproxima de 100%. Segundo Konwar *et al.*, (2019), independentemente da taxa de aquecimento, o material

eventualmente alcança um estado em que as reações ou transformações restantes ocorrem a temperaturas mais uniformes, possivelmente devido à exaustão dos componentes mais reativos ou voláteis.

4.7.1.2 Determinação da Energia de Ativação

Observam-se diversas linhas que representam o logaritmo da taxa de aquecimento em função de $1/T$ (em K^{-1}), para diferentes percentuais de conversão (de 5% a 90%). Essas linhas são uma representação típica utilizada na análise termogravimétrica pelo método Flynn-Wall-Ozawa, que é uma forma de determinar a energia de ativação de uma reação sem assumir uma forma funcional específica para a taxa de reação. Isso pode ser observado na Figura 16 e na Figura 17.

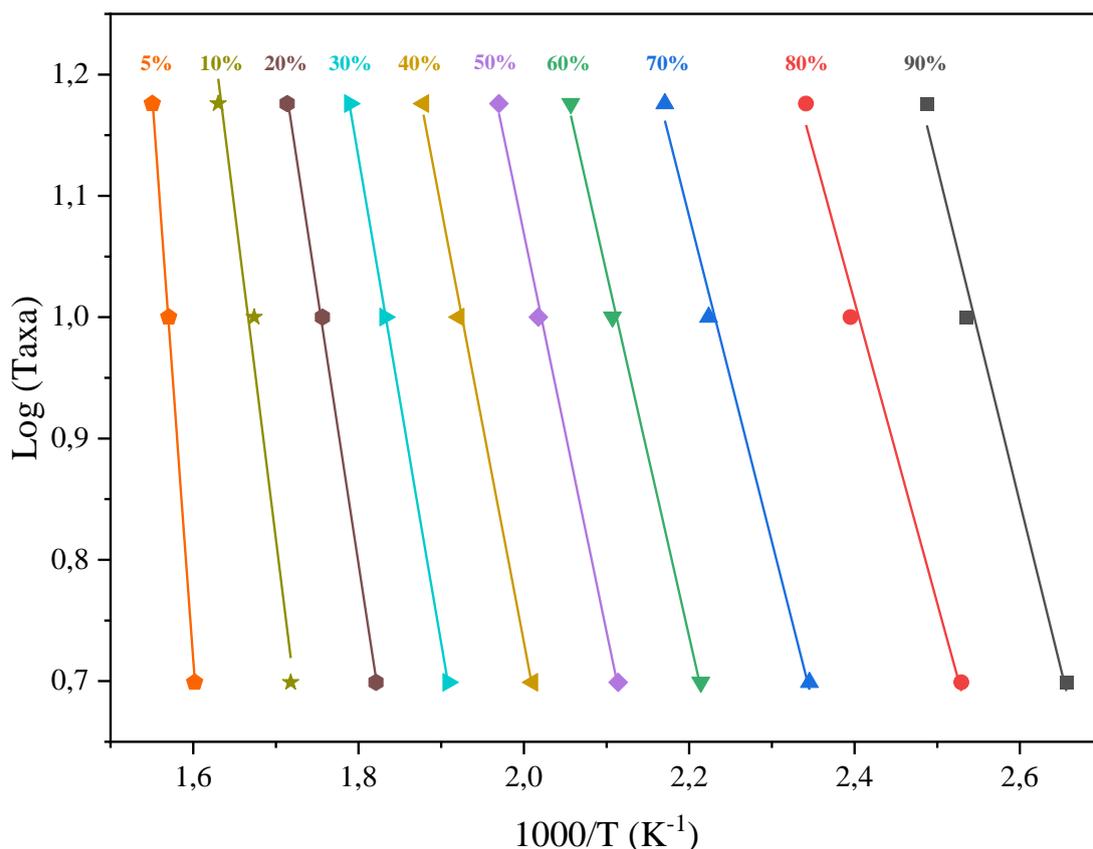


Figura 16. Logaritmo da razão de aquecimento em função do inverso da temperatura para vários níveis de conversão da etapa de decomposição térmica do bio-óleo BOCG.

Fonte: Autoria própria (2024).

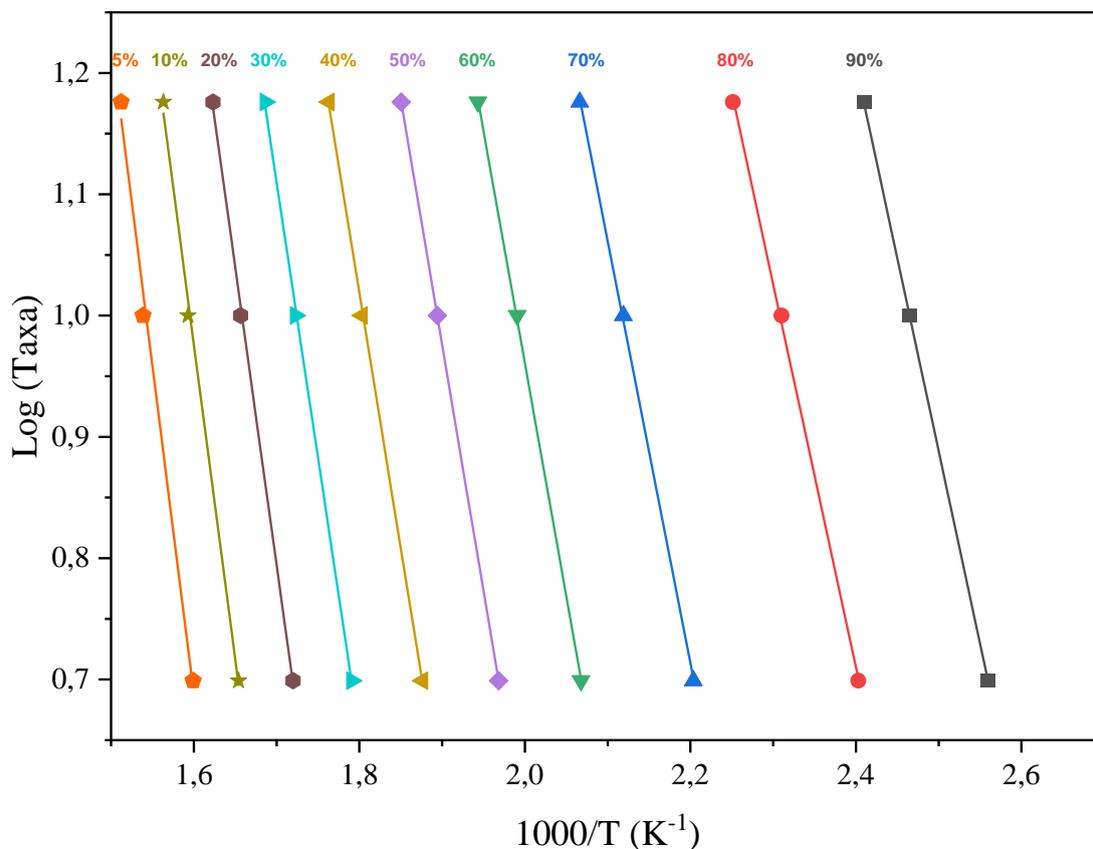


Figura 17. Logaritmo da razão de aquecimento em função do inverso da temperatura para vários níveis de conversão da etapa de decomposição térmica do Bio-óleo BOJP.

Fonte: Autoria própria (2024).

Cada linha no gráfico representa um percentual de conversão específico e mostra como o logaritmo da taxa de aquecimento varia com a temperatura inversa.

As linhas estão ordenadas do maior ao menor percentual de conversão da esquerda para a direita, indicando que para percentuais mais altos de conversão, são necessárias temperaturas mais elevadas para manter a mesma taxa de aquecimento.

A inclinação de cada linha pode ser usada para calcular a energia de ativação para diferentes graus de conversão. Uma inclinação mais acentuada indica uma maior energia de ativação, sugerindo que mais energia é necessária para alcançar níveis mais elevados de conversão.

O conhecimento das energias de ativação em diferentes estágios de conversão pode ser crucial para otimizar processos industriais, como a pirólise de biomassa, calcinação de materiais ou síntese de materiais avançados, onde a taxa de aquecimento e controle de temperatura são críticos para o rendimento e qualidade do produto (Loza *et al.*, 2021).

Neste estudo, procedeu-se com a análise da energia de ativação para duas diferentes amostras de bio-óleo pirolítico, identificadas como BOJP e BOCG, através de gráficos que ilustram a variação da energia de ativação em função da conversão percentual, as quais podem ser observadas nas Figura 18 e Figura 19.

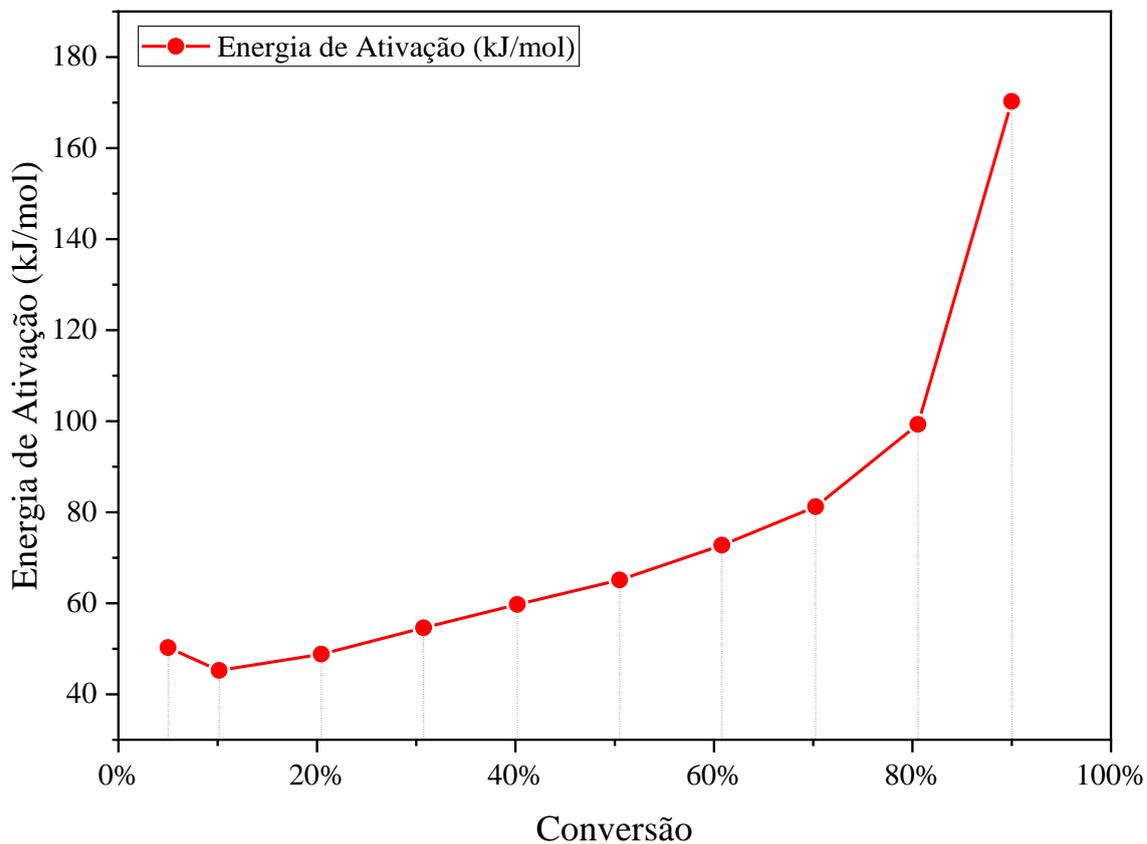


Figura 18. Relação da energia de ativação *versus* o grau de conversão para a amostra de bio-óleo BOCG.

Fonte: Autoria própria (2024).

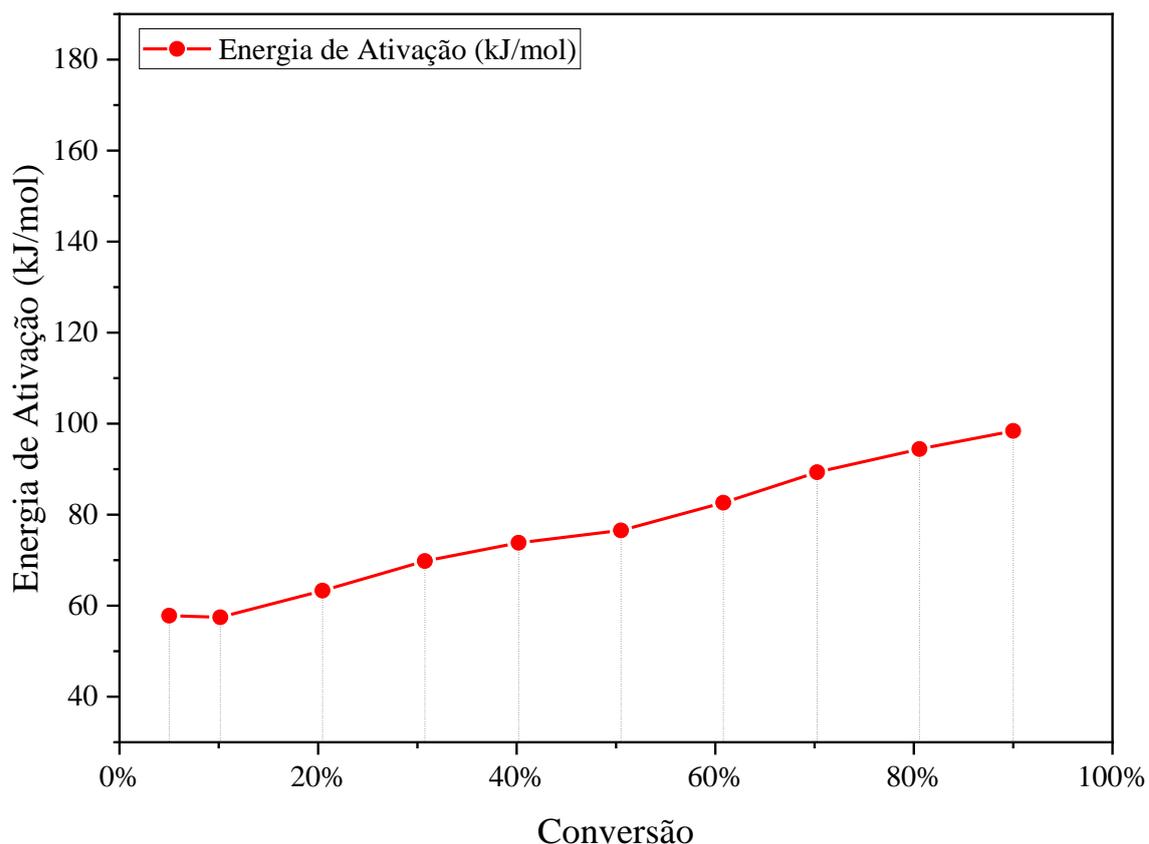


Figura 19. Relação da energia de ativação versus o grau de conversão para a amostra BOJP. Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 18 começa com uma energia de ativação de 50,2 kJ/mol em 5% de conversão e permanece relativamente estável até cerca de 60% de conversão atingindo 72,0 kJ/mol, a partir dessa faixa de conversão ocorre um aumento drástico até quase 180 kJ/mol em 90% de conversão.

Na Figura 19 estão refletidos os resultados encontrados na Tabela 9 com um aumento gradual e contínuo na energia de ativação à medida que a conversão aumenta de 5% a 90%. A forma da curva é suave, indicando uma transição previsível e consistente nas barreiras energéticas ao longo do processo de conversão.

Ambas as Figura 18 e Figura 19 mostram um aumento na energia de ativação com o aumento da conversão, o que pode indicar que reações ou processos mais complexos se tornam dominantes à medida que a conversão progride (Loza *et al.*, 2021).

Na Figura 18 referente a amostra BOCG, observa-se um aumento mais acentuado comparado ao observado para a Figura 19. Isso sugere que o material ou reação representada pela Figura 19, referente a amostra BOJP, pode ter uma dependência mais forte das

condições ou mudanças estruturais mais significativas à medida que a conversão se aproxima de 90% de conversão. Como é detalhado na Tabela 9.

Tabela 9. Energias de ativação para as conversões de 5 a 90% para as amostras BOCG e BOJP.

Conversão (%)	Energia de Ativação (kJ/mol)	
	BOCG	BOJP
5	50,2	57,8
10	45,1	57,4
20	48,8	63,3
30	54,5	69,7
40	59,7	73,8
50	65,0	76,5
60	72,0	82,6
70	81,2	89,3
80	99,2	94,4
90	170,2	98,4

Fonte: Autoria própria (2024).

Quanto a energia de ativação, observada para a amostra BOJP, ocorre um aumento gradual de 57,8 kJ/mol a 98,4 kJ/mol conforme a conversão progride de 5% a 90%. Isso sugere um aumento contínuo da dificuldade de progressão da reação à medida que uma quantidade maior de bio-óleo é convertida (Dantas *et al.*, 2024).

Para a amostra BOCG, a energia de ativação observada inicia em 50,2 kJ/mol e tem um aumento mais variável, começando em 50,2 kJ/mol para 5% de conversão, aumentando progressivamente e apresentando um salto significativo para 170,2 kJ/mol em 90% de conversão. Isso indica uma mudança drástica nas condições reacionais ou nos mecanismos de reação em conversões altas (Konwar *et al.*, 2019).

Sendo assim, é possível concluir que o aumento progressivo e suave da energia de ativação para a amostra de BOJP pode indicar uma degradação sequencial ou uma série de reações que gradualmente requerem menos energia para ocorrer. Na amostra BOCG, o aumento drástico em conversões altas pode ser indicativo de uma transição de fase ou degradação significativa que ocorre apenas sob condições de conversão extrema, possivelmente devido à acumulação de produtos de reação ou alterações nas propriedades físicas do material.

O entendimento da energia de ativação é crucial para otimizar processos térmicos como a destilação, especialmente em bio-óleos que podem apresentar comportamentos complexos devido à diversidade de seus componentes (Kumar; Mohanty, 2021).

Com relação aos dados de energia de ativação que foram apresentados para as amostras BOCG e BOJP, é importante considerar como a energia de ativação afeta a decomposição térmica do material, que é um fator crucial na eficiência da destilação. A destilação do bio-óleo envolve a separação de componentes voláteis a diferentes temperaturas, e a energia de ativação para a decomposição térmica pode indicar temperaturas e condições ideais para a separação eficiente (Alaseeva *et al.*, 2018).

A variação na energia de ativação com a conversão percentual indica diferentes regimes de decomposição durante a destilação. Se a energia de ativação aumenta significativamente com a conversão, como no caso da amostra BOCG, isso pode indicar que os produtos iniciais da destilação são mais facilmente volatilizados, enquanto os componentes remanescentes podem requerer condições mais severas (Farah, 2012; Loza *et al.*, 2021).

Para relacionar os dados obtidos da energia de ativação para as amostras BOCG e BOJP com as frações para destilação do petróleo, observada no Quadro 11, é necessário considerar como as energias de ativação influenciam as temperaturas nas quais diferentes componentes do bio-óleo podem ser destilados.

Os dados de energia de ativação indicam a quantidade de energia térmica necessária para iniciar a decomposição térmica, o que pode correlacionar-se diretamente com a faixa de temperatura na qual diferentes frações do bio-óleo começam a evaporar ou se decompor (Loza *et al.*, 2021).

Frações mais leves (Gás combustível, GPL, Nafta leve): Destilam a temperaturas muito baixas, geralmente abaixo de 90°C. Componentes do bio-óleo com baixas energias de ativação provavelmente destilam nesta faixa, sugerindo que eles evaporam ou se decomponham facilmente (Alekseeva *et al.*, 2020; Chernysheva; Piskunov; Kapustin, 2020; Qian; Wang, 2019).

Frações intermediárias (Nafta pesada, Querosene, Gasóleo leve atmosférico): Destilam entre 90°C e 320°C (Alekseeva *et al.*, 2020; Chernysheva; Piskunov; Kapustin, 2020; Qian; Wang, 2019). Componentes com energia de ativação moderada do bio-óleo, como observado nos estágios intermediários de conversão da amostra BOJP, provavelmente se encaixam nesta categoria.

Frações mais pesadas (Gasóleo pesado, Gasóleo de vácuo, Resíduo de vácuo): Requerem temperaturas mais altas, acima de 320°C, para destilação (Alekseeva *et al.*, 2020; Chernysheva; Piskunov; Kapustin, 2020; Qian; Wang, 2019). O acentuado aumento da energia de ativação na amostra BOCG para altas conversões indica que os componentes mais resistentes do bio-óleo podem se alinhar com essas frações mais pesadas, necessitando de temperaturas elevadas para sua efetiva destilação.

No Quadro 11 encontram-se descritas as faixas de temperaturas para diferentes frações destiladas de combustíveis típicos como segue.

Quadro 11. Frações para destilação do Petróleo.

Fração	Faixa de Destilação (°C)	Principais aplicações
Gás combustível	Abaixo de -42	Gás combustível; petroquímica
Gás liquefeito do petróleo	-42 a 0	Combustível doméstico e industrial; petroquímica
Nafta leve	30 a 90	Gasolina; petroquímica; solventes
Nafta pesada	90 a 170	Gasolina; petroquímica; obtenção de aromático
Querosene	170 a 270	QI; QAV; óleo diesel; detergentes
Gasóleo leve atmosférico	270 a 320	Óleo diesel; óleo de aquecimento
Gasóleo pesado atmosférico	320 a 390	Óleo diesel; óleo de aquecimento
Gasóleo leve de vácuo	390 a 420	Carga de FCC; óleos básicos lubrificantes; óleo diesel
Gasóleo pesado de vácuo	420 a 550	Carga de FCC; óleos básicos lubrificantes
Resíduo de vácuo	Acima de 550	Óleos combustíveis; óleos básicos lubrificantes; asfaltos

Fonte: (Alaseeva *et al.*, 2018; Chernysheva; Piskunov; Kapustin, 2020; Farah, 2012; Qian; Wang, 2019).

O conhecimento das energias de ativação permite prever quais componentes do bio-óleo podem ser eficientemente separados em diferentes faixas de temperatura, maximizando a recuperação de produtos úteis e minimizando a decomposição térmica indesejada, sendo possível alcançar uma destilação mais eficiente, produtiva e segura de bio-óleos, adaptando as operações às características específicas dos componentes do bio-óleo (Mularski; Li, 2023).

5 CONCLUSÕES

A análise bibliométrica do portfólio bibliográfico final revelou um aumento significativo de 48,08% no número de publicações sobre a produção de bio-óleo a partir da pirólise de lodo de esgoto entre 2020 e 2024 em comparação aos períodos anteriores refletindo o crescente interesse acadêmico e industrial nesta área.

O bio-óleo pirolítico produzido a partir do lodo de esgoto na Paraíba demonstrou um poder calorífico significativamente elevado, com média de 40.841 J/g, aproximando-se do valor do diesel fóssil (42.252,40 J/g). Isso reforça seu potencial como um biocombustível alternativo eficiente, com capacidade competitiva em termos de densidade energética.

A análise por FTIR identificou grupos funcionais como hidroxila, compostos alifáticos e anéis aromáticos, indicando uma composição rica em compostos orgânicos complexos. Essa diversidade química contribui para a estabilidade térmica e a eficiência do bio-óleo em processos de combustão.

A análise de pH dos bio-óleos indicou uma alcalinidade benéfica, que pode melhorar a estabilidade e eficiência do bio-óleo em processos de combustão. A alcalinidade reduz a corrosividade e facilita a integração dos bio-óleos em sistemas de motores, tornando-os uma alternativa viável aos combustíveis fósseis.

Com densidades de 838 Kg/m³ (BOCG) e 842 Kg/m³ (BOJP), o bio-óleo apresenta características físicas semelhantes ao petróleo leve e ao biodiesel. O Grau API médio de 35,97 classifica-o como um óleo leve, facilitando o transporte e o refinamento, aumentando seu valor comercial.

A análise termogravimétrica revelou uma degradação em três etapas principais: evaporação de voláteis, decomposição térmica de componentes e estabilização da massa. A capacidade de manter a estabilidade acima de 500°C destaca sua resistência térmica.

A análise cinética indicou que o bio-óleo pode ser eficientemente separado em diferentes faixas de temperatura, maximizando a produção de biocombustíveis. Isso sugere a possibilidade de otimização de processos térmicos para melhorar o rendimento e a qualidade dos produtos derivados.

A produção de bio-óleo a partir de lodo de esgoto representa uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, promovendo a economia circular e reduzindo o impacto ambiental. Os resultados do estudo superam os de outros trabalhos possivelmente

devido ao controle eficaz do processo de pirólise, demonstrando o potencial do bio-óleo para integrar uma matriz energética mais sustentável.

A análise da energia de ativação sugere que o bio-óleo pode ser separado eficientemente em diferentes faixas de temperatura, maximizando a recuperação de produtos úteis. Isso indica potencial para otimização em processos térmicos, como a destilação, evidenciando sua possível viabilidade como uma matéria-prima sustentável.

Portanto, o bio-óleo pirolítico estudado representa um avanço importante na possibilidade de ser utilizado como um biocombustível alternativo ou matéria-prima sustentável, capaz de contribuir para uma matriz energética e de menor impacto ambiental, colaborando na promoção de uma economia circular de baixo carbono na Paraíba.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, A. *et al.* Bioenergy potential and thermochemical characterization of lignocellulosic biomass residues available in Pakistan. **Korean Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 11, p. 1899–1906, 2020.

ACHEAMPONG, A. O.; OPOKU, E. E. O.; DOGAH, K. E. The political economy of energy transition: The role of globalization and governance in the adoption of clean cooking fuels and technologies. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 186, p. 122156, 2023.

ALASEEVA, A. A. *et al.* Properties and Applications of Distillate Fractions from Highly Stable Dispersions of Liquid Pyrolysis Products. **Chemistry and Technology of Fuels and Oils**, [s. l.], v. 54, n. 3, p. 271–277, 2018.

ALEKSEEVA, M. V. B. *et al.* Effect of Temperature on the Hydrotreatment of Sewage Sludge-Derived Pyrolysis Oil and Behavior of Ni-Based Catalyst. **Catalysts**, [s. l.], v. 10, n. 11, p. 1273, 2020.

ALI, L. *et al.* Valorization of rubberwood sawdust and sewage sludge by pyrolysis and co-pyrolysis using agitated bed reactor for producing biofuel or value-added products. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 1338–1363, 2022.

ALLENDE, S.; BRODIE, G.; JACOB, M. V. Energy recovery from sugarcane bagasse under varying microwave-assisted pyrolysis conditions. **Bioresource Technology Reports**, [s. l.], v. 20, p. 101283, 2022.

AL-MRAYAT, T. *et al.* Pyrolysis of domestic sewage sludge: influence of operational conditions on the product yields using factorial design. **Heliyon**, [s. l.], v. 8, n. 5, p. e09418, 2022.

ALVAREZ, J. *et al.* Characterization of the bio-oil obtained by fast pyrolysis of sewage sludge in a conical spouted bed reactor. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 149, p. 169–175, 2016.

ALVAREZ, J. *et al.* Fast co-pyrolysis of sewage sludge and lignocellulosic biomass in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, [s. l.], v. 159, p. 810–818, 2015.

ALVES, J. L. F. *et al.* Kinetics and thermodynamics parameters evaluation of pyrolysis of invasive aquatic macrophytes to determine their bioenergy potentials. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 121, p. 28–40, 2019.

ANA. **Saneamento no Brasil**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/saneamento/>. Acesso em: 2 ago. 2024.

ANDREIDES, D. *et al.* Biological conversion of carbon monoxide and hydrogen by anaerobic culture: Prospect of anaerobic digestion and thermochemical processes combination. **Biotechnology Advances**, [s. l.], v. 58, p. 107886, 2022.

ANP. **Publicações**. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes>. Acesso em: 16 fev. 2023.

ANP. **Resolução 50 2013 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR.** [S. l.], 2022a. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-50-2013?origin=instituicao&q=50/2013>. Acesso em: 13 maio 2024.

ANP. **Resolução 807 2020 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR.** [S. l.], 2022b. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-807-2020-estabelece-a-especificacao-da-gasolina-de-uso-automotivo-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializarem-o-produto-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao&q=807/2020>. Acesso em: 13 maio 2024.

ANP. **Resolução 856 2021 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR.** [S. l.], 2021. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-856-2021-estabelece-as-especificacoes-do-querosene-de-aviacao-jet-a-e-jet-a-1-dos-querosenes-de-aviacao-alternativos-e-do-querosene-de-aviacao-c-jet-c-bem-como-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializam-esses-produtos-em-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 13 maio 2024.

ANP. **Resolução 920 2023 da ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis BR.** [S. l.], 2022c. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-920-2023-estabelece-a-especificacao-do-biodiesel-e-as-obrigacoes-quanto-ao-controle-da-qualidade-a-serem-atendidas-pelos-agentes-economicos-que-comercializem-o-produto-em-territorio-nacional?origin=instituicao>. Acesso em: 13 maio 2024.

ARANTES, H. T. L. *et al.* Effect of activated biochar as a low-cost catalyst on the quality of catalytic intermediate co-pyrolysis oil from waste polystyrene and green coconut pericarp. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 240, p. 107539, 2023.

ARAZO, R. O. *et al.* Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor. **Sustainable Environment Research**, [s. l.], v. 27, n. 1, p. 7–14, 2017.

ARAZO, R. O. *et al.* Low-temperature catalytic conversion of alkaline sewage sludge bio-oil to biodiesel: Product characteristics and reaction mechanisms. **Environmental Technology & Innovation**, [s. l.], v. 21, p. 101266, 2021.

ARAZO, R. O.; DE LUNA, M. D. G.; CAPAREDA, S. C. Assessing biodiesel production from sewage sludge-derived bio-oil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, [s. l.], v. 10, p. 189–196, 2017.

ARIAS, J. G. *et al.* Integrating anaerobic digestion and pyrolysis for treating digestates derived from sewage sludge and fat wastes. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 27, n. 26, p. 32603–32614, 2020.

ARUN, J. *et al.* A comparative review on photo and mixotrophic mode of algae cultivation: Thermochemical processing of biomass, necessity of bio-oil upgrading, challenges and future roadmaps. **Applied Energy**, [s. l.], v. 325, p. 119808, 2022.

ASKARI, N. *et al.* Unveiling the photocatalytic marvels: Recent advances in solar heterojunctions for environmental remediation and energy harvesting. [*s. l.*], v. 148, p. 283–297, 2025.

BAI, J. *et al.* Catalytic reforming of sewage sludge pyrolysis products over the self-derived char. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [*s. l.*], v. 168, p. 105759, 2022.

BAI, J. *et al.* Co-pyrolysis of sewage sludge and pinewood sawdust: the synergistic effect and bio-oil characteristics. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [*s. l.*], v. 13, n. 10, p. 9205–9212, 2023.

BARRY, D. *et al.* Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, [*s. l.*], v. 122, p. 472–480, 2019.

BIENIEK, A. *et al.* Intermediate Pyrolysis of Brewer's Spent Grain: Impact of Gas Atmosphere. **Energies**, [*s. l.*], v. 15, n. 7, p. 2491, 2022.

BORA, A. P.; GUPTA, D. P.; DURBHA, K. S. Sewage sludge to bio-fuel: A review on the sustainable approach of transforming sewage waste to alternative fuel. **Fuel**, [*s. l.*], v. 259, p. 116262, 2020.

BRINDHADEVI, K. *et al.* Effect of reaction temperature on the conversion of algal biomass to bio-oil and biochar through pyrolysis and hydrothermal liquefaction. **Fuel**, [*s. l.*], v. 285, p. 119106, 2021.

BUYANG, Y. *et al.* Catalytic pyrolysis of Reutealis trisperma oil using raw dolomite for bio-oil production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [*s. l.*], v. 169, p. 105852, 2023.

CAO, J.-P. *et al.* Fractionation and identification of organic nitrogen species from bio-oil produced by fast pyrolysis of sewage sludge. **Bioresource Technology**, [*s. l.*], v. 101, n. 19, p. 7648–7652, 2010a.

CAO, J.-P. *et al.* Triacetoneamine formation in a bio-oil from fast pyrolysis of sewage sludge using acetone as the absorption solvent. **Bioresource Technology**, [*s. l.*], v. 101, n. 11, p. 4242–4245, 2010b.

CARVALHO, G. D. G. de *et al.* Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio. **Journal of Informetrics**, [*s. l.*], v. 14, n. 3, p. 101043, 2020.

CHEN, G.-B. *et al.* A Study of the Production and Combustion Characteristics of Pyrolytic Oil from Sewage Sludge Using the Taguchi Method. **Energies**, [*s. l.*], v. 11, n. 9, p. 2260, 2018.

CHEN, H. *et al.* Characterization of bio-oil and biochar from high-temperature pyrolysis of sewage sludge. **Environmental Technology**, [*s. l.*], v. 36, n. 4, p. 470–478, 2015.

CHEN, Y. *et al.* Pressurized pyrolysis of sewage sludge: Process performance and products characterization. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [*s. l.*], v. 139, p. 205–212, 2019.

CHENG, F. *et al.* Impact of feedstock composition on pyrolysis of low-cost, protein- and lignin-rich biomass: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 147, p. 104780, 2020.

CHERNYSHEVA, E. A.; PISKUNOV, I. V.; KAPUSTIN, V. M. Enhancing the Efficiency of Refinery Crude Oil Distillation Process by Optimized Preliminary Feedstock Blending (Review). **Petroleum Chemistry**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 1–15, 2020.

CHERUBIN, M. R. *et al.* Land Use and Management Effects on Sustainable Sugarcane-Derived Bioenergy. **Land**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 72, 2021.

CONTI, R. *et al.* Thermocatalytic Reforming of Biomass Waste Streams. **Energy Technology**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 104–110, 2017.

CSUTORAS, B.; MISKOLCZI, N. Thermo-catalytic pyrolysis of sewage sludge and techno-economic analysis: The effect of synthetic zeolites and natural sourced catalysts. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 400, p. 130676, 2024.

DANTAS, L. *et al.* Degradation kinetics of PLA compounds with castor oil. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 141, n. 21, p. e55408, 2024.

DJANDJA, O. S. *et al.* Pyrolysis of Municipal Sewage Sludge for Biofuel Production: A Review. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 59, n. 39, p. 16939–16956, 2020.

DOYLE, C. D. Estimating isothermal life from thermogravimetric data. **Journal of Applied Polymer Science**, [s. l.], v. 6, n. 24, p. 639–642, 1962.

EPE. **Balanco Energético Nacional**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 1 ago. 2024.

ERDOGDU, A. E.; POLAT, R.; OZBAY, G. Pyrolysis of goat manure to produce bio-oil. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 452–457, 2019.

ETHAIB, S. *et al.* Microwave-Assisted Pyrolysis of Biomass Waste: A Mini Review. **Processes**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. 1190, 2020.

FAKAYODE, O. A. *et al.* Co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomasses for the production of biochar – A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 297, p. 122408, 2020.

FARAH, M. A. **O Petróleo e seus Derivados**. [S. l.]: Grupo GEN, 2012.

FARISSI, H. E.; TALHAOUI, A.; BACHIRI, A. E. Influence of pyrolysis process on the production of bio-oil used as alternative green energy from Pistacia lentiscus L. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 168, p. 105781, 2022.

FONTS, I. *et al.* Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 85, n. 1–2, p. 184–191, 2009.

GAO, N. *et al.* Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. **Progress in Energy and Combustion Science**, [s. l.], v. 79, p. 100843, 2020.

GHODKE, P. K. *et al.* Pyrolysis of sewage sludge for sustainable biofuels and value-added biochar production. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 298, p. 113450, 2021.

GOHAR, H. *et al.* Investigating the characterisation, kinetic mechanism, and thermodynamic behaviour of coal-biomass blends in co-pyrolysis process. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 163, p. 645–658, 2022.

GOVERNO DA PARAÍBA. **Operação Praia Limpa realiza mais uma etapa em João Pessoa e autua imóveis por ligações clandestinas de esgoto**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://paraiba.pb.gov.br/noticias/operacao-praia-limpa-realiza-mais-uma-etapa-em-joao-pessoa-e-autua-imoveis-por-ligacoes-clandestinas-de-esgoto>. Acesso em: 18 set. 2024.

GU, B. *et al.* Catalytic Fast Pyrolysis of Sewage Sludge over HZSM-5: A Study of Light Aromatics, Coke, and Nitrogen Migration under Different Atmospheres. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 59, n. 39, p. 17537–17545, 2020.

GU, B. *et al.* Nitrogen migration mechanism and formation of aromatics during catalytic fast pyrolysis of sewage sludge over metal-loaded HZSM-5. **Fuel**, [s. l.], v. 244, p. 151–158, 2019.

GUIGNONE, G. *et al.* BIM and LCA integration methodologies: A critical analysis and proposed guidelines. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 73, p. 106780, 2023.

HAGHIGHAT, M. *et al.* Production and Optimization of Bio-Oil from Municipal Wastewater Sludge by Thermal and Catalytic Pyrolysis Process. **SSRN Electronic Journal**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ssrn.com/abstract=4098964>. Acesso em: 18 maio 2024.

HAGHIGHAT, M. *et al.* Production of bio-oil from sewage sludge: A review on the thermal and catalytic conversion by pyrolysis. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [s. l.], v. 42, p. 100870, 2020.

HAI, A. *et al.* Valorization of groundnut shell via pyrolysis: Product distribution, thermodynamic analysis, kinetic estimation, and artificial neural network modeling. **Chemosphere**, [s. l.], v. 283, p. 131162, 2021.

HAMEED, Z. *et al.* A Comprehensive Review on Thermal Coconversion of Biomass, Sludge, Coal, and Their Blends Using Thermogravimetric Analysis. **Journal of Chemistry**, [s. l.], v. 2020, p. 1–23, 2020.

HANIF, M. U. *et al.* Influence of Pyrolysis Temperature on Product Distribution and Characteristics of Anaerobic Sludge. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 79, 2019.

HARUSSANI, M. M. *et al.* Pyrolysis of polypropylene plastic waste into carbonaceous char: Priority of plastic waste management amidst COVID-19 pandemic. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 803, p. 149911, 2022.

HEMATKHAH, R.; MAJIDIAN, N.; HALLAJISANI, A. Comparison and Optimization of Pyrolysis Bio-Oil Composition from Sewage Sludge and Spirulina Microalgae. [*s. l.*], 2023.

HU, Y. *et al.* Effect of catalysts on distribution of polycyclic-aromatic hydrocarbon (PAHs) in bio-oils from the pyrolysis of dewatered sewage sludge at high and low temperatures. **Science of The Total Environment**, [*s. l.*], v. 667, p. 263–270, 2019.

HU, W. *et al.* Hydrothermal route-enabled synthesis of sludge-derived carbon with oxygen functional groups for bisphenol A degradation through activation of peroxymonosulfate. **Journal of Hazardous Materials**, [*s. l.*], v. 388, p. 121801, 2020.

HU, Y. *et al.* Investigation into the distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wastewater sewage sludge and its resulting pyrolysis bio-oils. **Science of The Total Environment**, [*s. l.*], v. 473–474, p. 459–464, 2014.

HU, Y. *et al.* Investigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formed in three-phase products from the pyrolysis of various wastewater sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, [*s. l.*], v. 389, p. 122045, 2020.

HUANG, X. *et al.* Influences of pyrolysis conditions in the production and chemical composition of the bio-oils from fast pyrolysis of sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [*s. l.*], v. 110, p. 353–362, 2014.

HUANG, Z. *et al.* The effects of Fe₂O₃ catalyst on the conversion of organic matter and bio-fuel production during pyrolysis of sewage sludge. **Journal of the Energy Institute**, [*s. l.*], v. 92, n. 4, p. 835–842, 2019.

HUANG, C.; MOHAMED, B. A.; LI, L. Y. Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, biochar, and activated carbon from sewage sludge. **Resources, Conservation and Recycling**, [*s. l.*], v. 181, p. 106273, 2022.

Jl, A. *et al.* Character and Composition Analysis of Distilling Fractions from Sewage Sludge Pyrolysis Oil. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [*s. l.*], v. 35, n. 3, p. 290–297, 2013.

KHAN, M. S. *et al.* Advancing the Application of Pyrolysis Liquid (Bio-oil) by the Improvement of Its Fuel Properties by Thermo-Catalytic Reforming. **Energy & Fuels**, [*s. l.*], v. 36, n. 8, p. 4381–4395, 2022.

KHODAPARASTI, M. S. *et al.* Co-pyrolysis of municipal sewage sludge and microalgae *Chlorella Vulgaris*: Products' optimization; thermo-kinetic study, and ANN modeling. **Energy Conversion and Management**, [*s. l.*], v. 254, p. 115258, 2022.

KHODAPARASTI, M. S. *et al.* Optimal Co-pyrolysis of municipal sewage sludge and microalgae *Chlorella Vulgaris*: Products characterization, synergistic effects, mechanism, and reaction pathways. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 390, p. 135991, 2023.

KIM, Y.; PARKER, W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. **Bioresource Technology**, [*s. l.*], v. 99, n. 5, p. 1409–1416, 2008.

KONWAR, K. *et al.* Effect of biomass addition on the devolatilization kinetics, mechanisms and thermodynamics of a northeast Indian low rank sub-bituminous coal. **Fuel**, [s. l.], v. 256, p. 115926, 2019.

KUMAR, A. *et al.* Co-pyrolysis of microalgae residue and sewage sludge: An in-depth characterization of kinetics, drivers, and gas-oil-char behaviors. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 179, p. 106438, 2024.

KUMAR, R. *et al.* Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 123, p. 109763, 2020.

KUMAR, M.; MOHANTY, K. Kinetic analysis and pyrolysis behavior of low-value waste lignocellulosic biomass for its bioenergy potential using thermogravimetric analyzer. **Materials Science for Energy Technologies**, [s. l.], v. 4, p. 136–147, 2021.

LACERDA, R. T. de O.; ENSSLIN, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gestão & Produção**, [s. l.], v. 19, n. 1, p. 59–78, 2012.

LANGUER, M. P. *et al.* Insights into pyrolysis characteristics of Brazilian high-ash sewage sludges using thermogravimetric analysis and bench-scale experiments with GC-MS to evaluate their bioenergy potential. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 138, p. 105614, 2020.

LENG, E. *et al.* A comprehensive review on lignin pyrolysis: Mechanism, modeling and the effects of inherent metals in biomass. **Fuel**, [s. l.], v. 309, p. 122102, 2022.

LENG, L. *et al.* A review on nitrogen transformation in hydrochar during hydrothermal carbonization of biomass containing nitrogen. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 756, p. 143679, 2021.

LENG, L. *et al.* A review on pyrolysis of protein-rich biomass: Nitrogen transformation. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 315, p. 123801, 2020.

LENG, L. *et al.* Distribution behavior and risk assessment of metals in bio-oils produced by liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 22, n. 23, p. 18945–18955, 2015.

LI, B. *et al.* Influence of Temperature on Characteristics of Particulate Matter and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals during Sewage Sludge Pyrolysis. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 19, p. 5838, 2021.

LI, L. *et al.* Review and outlook on the international renewable energy development. **Energy and Built Environment**, [s. l.], v. 3, n. 2, p. 139–157, 2022.

LI, S. *et al.* Spotlighting of the role of catalysis for biomass conversion to green fuels towards a sustainable environment: Latest innovation avenues, insights, challenges, and future perspectives. **Chemosphere**, [s. l.], v. 318, p. 137954, 2023.

LIN, J. *et al.* Characteristics and reaction mechanisms of sludge-derived bio-oil produced through microwave pyrolysis at different temperatures. **Energy Conversion and**

Management, [s. l.], v. 160, p. 403–410, 2018.

LIN, K.-H. *et al.* Microwave-pyrolysis treatment of biosludge from a chemical industrial wastewater treatment plant for exploring product characteristics and potential energy recovery. **Energy**, [s. l.], v. 199, p. 117446, 2020.

LIN, Q.; CHEN, G.; LIU, Y. Scale-up of microwave heating process for the production of bio-oil from sewage sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 94, p. 114–119, 2012.

LIU, Yang *et al.* Comparative study for fluidized bed pyrolysis of textile dyeing sludge and municipal sewage sludge. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 396, p. 122619, 2020a.

LIU, Y. *et al.* Co-pyrolysis of sewage sludge and lignocellulosic biomass: Synergistic effects on products characteristics and kinetics. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 268, p. 116061, 2022.

LIU, X. *et al.* Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of feed-water pH on hydrochar's physicochemical properties, organic component and thermal behavior. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 388, p. 122084, 2020.

LIU, H. *et al.* Incorporating hydrothermal liquefaction into wastewater treatment – Part I: Process optimization for energy recovery and evaluation of product distribution. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 449, p. 137838, 2022.

LIU, Yanjun *et al.* Microwave pyrolysis of sewage sludge for bio-oil production: Effects of organic components and mechanisms. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 253, p. 108023, 2024.

LIU, Yali *et al.* Production of bio-oil with low oxygen and nitrogen contents by combined hydrothermal pretreatment and pyrolysis of sewage sludge. **Energy**, [s. l.], v. 203, p. 117829, 2020.

LIU, Yang *et al.* Pyrolysis of sewage sludge in a benchtop fluidized bed reactor: Characteristics of condensates and non-condensable gases. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 160, p. 707–720, 2020b.

LIU, H.; XU, G.; LI, G. Pyrolysis characteristic and kinetic analysis of sewage sludge using model-free and master plots methods. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 149, p. 48–55, 2021.

LOZA, J. O. *et al.* An investigation into the pyrolysis and oxidation of bio-oil from sugarcane bagasse: Kinetics and evolved gases using TGA-FTIR. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 106144, 2021.

LU, J.-S. *et al.* Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 312, p. 123615, 2020.

LUO, J. *et al.* In-depth exploration of the energy utilization and pyrolysis mechanism of advanced continuous microwave pyrolysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 292, p. 116941, 2021.

MA, W. *et al.* Supercritical water pyrolysis of sewage sludge. **Waste Management**, [s. l.], v. 59, p. 371–378, 2017.

MEĐRALA, A. M. *et al.* Pyrolysis of agricultural waste biomass towards production of gas fuel and high-quality char: Experimental and numerical investigations. **Fuel**, [s. l.], v. 296, p. 120611, 2021.

MERDUN, H. *et al.* Effects of biological pre-digestion of sewage sludge processed by fast pyrolysis on bio-oil yield and biochar toxicity. **Waste Management**, [s. l.], v. 157, p. 149–158, 2023.

MISHRA, K. *et al.* Recent update on gasification and pyrolysis processes of lignocellulosic and algal biomass for hydrogen production. **Fuel**, [s. l.], v. 332, p. 126169, 2023.

MOHAMED, B. A. *et al.* Sewage sludge co-pyrolysis with agricultural/forest residues: A comparative life-cycle assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 192, p. 114168, 2024.

MOHAMED, B. A.; O'BOYLE, M.; LI, L. Y. Co-pyrolysis of sewage sludge with lignocellulosic and algal biomass for sustainable liquid and gaseous fuel production: A life cycle assessment and techno-economic analysis. **Applied Energy**, [s. l.], v. 346, p. 121318, 2023.

MORNI, N. A. H. *et al.* Catalytic fast Co-Pyrolysis of sewage sludge–sawdust using mixed metal oxides modified with ZSM-5 catalysts on dual-catalysts for product upgrading. **Journal of the Energy Institute**, [s. l.], v. 94, p. 387–397, 2021.

MOŠKO, J. *et al.* Detailed Analysis of Sewage Sludge Pyrolysis Gas: Effect of Pyrolysis Temperature. **Energies**, [s. l.], v. 13, n. 16, p. 4087, 2020.

MULARSKI, J.; LI, J. A review on biomass ignition: Fundamental characteristics, measurements, and predictions. **Fuel**, [s. l.], v. 340, p. 127526, 2023.

MUMBACH, G. D. *et al.* Thermal investigation of plastic solid waste pyrolysis via the deconvolution technique using the asymmetric double sigmoidal function: Determination of the kinetic triplet, thermodynamic parameters, thermal lifetime and pyrolytic oil composition for clean energy recovery. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 200, p. 112031, 2019.

MUTSENGERERE, S. *et al.* A review of operating parameters affecting bio-oil yield in microwave pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 104, p. 328–336, 2019.

NAQVI, S. R. *et al.* Recent developments on sewage sludge pyrolysis and its kinetics: Resources recovery, thermogravimetric platforms, and innovative prospects. **Computers & Chemical Engineering**, [s. l.], v. 150, p. 107325, 2021.

OLABI, A. G.; ABDELKAREEM, M. A. Renewable energy and climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 158, p. 112111, 2022.

PALAMANIT, A. *et al.* Investigation of yields and qualities of pyrolysis products obtained

from oil palm biomass using an agitated bed pyrolysis reactor. **Biofuel Research Journal**, [s. l.], v. 6, n. 4, p. 1065–1079, 2019.

PARK, E.-S.; KANG, B.-S.; KIM, J.-S. Recovery of Oils With High Caloric Value and Low Contaminant Content By Pyrolysis of Digested and Dried Sewage Sludge Containing Polymer Flocculants. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 1335–1340, 2008.

PATIL, V.; SINGH, P.; KUMAR, S. Reliability of renewable oxygenated fuels in engines: A comprehensive review of long-term testing. **Fuel**, [s. l.], v. 367, p. 131451, 2024.

PENG, C. *et al.* Low temperature co-pyrolysis of food waste with PVC-derived char: Products distributions, char properties and mechanism of bio-oil upgrading. **Energy**, [s. l.], v. 219, p. 119670, 2021.

PETROBRÁS. **PETROGUIA**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 2009.

POKORNA, E. *et al.* Study of bio-oils and solids from flash pyrolysis of sewage sludges. **Fuel**, [s. l.], v. 88, n. 8, p. 1344–1350, 2009.

QIAN, K.; WANG, F. C. Compositional Analysis of Heavy Petroleum Distillates by Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatography, Field Ionization and High-resolution Mass Spectrometry. **Journal of the American Society for Mass Spectrometry**, [s. l.], v. 30, n. 12, p. 2785–2794, 2019.

QING, M. *et al.* Pyrolysis of the food waste collected from catering and households under different temperatures: Assessing the evolution of char structure and bio-oil composition. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 164, p. 105543, 2022.

QIU, Z. *et al.* Catalytic co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk over biochar catalyst: Bio-oil upgrading and catalytic mechanism. **Waste Management**, [s. l.], v. 114, p. 225–233, 2020.

QIU, B. *et al.* Research progress in the preparation of high-quality liquid fuels and chemicals by catalytic pyrolysis of biomass: A review. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 261, p. 115647, 2022.

RAN, C. *et al.* Pyrolysis of textile dyeing sludge in fluidized bed: Analysis of products, and migration and distribution of heavy metals. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 241, p. 118308, 2019.

RAZM, S. *et al.* A production planning model for biorefineries with biomass perishability and biofuel transformation. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], v. 258, p. 108773, 2023.

REN, M. G. *et al.* Pyrolysis Behaviour and Kinetic Analysis of Food Waste Sludge Cake. **Chemical Engineering Transactions**, [s. l.], v. 83, p. 253–258, 2021.

REN, J. *et al.* Recent advances in syngas production from biomass catalytic gasification: A critical review on reactors, catalysts, catalytic mechanisms and mathematical models. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 116, p. 109426, 2019.

ROGER, M. S.; ALFONSO, M. O.; PEDREGOSA, C. S. Bail-In: A Sustainable Mechanism for Rescuing Banks. **Sustainability**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 3789, 2018.

RUMAIHI, A. A. *et al.* A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 167, p. 112715, 2022.

SAMANYA, J. *et al.* Characteristics of the upper phase of bio-oil obtained from co-pyrolysis of sewage sludge with wood, rapeseed and straw. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 94, p. 120–125, 2012.

SANABRIA, P. *et al.* Trends in Fenton and photo-Fenton processes for degradation of antineoplastic agents in water matrices: current knowledge and future challenges evaluation using a bibliometric and systematic analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 29, n. 28, p. 42168–42184, 2022.

SEKAR, M. *et al.* A review on the pyrolysis of algal biomass for biochar and bio-oil – Bottlenecks and scope. **Fuel**, [s. l.], v. 283, p. 119190, 2021.

SHAH, Z. *et al.* Sewage Sludge Bio-Oil Development and Characterization. **Inventions**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 36, 2020.

SHAHBEIG, H.; NOSRATI, M. Pyrolysis of municipal sewage sludge for bioenergy production: Thermo-kinetic studies, evolved gas analysis, and techno-socio-economic assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 119, p. 109567, 2020.

SHALINI, S. *et al.* Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 2247–2267, 2021.

SHRIVASTAVA, P. *et al.* Investigation of physicochemical properties of oil palm biomass for evaluating potential of biofuels production via pyrolysis processes. **Biomass Conversion and Biorefinery**, [s. l.], v. 11, n. 5, p. 1987–2001, 2021.

ŠIMAN, M. *et al.* Crucial correction of the Faix method for the determination of carbonyls in pyrolysis and hydrothermal liquefaction bio-oils with high nitrogen content. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 173, p. 106086, 2023.

SONI, B.; KARMEE, S. K. Towards a continuous pilot scale pyrolysis based biorefinery for production of biooil and biochar from sawdust. **Fuel**, [s. l.], v. 271, p. 117570, 2020.

SOUZA, T. S. D. *et al.* APLICAÇÃO DO PROKNOW-C PARA SELEÇÃO E ANÁLISE DE UM PORTFÓLIO BIBLIOGRÁFICO SOBRE APLICAÇÃO DOS RECURSOS DA TECNOLOGIA 4.0. **Gestão e Desenvolvimento em Revista**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 68–89, 2022.

SU, G. *et al.* Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: Mechanism, performance, and prospect. **Fuel**, [s. l.], v. 326, p. 124983, 2022.

SUKHORUKOV, D. A. *et al.* Upgrading of sewage sludge-derived pyrolysis oil via hydrotreatment over NiMo-based catalysts. **Fuel**, [s. l.], v. 359, p. 130383, 2024.

SUN, J.; NOROUZI, O.; MAŠEK, O. A state-of-the-art review on algae pyrolysis for bioenergy and biochar production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 346, p. 126258, 2022.

TAHIR, M. H. *et al.* Comparative chemical analysis of pyrolyzed bio oil using online TGA-FTIR and GC-MS. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 150, p. 104890, 2020.

TIAN, Y. *et al.* Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 102, n. 2, p. 2053–2061, 2011.

TRABELSI, A. B. H. *et al.* Up-Grading Biofuel Production by Co-pyrolysis of Landfill Leachate Concentrate and Sewage Sludge Mixture. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 291–301, 2020.

TRINH, T. N. *et al.* Influence of the Pyrolysis Temperature on Sewage Sludge Product Distribution, Bio-Oil, and Char Properties. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 1419–1427, 2013.

TSAI, W.-T. *et al.* Characterization of bio-oil from induction-heating pyrolysis of food-processing sewage sludges using chromatographic analysis. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 100, n. 9, p. 2650–2654, 2009a.

TSAI, W.-T. *et al.* Levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in the bio-oils from induction-heating pyrolysis of food-processing sewage sludges. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 86, n. 2, p. 364–368, 2009b.

TZEREMES, P.; DOGAN, E.; ALAVIJEH, N. K. Analyzing the nexus between energy transition, environment and ICT: A step towards COP26 targets. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 326, p. 116598, 2023.

UDAYANGA, W. D. C. *et al.* Effects of sewage sludge organic and inorganic constituents on the properties of pyrolysis products. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 196, p. 1410–1419, 2019.

USMAN, M. *et al.* How do financial development, energy consumption, natural resources, and globalization affect Arctic countries' economic growth and environmental quality? An advanced panel data simulation. **Energy**, [s. l.], v. 241, p. 122515, 2022.

USMAN, M.; LORENTE, D. B. Environmental concern in the era of industrialization: Can financial development, renewable energy and natural resources alleviate some load?. **Energy Policy**, [s. l.], v. 162, p. 112780, 2022.

VARMA, A. K. *et al.* Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. **Waste Management**, [s. l.], v. 89, p. 224–235, 2019.

VASU, H. *et al.* Insight into Co-pyrolysis of Palm Kernel Shell (PKS) with Palm Oil Sludge (POS): Effect on Bio-oil Yield and Properties. **Waste and Biomass Valorization**, [s. l.], v. 11, n. 11, p. 5877–5889, 2020.

VAZ, C. R.; SELIG, P. M.; VIEGAS, C. V. A proposal of intellectual capital maturity model

- (ICMM) evaluation. **Journal of Intellectual Capital**, [s. l.], v. 20, n. 2, p. 208–234, 2019.
- VIEIRA, E. L. *et al.* Application of the Proknow-C Methodology in the Search of Literature on Performance Indicators for Energy Management in Manufacturing and Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 39, p. 1259–1269, 2019.
- VUPPALADADIYAM, A. K. *et al.* Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 364, p. 128087, 2022.
- WANG, G. *et al.* A Review of Recent Advances in Biomass Pyrolysis. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 34, n. 12, p. 15557–15578, 2020.
- WANG, W. *et al.* Current Challenges and Perspectives for the Catalytic Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass to High-Value Products. **Catalysts**, [s. l.], v. 12, n. 12, p. 1524, 2022.
- WANG, Z. *et al.* Effects of anaerobic digestion pretreatment on the pyrolysis of Sargassum: Investigation by TG-FTIR and Py-GC/MS. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 267, p. 115934, 2022.
- WANG, X. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on characteristics and environmental risk of heavy metals in pyrolyzed biochar made from hydrothermally treated sewage sludge. **Chemosphere**, [s. l.], v. 216, p. 698–706, 2019.
- WANG, R. *et al.* Insights into co-pyrolytic behavior, emission, kinetics, synergy of bio-oil distillation residue and waxy product via TG-FTIR-MS. **Fuel**, [s. l.], v. 357, p. 129853, 2024.
- WANG, Y. *et al.* Review on the catalytic pyrolysis of waste oil for the production of renewable hydrocarbon fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 283, p. 119170, 2021.
- WARKE, V. *et al.* Sustainable Development of Smart Manufacturing Driven by the Digital Twin Framework: A Statistical Analysis. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 18, p. 10139, 2021.
- XABA, S. A. *et al.* Optimization of primary sewage sludge and coal lignite by microwave-assisted pyrolysis for the production of bio-oil. **Environmental Technology**, [s. l.], v. 43, n. 5, p. 658–672, 2022.
- XIE, Q. *et al.* Fast microwave-assisted catalytic pyrolysis of sewage sludge for bio-oil production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 172, p. 162–168, 2014.
- XIN, C. *et al.* Economical feasibility of bio-oil production from sewage sludge through pyrolysis. **Thermal Science**, [s. l.], v. 22, n. Suppl. 2, p. 459–467, 2018.
- XU, S. *et al.* Synergistic effects of catalytic co-pyrolysis of macroalgae with waste plastics. **Process Safety and Environmental Protection**, [s. l.], v. 137, p. 34–48, 2020.
- XUE, Y. *et al.* Comparative analysis for pyrolysis of sewage sludge in tube reactor heated by electromagnetic induction and electrical resistance furnace. **Waste Management**, [s. l.], v. 120, p. 513–521, 2021.
- XUE, Y. *et al.* Pyrolysis of sewage sludge by electromagnetic induction: Biochar properties

and application in adsorption removal of Pb(II), Cd(II) from aqueous solution. **Waste Management**, [s. l.], v. 89, p. 48–56, 2019.

YANG, Y. *et al.* Characterisation of waste derived intermediate pyrolysis oils for use as diesel engine fuels. **Fuel**, [s. l.], v. 103, p. 247–257, 2013.

YANG, T. *et al.* Hydrothermal liquefaction of sewage sludge to produce bio-oil: Effect of co-pretreatment with subcritical water and mixed surfactants. **The Journal of Supercritical Fluids**, [s. l.], v. 144, p. 28–38, 2019.

YANG, C. *et al.* Pyrolysis of microalgae: A critical review. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 186, p. 53–72, 2019.

YOGALAKSHMI, K. N. *et al.* Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. **Chemosphere**, [s. l.], v. 286, p. 131824, 2022.

YRJÄLÄ, K.; RAMAKRISHNAN, M.; SALO, E. Agricultural waste streams as resource in circular economy for biochar production towards carbon neutrality. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, [s. l.], v. 26, p. 100339, 2022.

YUAN, X. *et al.* Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. **Chemosphere**, [s. l.], v. 120, p. 645–652, 2015.

YUE, X. *et al.* Anaerobic digestion disposal of sewage sludge pyrolysis liquid in cow dung matrix and the enhancing effect of sewage sludge char. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 235, p. 801–811, 2019.

ZAKER, A. *et al.* Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review. **Fuel Processing Technology**, [s. l.], v. 187, p. 84–104, 2019.

ZHANG, Y. *et al.* Fast microwave-assisted pyrolysis of wastes for biofuels production – A review. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 297, p. 122480, 2020.

ZHANG, Y. *et al.* Influence of corn straw on distribution and migration of nitrogen and heavy metals during microwave-assisted pyrolysis of municipal sewage sludge. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 815, p. 152303, 2022.

ZHANG, P. *et al.* Influence of pyrolysis temperature on chemical speciation, leaching ability, and environmental risk of heavy metals in biochar derived from cow manure. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 302, p. 122850, 2020.

ZHONG, S. *et al.* Mechanism of synergistic effects and kinetics analysis in catalytic co-pyrolysis of water hyacinth and HDPE. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 228, p. 113717, 2021.

ZIMMER, T. *et al.* Techno-Economic Analysis of Intermediate Pyrolysis with Solar Drying: A Chilean Case Study. **Energies**, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 2272, 2022.