



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado



Anderson Aldelyan Ramalho de Sousa

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BIO-ÓLEO OBTIDO DA PIRÓLISE DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Kelly Cristiane Gosmes da Silva (UFPB)

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Joelda Dantas (UFPB)

João Pessoa - PB

2025

Anderson Aldelyan Ramalho de Sousa

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BIO-ÓLEO OBTIDO DA
PIRÓLISE DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação de Mestrado acadêmico
apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba em cumprimento às
exigências para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof^ª. Dr.^a. Kelly Cristiane Gomes

Coorientadora: Prof^ª. Dr.^a. Joelda Dantas

João Pessoa - PB

2025

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725c Sousa, Anderson Aldelyan Ramalho de.

Caracterização físico-química do bio-óleo obtido da
pirólise do lodo da estação de tratamento de esgoto /
Anderson Aldelyan Ramalho de Sousa. - João Pessoa,
2025.

60 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gosmes da Silva.

Coorientação: Joelda Dantas.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Processos termoquímicos. 2. Lodo de esgoto. 3.
Esgoto e tratamento de esgoto. 4. Pirólise. 5. Energia
sustentável. I. Silva, Kelly Cristiane Gosmes da. II.
Dantas, Joelda. III. Título.


UFPB/BC

CDU 662.7:628.3(043)


CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BIO-ÓLEO OBTIDO DA PIRÓLISE DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

por


ANDERSON ALDELYAN DE SOUSA
Dissertação aprovada em 31 de março de 2025

Documento assinado digitalmente
 **KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA**
Data: 06/08/2025 21:06:22-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>


Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Orientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **JOELDA DANTAS**
Data: 12/08/2025 20:50:19-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. JOELDA DANTAS
Coorientadora – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO MARDEN TORRES**
Data: 02/10/2025 16:15:28-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. SANDRO MARDEN TORRES
Examinador Interno – UFPB

Documento assinado digitalmente
 **ELVIA LEAL**
Data: 07/08/2025 12:03:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Profa. Dra. ÉLVIA LEAL
Examinadora Externa – UFCG



Prof. Dr. ANTONIO BENJAMIM MAPOSSA
Examinador Externo - UNIVERSIDADE DE CALGARY

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à memória de
meus pais, pois sei que, onde quer que
estejam, sempre estarão olhando por mim.*

AGRADECIMENTO

Primeiramente, quero agradecer a essa força superior que rege o universo e nos dá força para acordar todos os dias e seguir em frente.

Agradeço aos meus pais por terem me dado a vida, pois sem eles eu não estaria aqui, à minha irmã, que praticamente me criou, e aos amigos que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando – 'é nós, F.D.M.!'.

Não poderia deixar de mencionar o Dr. Edson Andrade (Vô), o primeiro Doutor F.D.M., à Dr^a Aline Lourenço, sou grato pela ajuda nas correções e também agradeço à Dr^a Juliana Kelly, cuja a ajuda foi de grande importância para este trabalho.

Não mencionei todos, pois a lista seria enorme, mas saibam que sou grato de coração.

Essa foi uma jornada difícil e longa, mas chegou ao fim e foi mais uma de muitas histórias que ainda há por vir.

Quero agradecer também à minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Kelly Cristiane Gosmes, e à minha coorientadora, Prof^a. Dr^a. Joelda Dantas, pela competência e dedicação ao ofício do ensino, pelo apoio.

Aos demais professores do curso de pós-graduação, ao CNPq e ao CAPES, pelo apoio financeiro durante a vigência deste curso, e a todos os demais que, de algum modo, contribuíram para este trabalho.

CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BIO-ÓLEO OBTIDO DA PIRÓLISE DO LODO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

RESUMO

O lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) representa um desafio ambiental relevante. A pirólise surge como alternativa promissora para a conversão desse resíduo em bio-óleo, com potencial energético e aplicação industrial. Este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica e ambiental do bio-óleo obtido pela pirólise do lodo gerado em ETEs da Paraíba como fonte sustentável de energia e matéria-prima industrial. Para tanto foram analisadas amostras de bio-óleos obtidos da pirólise de lodos oriundos das ETEs de João Pessoa e Campina Grande, bem como da mistura entre ambos, através de caracterizações físico-químicas, estabilidade térmica e poder calorífico superior (PCS). Além disso, realizou-se uma avaliação bibliométrica e sistemática para mapear a produção científica sobre o tema e identificar lacunas no conhecimento. Os resultados mostraram que as amostras apresentam características compatíveis com combustíveis líquidos com PCS entre 40,09 e 41,50 MJ/kg. Pela espectroscopia de Infravermelho evidenciou-se a presença de compostos fenólicos e hidrocarbonetos, contribuindo para o desempenho energético. As análises térmicas indicaram estabilidade e boa performance sob diferentes atmosferas. Conclui-se que a pirólise do lodo de ETE é uma alternativa viável para valorização energética, contribuindo para a sustentabilidade e gestão ambiental.

Palavras-chave: Processos termoquímicos, Pirólise, Lodos, Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), Bio-óleo.

PHYSICOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE BIO-OIL OBTAINED FROM THE PYROLYSIS OF SLUDGE FROM A WASTEWATER TREATMENT PLANT

ABSTRACT

The Sewage sludge generated in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) represents a significant environmental challenge. Pyrolysis emerges as a promising alternative for converting this waste into bio-oil, with energetic potential and industrial applications. This study aimed to evaluate the technical and environmental feasibility of bio-oil obtained from the pyrolysis of sludge generated in WWTPs in Paraíba, Brazil, as a sustainable energy source and industrial raw material. To this end, bio-oil samples obtained from the pyrolysis of sludge from the WWTPs of João Pessoa and Campina Grande, as well as a mixture of both, were analyzed through physicochemical characterizations, thermal stability, and higher heating value (HHV). In addition, a bibliometric and systematic review was conducted to map the scientific production on the subject and identify knowledge gaps. The results showed that the samples exhibit characteristics compatible with liquid fuels, with HHV ranging from 40.09 to 41.50 MJ/kg. Infrared spectroscopy revealed the presence of phenolic compounds and hydrocarbons, contributing to the energy performance. Thermal analyses indicated stability and good performance under different atmospheres. It is concluded that sludge pyrolysis from WWTPs is a viable alternative for energy recovery, contributing to sustainability and environmental management.

Keywords: Thermochemical processes, Pyrolysis, Sludge, Wastewater Treatment Plant (WWTP), Bio-oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do Processo Metodológico.....	20
Figura 2. Fluxograma Esquemático do Processo da Avaliação Bibliométrica e Sistemática. .	23
Figura 3. Amostras de bio-óleos obtidas da pirólise de lodos de ETEs paraibanas.	24
Figura 4. Ilustração fotográfica do Viscosímetro Cinemático Julabo ME-18-V.....	25
Figura 5. Ilustração fotográfica do Calorímetro IKA C 200.	26
Figura 6. Ilustração fotográfica do Espectrômetro modelo IRPrestige-21.....	27
Figura 7. Ilustração fotográfica do Analisador Térmico Simultâneo SDT 650.....	28
Figura 8. Produção Científica por ano abordando o tema bio-óleo da pirólise do lodo de estação de tratamento de esgoto entre os anos de 2014 – 2025.	29
Figura 9. Principais autores por quantidade de artigos publicados entre os anos de 2014-2025.	31
Figura 10. Correlação existente entre os autores na análise de coautoria realizada usando o Bibliometrix.....	31
Figura 11. Análise de ocorrência das palavras-chave para identificação dos clusters com os termos mais citados nos estudos analisados.	34
Figura 12. Nuvem de palavras do portfólio bibliográfico analisado referente bio-óleo da pirólise do lodo de ETE.....	34
Figura 13. Análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das amostras de bio-óleo de lodo de ETE.....	44
Figura 14. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioJP sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).....	48
Figura 15. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioCG sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).....	49
Figura 16. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioJPCG sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relevância dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto nos artigos que abordam o tema bio-óleo da pirólise do lodo de ETE.	29
Tabela 2. Quantidade de publicações por países que mais concentraram estudos voltados a bio-óleo da pirólise do lodo de ETE entre os anos de 2014-2025.	32
Tabela 3. Conjunto de artigos mais citados utilizados na análise sistemática abordando bio-óleo da pirólise do lodo de ETE entre os anos de 2014-2025.	35
Tabela 4. Densidade das amostras de bio-óleo oriundos de lodos de ETE.	37
Tabela 5. Densidade (g/cm ³) do balanço energético nacional 2017 Ano base 2016.	38
Tabela 6. Viscosidade Cinemática das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE.....	40
Tabela 7. Poder Calorífico das amostras de lodos oriundos de ETEs da Paraíba.	41
Tabela 8. Poder Calorífico das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE.	42
Tabela 9. Poderes Caloríficos Superior (MJ/kg) do balanço energético nacional 2017 Ano base 2016.	42
Tabela 10. Atribuições para as principais bandas do espectro FTIR.....	45
Tabela 11. Perda de massa vs temperatura das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

AOCS – American Oil Chemist's Society

ASC – Água Supercrítica

atm – Atmosfera

ATR – Attenuated Total Reflectance

Bio CG – Bio-óleo da pirólise do lodo da ETE de Campina Grande

Bio JP – Bio-óleo da pirólise do lodo da ETE de João Pessoa

Bio JPCG – Mistura dos bio-óleo de João Pessoa e Campina Grande

C – Carbono

c – Capacidade calorífica total do calorímetro (kJ/°C)

cm – Centímetro

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DTG – Derivada Termogravimétrica

DSC – Calorimetria Diferencial de Varredura

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FTIR – Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

g – Grama

HHV – Higher Heating Value

k – Constante Inerente às Dimensões do Viscosímetro Utilizado

kg – Quilograma

kJ – Quilojoule

LABFILM – Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos

LABMAQ – Laboratório de Materiais e Química Ambiental

LABSMAC – Laboratório de Síntese de Materiais Cerâmicos

LACOM – Laboratório de Combustíveis e Materiais

m – Massa da amostra

mg – Miligrama

min – Minuto

MJ – Mega joule

mm – Milímetro

MME – Ministério de Minas e Energia

Mt – Milhões por Toneladas

N – Nitrogênio

NPE – Núcleo de Pesquisa e Extensão

O – Oxigênio

PB – Paraíba

PCS – Poder Calorífico Superior

Qc – Correções adicionais

s – Segundos

SS – Sólidos Secos

SBQ – Superintendência de Biocombustíveis e de Qualidade de Produtos

SCW – Supercritical Water

SDT – Simultaneous Differential Thermal Analysis

t – Tempo de Escoamento em Segundos

TGA – Análise Termogravimétrica

UAEMa – Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande

UFPB – Universidade Federal da Paraíba

ν – Viscosidade Cinemática

WWTP – Wastewater Treatment Plant

ΔT – Variação de temperatura

$^{\circ}\text{C}$ – Celsius

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivo Específicos	14
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
3.1. Sustentabilidade Ambiental	15
3.2. Lodo de Esgoto: Características e Desafios	16
3.3. Pirólise como Alternativa Sustentável	16
3.4. Técnicas de caracterização aplicadas aos bioprodutos das ETEs	17
4. METODOLOGIA	19
4.1. Avaliação Bibliométrica e Sistemática	20
4.1.1. Método de Revisão	20
4.1.2. Coleta de Dados	21
4.1.3. Análise de Dados	21
4.2. Seleção das Amostras do Bio-óleo	24
4.3. Avaliação Físico-Química das Amostras do Bio-óleo	24
4.3.1. Determinação da Densidade	25
4.3.2. Viscosidade Cinemática	25
4.3.3. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)	26
4.3.4. Análise de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	27
4.3.5. Análise de Termogravimetria (TGA/DTG/DSC)	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1. Avaliação Bibliométrica e Sistemática	28
5.2. Avaliação Físico-Química das Amostras do Bio-óleo	37
5.2.1. Determinação da Densidade	37
5.2.2. Viscosidade Cinemática	40
5.2.3. Determinação de Poder Calorífico Superior (PCS)	41
5.2.4. Análise de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)	44
5.2.5. Análise de Termogravimetria (TGA/DTG/DSC)	48
6. CONCLUSÕES	53
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e industrial tem levado a um aumento expressivo na geração de resíduos sólidos e líquidos, exigindo soluções eficazes para seu tratamento e disposição. Entre esses resíduos, o lodo de esgoto, subproduto do tratamento de águas residuais, em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), representa um dos maiores desafios ambientais. Esse material contém matéria orgânica, nutrientes como nitrogênio e fósforo, metais pesados e microrganismos (Carvalho *et al.*, 2015), tornando sua destinação final uma questão crítica para a sustentabilidade ambiental e a saúde pública. Além disso, estudos indicam que lodos de águas residuais podem ser reservatórios e fontes de emissão de genes de resistência a antibióticos, aumentando os riscos biológicos e ecológicos (Li, Y. *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, a valorização energética do lodo tem sido amplamente estudada como uma estratégia sustentável para minimizar impactos ambientais e promover o aproveitamento de recursos. A pirólise, um processo termoquímico realizado na ausência de oxigênio, tem se destacado como uma alternativa promissora, permitindo a conversão do lodo em biocarvão, biogás e bio-óleo (Leme *et al.*, 2017).

A pirólise apresenta vantagens em relação a outros métodos de tratamento de resíduos, como aterros sanitários, digestão anaeróbica e incineração, principalmente por gerar um menor impacto ambiental. Em termos de Potencial de Aquecimento Global (GWP), a pirólise rápida de resíduos sólidos emite significativamente menos gases de efeito estufa. Seu índice GWP corresponde a apenas 36,8% do gerado pela digestão anaeróbica, 18% do produzido pela incineração e 21,8% do associado aos aterros sanitários (Pedroza *et al.*, 2017).

O bio-óleo, em particular, tem despertado interesse devido ao seu potencial para substituição de combustíveis fósseis e sua aplicabilidade na indústria química e energética. Esse líquido viscoso possui um alto poder calorífico e uma composição rica em compostos orgânicos, como fenóis, ácidos e hidrocarbonetos, tornando-o uma alternativa viável para a geração de energia térmica e elétrica. Para que o bio-óleo se assemelhe a combustíveis fósseis, é essencial que ele tenha um baixo teor de oxigênio e uma alta proporção entre hidrogênio e carbono. No petróleo, a razão molar entre hidrogênio e carbono (H/C) é de aproximadamente 1,95, enquanto a razão entre oxigênio e carbono (O/C) é zero. Já no bio-óleo obtido a partir do lodo de esgoto, esses valores são diferentes: a razão H/C é de 1,79 e a razão O/C é de 0,09 (Vieira & Alexandre, 2014).

Embora existam estudos sobre a obtenção de bio-óleo a partir da pirólise de diversas biomassas, ainda há lacunas no conhecimento sobre a caracterização do bio-óleo derivado especificamente do lodo de esgoto. A composição química desse subproduto influencia suas

propriedades físico-químicas, exigindo análises detalhadas para viabilizar sua aplicação em processos industriais. Além disso, a recuperação eficiente de energia a partir do bio-óleo está diretamente ligada à sua qualidade e ao desenvolvimento de processos de otimização que reduzam suas limitações (GOZ w Praktyce, 2024a; GOZ w Praktyce, 2024b).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo caracterizar o bio-óleo obtido da pirólise do lodo de esgoto, analisando suas propriedades físico-químicas e sua estabilidade térmica. Buscando contribuir para o avanço no aproveitamento energético desse resíduo, fornecendo dados que possam apoiar o desenvolvimento de tecnologias de melhoramento do bio-óleo e sua aplicação industrial. A caracterização detalhada desse subproduto contribuirá para a identificação de possíveis rotas de aproveitamento energético e químico, promovendo o desenvolvimento de estratégias mais eficientes para a gestão do lodo de esgoto e fortalecendo práticas sustentáveis alinhadas à economia circular.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica e ambiental do bio-óleo obtido pela pirólise do lodo gerado em ETEs da Paraíba como fonte sustentável de energia e matéria-prima industrial, através da investigação de suas propriedades físico-químicas e desempenho energético.

2.2. Objetivo Específicos

- Investigar o potencial do bio-óleo de pirólise oriundo de ETEs como fonte alternativa de energia, por meio de uma análise bibliométrica e sistemática.
- Caracterizar as fontes de bio-óleos provenientes de duas ETEs do estado da Paraíba, examinando sua influência nas propriedades físico-químicas.
- Comparar os bio-óleos gerados pelo processo de pirólise de lodos de ETEs com biocombustíveis comerciais, avaliando suas propriedades físicas.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os resíduos urbanos e industriais têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis para o seu tratamento e reaproveitamento. Entre esses resíduos, o lodo de esgoto destaca-se como um subproduto abundante das Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), gerando desafios ambientais e econômicos relacionados ao seu descarte.

O principal problema é que a maior parte do lodo de esgoto gerado nas ETEs é descartada em aterros sanitários (Silva *et al.*, 2022), uma prática insustentável que impede a reciclagem dos nutrientes presentes no material. Métodos convencionais de destinação, como essa disposição ou o uso agrícola, enfrentam limitações devido à presença de metais pesados, contaminantes orgânicos e patógenos. A pirólise é um processo termoquímico que permite a recuperação de energia a partir do lodo sanitário, promovendo a decomposição da matéria orgânica em um ambiente inerte (Vieira *et al.*, 2024).

Esse método vem sendo estudado como uma alternativa inovadora para converter esse resíduo em produtos de valor agregado, como o bio-óleo, contribuindo para a redução da disposição em aterros e a mitigação de impactos ambientais, além de promover a recuperação energética. Pesquisas recentes sobre o reaproveitamento energético do lodo de estações de tratamento de esgoto (ETE) envolvem a produção de bio-óleo por meio da pirólise e a incineração, destacando sua utilização como uma fonte energética eficiente, quando comparada às alternativas tradicionais, além de evitar o descarte inadequado no meio ambiente (Moura *et al.*, 2020).

3.1. Sustentabilidade Ambiental

A sustentabilidade ambiental é um conceito que abrange a utilização responsável dos recursos naturais, visando à preservação dos ecossistemas e à garantia de qualidade de vida para as gerações presentes e futuras. No contexto urbano, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) desempenham um papel fundamental na promoção da saúde pública e na proteção dos corpos hídricos contra a poluição. Contudo, o funcionamento dessas estações resulta na geração de diversos tipos de resíduos, especialmente o lodo de esgoto, cuja gestão adequada representa um dos principais desafios ambientais do setor de saneamento (ANA, 2023).

Diante desse cenário, diversas alternativas vêm sendo estudadas para transformar o lodo de esgoto em um recurso útil. O lodo seco, por exemplo, pode ser utilizado como material combustível em fornos de cimenteiras ou incorporado na fabricação de tijolos e blocos cerâmicos, o que contribui para a redução da extração de matérias-primas naturais e para o reaproveitamento energético do resíduo (ABES, 2022).

Entre essas estratégias, destaca-se a pirólise, que permite a conversão do lodo em produtos com valor energético, como bio-óleo, gás combustível e biochar. Essa técnica apresenta potencial significativo por promover a valorização de um subproduto abundante, ao mesmo tempo em que reduz os impactos ambientais associados ao descarte convencional (Hanif *et al.*, 2016). O bio-óleo, em particular, pode ser utilizado como combustível alternativo, ajudando a

diminuir a dependência de derivados de petróleo não renováveis (Wan Razinang et al., 2022). No entanto, para que essa solução seja tecnicamente viável em escala industrial, ainda são necessários avanços no desenvolvimento tecnológico e na otimização dos processos.

A adoção dessas alternativas depende de fatores como regulamentações sanitárias e ambientais, viabilidade técnica e econômica das tecnologias envolvidas e monitoramento contínuo da qualidade do lodo. Nesse contexto, políticas públicas integradas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento tornam-se essenciais para consolidar soluções sustentáveis e seguras para a gestão dos resíduos gerados nas ETE's (ANA, 2023; ABES, 2022).

3.2. Lodo de Esgoto: Características e Desafios

O lodo de esgoto é uma mistura heterogênea. De acordo com Albarelo e Araujo (2024), ele é composto por matéria orgânica, microorganismos, metais pesados e nutrientes, resultante dos processos físicos, químicos e biológicos do tratamento de esgoto.

Sua disposição inadequada pode causar contaminação do solo e dos corpos hídricos, além de emissões de gases de efeito estufa. Embora seu uso como fertilizante seja uma alternativa amplamente explorada, a presença de contaminantes pode limitar essa aplicação, sendo necessário seguir as normas estabelecidas pela Lei nº 12.305, de 2010, para a sua utilização agrícola (BRASIL, 2010). Dessa forma, novas estratégias para o aproveitamento desse resíduo tornam-se essenciais para minimizar os impactos ambientais e criar oportunidades para a economia circular.

Atualmente, não há um consenso na literatura sobre o volume total de SS (Sólidos Secos) produzido globalmente, sendo necessário estimá-lo com base nas estatísticas mais recentes disponíveis. A produção anual de sólidos secos, expressa em milhões de toneladas (Mt), varia entre os países. Nos Estados Unidos, são geradas 4,96 Mt por ano, enquanto no Brasil a produção anual atinge 2,5 Mt. A China lidera com 11,2 Mt, seguida pela União Europeia (UE-27) com 9,25 Mt e a Índia com 4,36 Mt. O Japão produz 2,2 Mt e o Reino Unido, 1,25 Mt. Em relação à produção per capita, a UE-27 apresenta o maior valor, com 19 kg/ano, seguida pelo Reino Unido (17 kg/ano), Japão (16 kg/ano), Austrália (15 kg/ano) e Estados Unidos (14 kg/ano). No Brasil, a produção per capita é de 11 kg/ano, enquanto na China é de 7 kg/ano e na Índia, 3 kg/ano (Feng *et al.*, 2023).

3.3. Pirólise como Alternativa Sustentável

A pirólise é um processo termoquímico endotérmico no qual a biomassa passa por decomposição térmica direta na ausência de oxigênio. Esse processo gera produtos com potencial

energético, incluindo um resíduo sólido chamado biocarvão, um líquido conhecido como bio-óleo e gases como hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO) e metano (CH_4) (Santos *et al.*, 2018). Esse processo apresenta vantagens significativas, como a redução do volume de resíduos, a recuperação de energia e a mitigação da emissão de poluentes.

O biocarvão resultante pode ser aplicado na remediação de solos e no armazenamento de carbono, enquanto os gases podem ser reaproveitados na geração de energia térmica para alimentar o próprio processo. No entanto, um dos produtos mais promissores da pirólise do lodo de esgoto é o bio-óleo, devido ao seu potencial como fonte de energia renovável e matéria-prima para a indústria química (Silva *et al.*, 2023).

O bio-óleo é um líquido escuro e altamente viscoso, composto por uma mistura complexa de compostos orgânicos, como fenóis, ácidos, cetonas e hidrocarbonetos oxigenados. Suas características físico-químicas podem variar conforme a temperatura da pirólise e a composição do lodo de esgoto utilizado. Além disso, sua composição química é semelhante à da biomassa e apresenta um alto teor de água, influenciado tanto pela umidade inicial do material quanto pela cinética de reação envolvida no processo (Bridgwater, 2012).

Do ponto de vista energético, o bio-óleo apresenta um poder calorífico inferior ao de combustíveis fósseis convencionais, mas ainda assim pode ser utilizado em caldeiras, fornos e motores para geração de calor e eletricidade (Araújo, 2024). Além disso, pode ser refinado para a produção de produtos químicos de alto valor agregado, como biocombustíveis e solventes industriais. Diversos estudiosos vêm analisando a pirólise do lodo de esgoto como uma alternativa viável para a produção de combustíveis líquidos e produtos químicos (Fonts *et al.*, 2012). Pesquisas têm sido desenvolvidas para aprimorar os processos de destilação e hidrotratamento, visando melhorar a qualidade do produto final.

3.4. Técnicas de caracterização aplicadas aos bioprodutos das ETEs

A avaliação da eficiência de processos de conversão energética de resíduos provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE's) requer uma caracterização aprofundada das propriedades físico-químicas e térmicas desses materiais. Técnicas analíticas como densidade, viscosidade, poder calorífico inferior (PCI), espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e análises térmicas (TG/DTG/DSC) têm sido amplamente empregadas para esse fim, fornecendo subsídios técnicos para a definição de rotas de valorização mais eficientes e sustentáveis.

A densidade é uma das propriedades físico-químicas fundamentais avaliadas na caracterização de novos materiais, especialmente quando se busca estimar sua viabilidade como

fonte energética. No caso do bio-óleo obtido pela pirólise, a densidade média observada é de aproximadamente 1.220 kg/m^3 a 20°C — valor significativamente superior ao dos combustíveis líquidos convencionais. Essa característica reflete a complexidade composicional do material, composta por uma ampla variedade de compostos orgânicos de alta massa molecular e por um teor considerável de água. Através dessa análise, é possível inferir não apenas sobre o comportamento do bio-óleo em etapas de transporte e armazenamento, mas também sobre sua eficiência na combustão e sua adequação para aplicação em sistemas energéticos. Densidades elevadas podem indicar maiores desafios operacionais, como dificuldade na atomização e menor rendimento energético, o que reforça a importância de técnicas de caracterização como ferramenta decisiva na avaliação e no aprimoramento de novos combustíveis alternativos (Rodrigues *et al.*, 2011).

A viscosidade é uma propriedade fundamental dos fluidos que determina sua resistência ao escoamento sob a influência da gravidade, em uma temperatura específica. A viscosidade cinemática, em particular, é amplamente utilizada como um indicador de qualidade em diversos setores industriais, incluindo óleo e gás, petroquímico, alimentício, farmacêutico, têxtil e de tintas (INMETRO, 2016).

Em relação aos biocombustíveis e bio-óleos, essa característica influencia diretamente a eficiência de processos como a injeção, atomização e combustão, além de impactar a logística de armazenamento e transporte (Corrêa *et al.*, 2020). No caso dos bio-óleos, a viscosidade também é um fator determinante para sua viabilidade como fonte energética, afetando tanto sua eficiência quanto a facilidade de manipulação (Araújo *et al.*, 2010).

O Poder Calorífico Inferior (PCI) é um dos principais indicadores de eficiência energética, também conhecido como calor de combustão, é um dos parâmetros essenciais para avaliar a qualidade dos combustíveis, pois indica a quantidade de energia liberada durante a combustão (Francesquett *et al.*, 2011). No caso do lodo, o Poder Calorífico Inferior é um fator crucial para avaliar seu potencial como combustível. Durante a combustão, parte da energia gerada é utilizada para vaporizar a água presente no material ou formada como subproduto da reação. O PCI quantifica a energia efetivamente disponível para uso, desconsiderando a energia associada à condensação do vapor de água. Por isso, lodos com alto teor de umidade tendem a apresentar menor eficiência energética.

A pirólise do lodo de esgoto resulta na formação de bio-óleo com um perfil químico complexo, o que torna essencial a aplicação de técnicas analíticas para identificar os grupos funcionais presentes. A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma das ferramentas mais eficazes para essa finalidade, pois detecta diferentes grupos funcionais

com base na absorção de radiação infravermelha. Essa técnica permite uma avaliação qualitativa e semiquantitativa tanto do lodo quanto dos produtos obtidos após a pirólise.

A análise de FTIR permite identificar grupos funcionais com base nas bandas de absorção em diferentes comprimentos de onda (número de onda em cm^{-1}). A interpretação dessas bandas espectrais possibilita a compreensão da composição química dos materiais e fornece informações sobre as reações envolvidas no processo de degradação térmica. A identificação de grupos fenólicos, carboxílicos, hidrocarbonetos e compostos nitrogenados revela a complexidade química do material e sua reatividade térmica, fatores que influenciam diretamente na eficiência energética e na composição dos produtos finais (Pavia *et al.*, 2010).

A pirólise do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) tem se destacado como uma alternativa promissora para a conversão de resíduos em produtos de valor agregado, como o bio-óleo. Para viabilizar seu aproveitamento energético e industrial, é essencial compreender de forma aprofundada as propriedades térmicas e químicas dos materiais envolvidos. Nesse contexto, técnicas termoanalíticas como a Termogravimetria (TGA), sua derivada (DTG) e a Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) são amplamente empregadas. (Petrovič *et al.*, 2021).

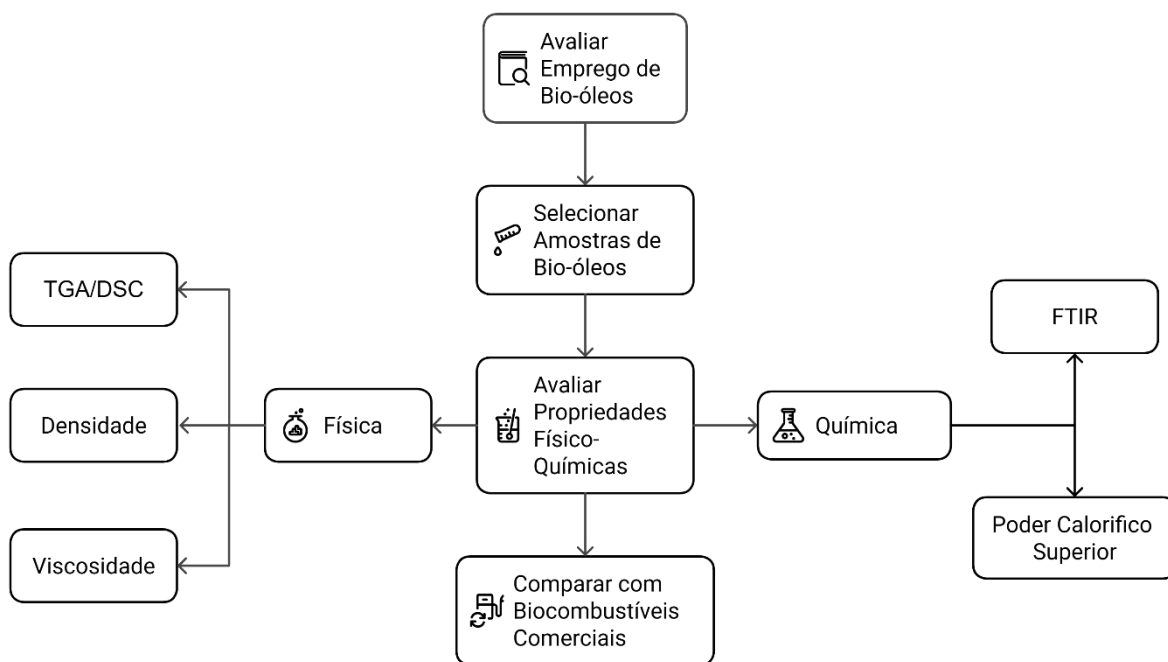
A TGA e a DTG permitem avaliar a estabilidade térmica e a composição do resíduo, identificando as faixas de temperatura associadas à perda de umidade, à decomposição de compostos orgânicos e à formação de resíduos inorgânicos (cinzas). A análise por DSC, por sua vez, complementa essas informações ao detectar eventos endotérmicos e exotérmicos, possibilitando a identificação de transições térmicas relacionadas à evaporação de água, à quebra de ligações químicas e à liberação de energia. (Urbano; Antal, 1982).

As análises realizadas fornecem dados cruciais sobre os perfis de decomposição térmica, as temperaturas de início e término da degradação e a quantidade de resíduos sólidos remanescentes, os quais são fundamentais para avaliar a reatividade térmica e o potencial dos bio-óleos como fontes de energia renovável.

Assim, a integração dessas técnicas fornece uma base sólida para avaliar a eficiência dos resíduos das ETE's como fontes energéticas alternativas, além de auxiliar na otimização de processos como secagem, pirólise, co-combustão e aplicação agrícola.

4. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos da pesquisa, foram empregadas as etapas apresentadas na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma do Processo Metodológico.

Fonte: Autoria própria (2025).

4.1. Avaliação Bibliométrica e Sistemática

Neste estudo, ambas as abordagens foram empregadas com o objetivo de mapear tendências, identificar contribuições-chave e oferecer uma visão consolidada sobre o estado atual da pesquisa relacionada ao bio-óleo obtido pela pirólise do lodo de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). A partir dessa análise integrada, buscou-se não apenas traçar o panorama da produção científica, mas também apontar direções estratégicas para investigações futuras.

4.1.1. Método de Revisão

Este trabalho adotou uma abordagem metodológica mista, composta por uma análise bibliométrica, fundamentada em dados quantitativos extraídos de bases de dados científicas, e uma análise sistemática, centrada na interpretação qualitativa do conteúdo dos estudos mais relevantes. O objetivo foi compreender a aplicação da pirólise como rota tecnológica sustentável para a valorização energética de lodos oriundos de estações de tratamento de esgoto (ETE).

A etapa bibliométrica foi conduzida com o auxílio do *software* RStudio, por meio do pacote Bibliometrix, amplamente reconhecido por sua robustez na análise estatística de dados científicos.

Foram aplicadas três leis clássicas da bibliometria para estruturação da análise:

- Lei de Lotka: para avaliar a produtividade científica dos autores;

- Lei de Bradford: para determinar a relevância dos periódicos no tema estudado;
- Lei de Zipf: para identificar as palavras-chave mais frequentes nos títulos, resumos e descritores dos artigos.

Adicionalmente, foi realizada a análise da distribuição geográfica da produção científica, com base no número de publicações por país. A coleta de dados ocorreu nas bases *Web of Science* e *Scopus*, abrangendo o período de 2014 a 2025, com a finalidade de capturar as principais tendências e contribuições da literatura sobre o tema.

A etapa sistemática consistiu na leitura crítica e integral dos 10 artigos mais citados entre os 30 selecionados na fase de filtragem bibliométrica. Essa análise qualitativa teve como objetivo aprofundar a compreensão sobre as principais contribuições científicas, metodologias empregadas, aplicações do bio-óleo obtido a partir da pirólise do lodo de ETE, e eventuais lacunas de conhecimento ainda existentes. A combinação entre os dados bibliométricos e as inferências sistemáticas permitiu uma visão integrada e crítica do estado da arte sobre o tema.

4.1.2. Coleta de Dados

A coleta foi realizada nas bases *Web of Science* e *Scopus*, com foco em publicações relacionadas ao bio-óleo proveniente da pirólise de lodo de ETE. Foram definidos dois eixos temáticos principais: (I) Pirólise e (II) Estação de Tratamento de Esgoto.

Para cada eixo, foram selecionadas palavras-chave específicas: no primeiro, "processo termoquímico" e "pirólise e suas variações; no segundo, "lodo", "estação de tratamento de esgoto" e "bio-óleo" com suas variações.

As palavras-chave utilizadas incluíram, em inglês, os seguintes termos e variações:

("Thermochemical process*" OR pyrolys*) AND ("Sewage sludge" OR "Sludge" OR "Biosolid*") AND ("Wastewater Treatment Plant" OR "WWTP" OR "Sewage Treatment Plant") AND ("Bio-oil" OR "Biofuel" OR "Liquid product").

Essa *string* de busca estruturada, com uso de operadores *booleanos* AND/OR, visou garantir a abrangência e a precisão dos resultados.

4.1.3. Análise de Dados

Os dados foram processados no RStudio com suporte do Bibliometrix, permitindo análises estatísticas avançadas e visualizações gráficas. Inicialmente, foram identificados 62 artigos: 18 da *Web of Science* e 44 da *Scopus*. Após a remoção de 7 duplicatas, consolidou-se um conjunto de 55 artigos.

A estrutura de variáveis diferiu entre as bases 54 na *Web of Science* e 34 na *Scopus*

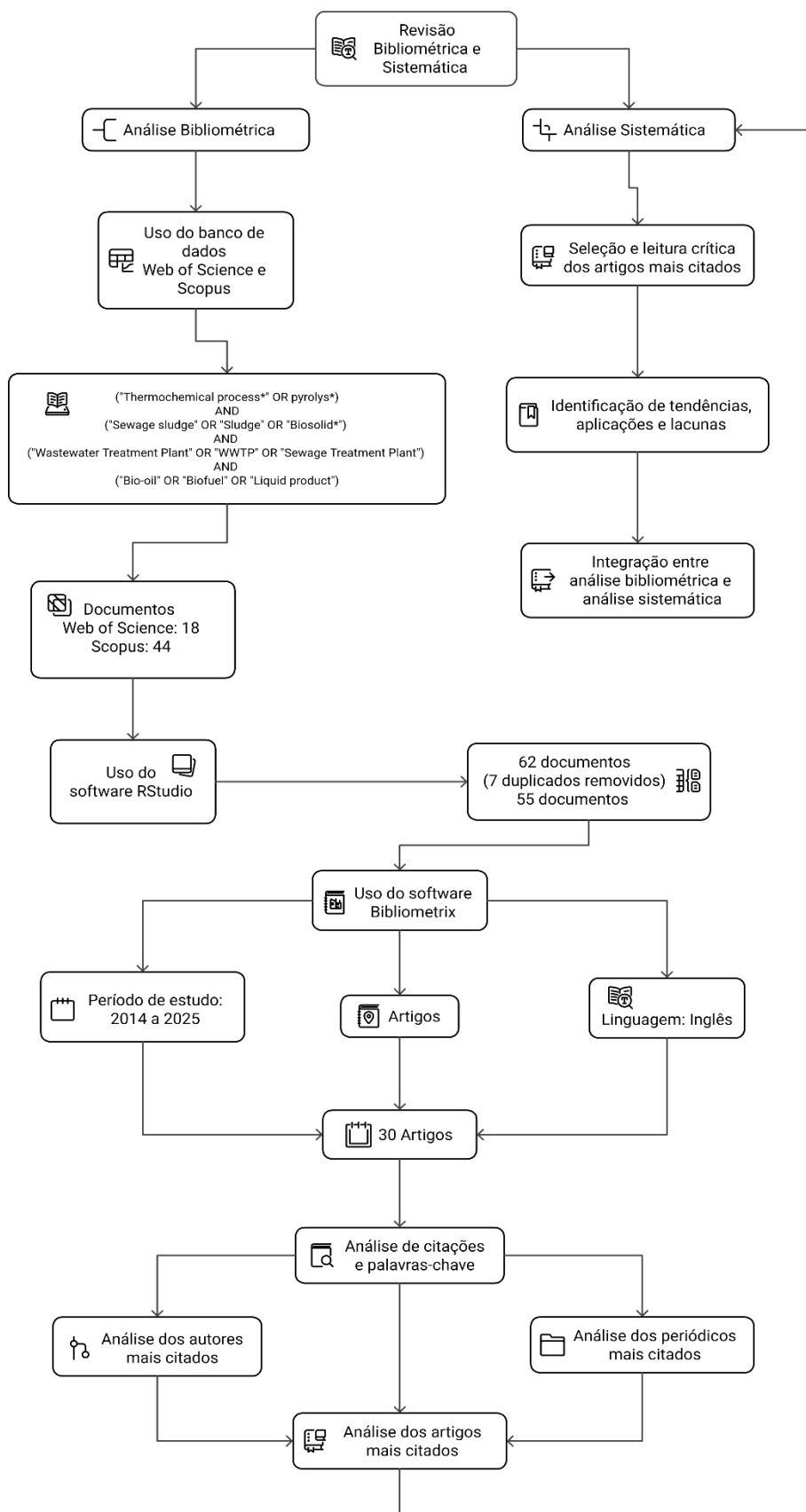
devido às particularidades dos formatos de exportação. No RStudio, essas informações foram padronizadas e enriquecidas, resultando em 60 variáveis. Posteriormente, um conjunto de 12 variáveis-chave foi selecionado para análise aprofundada, focando nas métricas mais relevantes, como autores, periódicos, palavras-chave e colaboração institucional.

Com base em critérios de inclusão publicações científicas em inglês, no período de 2014 a 2025, e alinhadas ao tema da pirólise de lodo de ETE foram selecionados 30 artigos para a etapa sistemática.

Na análise sistemática, os 10 artigos com maior número de citações foram lidos integralmente, possibilitando a identificação de tendências metodológicas, abordagens tecnológicas predominantes, potenciais aplicações do bio-óleo, e lacunas na literatura. Essa integração entre as análises bibliométrica e sistemática proporcionou uma base sólida para compreensão do panorama científico e tecnológico da temática.

Na Figura 2 apresenta-se o Fluxograma Esquématico do Processo da Avaliação Bibliométrica e Sistemática.

Figura 2. Fluxograma Esquématico do Processo da Avaliação Bibliométrica e Sistemática.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.2. Seleção das Amostras do Bio-óleo

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram adotados procedimentos experimentais voltados à caracterização físico-química dos bio-óleos obtidos a partir da pirólise do lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto (ETEs) da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (Cagepa), referentes a duas cidades representativas do estado da Paraíba: João Pessoa e Campina Grande. As amostras de bio-óleo foram cedidas pela empresa paraibana InPyro, responsável pelo processo de pirólise de lodos.

Foram analisadas três amostras distintas: BioJP (proveniente de lodo de ETE de João Pessoa), BioCG (proveniente de Campina Grande) e BioJPCG, composta por uma mistura 50/50 das duas anteriores. Na Figura 3 apresenta-se a identificação visual dessas amostras. Os métodos aplicados incluíram análises físico-químicas e avaliação de propriedades relevantes para a compreensão do comportamento dos bio-óleos sob diferentes condições.

Figura 3. Amostras de bio-óleos obtidas da pirólise de lodos de ETEs paraibanas.



Fonte: Autoria própria (2025).

4.3. Avaliação Físico-Química das Amostras do Bio-óleo

A caracterização físico-química dos bio-óleos obtidos por pirólise de lodos de ETEs é essencial para a compreensão de suas propriedades energéticas e térmicas. A partir das análises conduzidas, foram investigados parâmetros como densidade, viscosidade, poder calorífico e estabilidade térmica, com o objetivo de avaliar o potencial de aplicação desses bio-óleos como fontes renováveis de energia.

4.3.1. Determinação da Densidade

A determinação da densidade dos bio-óleos BioJP, BioCG e BioJPCG foi realizada utilizando um densímetro digital Anton Paar, equipado com bomba integrada. O equipamento opera em uma faixa de medição de densidade de 0 g/cm³ a 3 g/cm³, e temperatura de 0 °C a 40 °C (32 °F a 104 °F). As medições foram conduzidas em condições padronizadas a 20 °C, conforme especificado pela norma da ANP, assegurando precisão e reprodutibilidade dos resultados. Para cada análise, foram utilizados 10 mL de amostra. Os ensaios foram realizados no LabSMaC (Laboratório de Síntese e Caracterização de Materiais Cerâmicos) da UAEMa/UFCG.

4.3.2. Viscosidade Cinemática

A viscosidade cinemática das três amostras de bio-óleos foi determinada utilizando um viscosímetro cinemático Julabo, modelo ME-18-V, operando à temperatura de 40 °C, conforme ilustrado na Figura 4 e em conformidade com a norma ABNT NBR 10441. Para cada ensaio, foram utilizados 10 mL de amostra, e as medições foram realizadas em triplicata, garantindo a reprodutibilidade dos resultados. Os experimentos foram conduzidos no NPE-LACOM (Núcleo de Pesquisa e Extensão de Combustíveis e Materiais) da UFPB.

Figura 4. Ilustração fotográfica do Viscosímetro Cinemático Julabo ME-18-V.



Fonte: Autoria própria (2025).

A viscosidade cinemática (v) foi calculada pela Equação:

$$v = k \cdot t(s)$$

em que:

t: é o tempo de escoamento em segundos,

k: é a constante inerente às dimensões do viscosímetro utilizado,

v: é a viscosidade cinemática em mm²/s.

4.3.3. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)

A determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) das três amostras de bio-óleos foi realizada utilizando 0,2 mL \pm 0,1 mL em um calorímetro IKA C 200-System (Figura 5). Adicionalmente, foram analisadas amostras dos lodos de ETes das cidades de João Pessoa e Campina Grande, bem como da mistura entre ambas, utilizando 0,2 g \pm 0,1 g para cada ensaio. As medições, tanto dos bio-óleos quanto dos lodos, foram realizadas em duplicata.

Os experimentos foram conduzidos em uma célula de medição C 200, onde ocorreu a combustão da amostra pressurizada com oxigênio, acondicionada em um frasco de decomposição C 5010. O abastecimento de oxigênio foi realizado por uma estação de preenchimento C 248. Essa metodologia permitiu quantificar a energia liberada na combustão, sendo fundamental para a caracterização energética dos materiais analisados. As análises foram realizadas no LABMAQ (Laboratório de Materiais e Química Ambiental) do CEAR/UFPB.

Figura 5. Ilustração fotográfica do Calorímetro IKA C 200.



Fonte: Autoria própria (2025).

A fórmula utilizada para determina o poder calórico:

$$PCS = \frac{c \cdot \Delta T}{m} - Qc$$

em que:

c: Capacidade calorífica total do calorímetro (kJ/°C) (fornecida pelo fabricante ou determinada via calibração);

ΔT : Variação de temperatura (°C): ($T_{final} - T_{inicial}$);

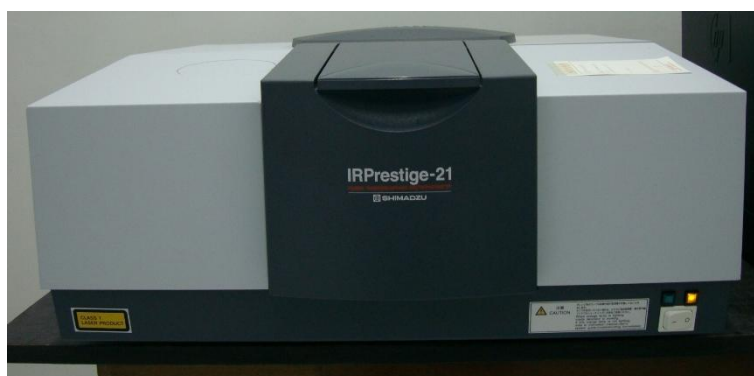
m: Massa da amostra (g);

Qc: Correções adicionais (energia liberada pela combustão do fio de ignição ou reações secundárias).

4.3.4. *Análise de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)*

A obtenção dos espectros de FTIR das três amostras de bio-óleos foi realizada em um espectrômetro IRPrestige-21 da marca SHIMADZU, conforme ilustrado na Figura 6. Foram utilizados 0,2 mL \pm 0,1 mL de cada amostra, operando na faixa de 4000 a 600 cm⁻¹ com o módulo de ATR (Reflexão Total Atenuada). As análises foram conduzidas com resolução de 4 cm⁻¹ e 20 varreduras, o que permitiu a identificação das bandas características dos materiais avaliados. Os ensaios foram realizados no NPE - LACOM (Núcleo de Pesquisa e Extensão de Combustíveis e Materiais) da UFPB.

Figura 6. Ilustração fotográfica do Espectrômetro modelo IRPrestige-21.



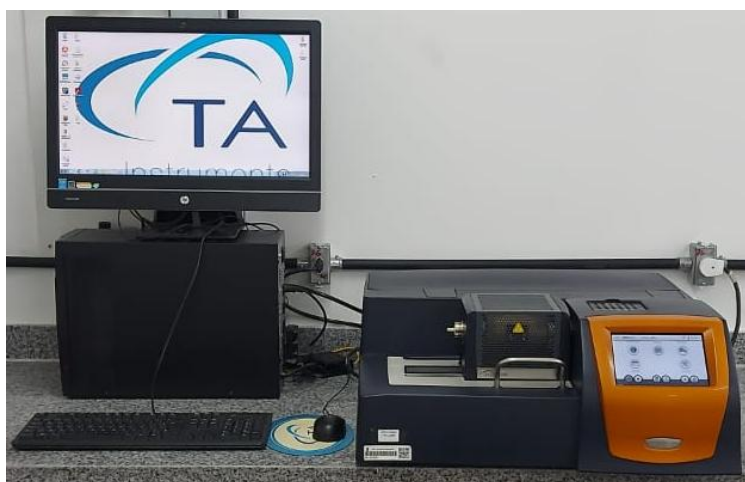
Fonte: Autoria própria (2025).

4.3.5. *Análise de Termogravimetria (TGA/DTG/DSC)*

As análises termogravimétricas (TGA/DTG/DSC) dos bio-óleos BioJP, BioCG e BioJPCG foram realizadas em um Analisador Térmico Simultâneo SDT 650, com capacidade de medição até 1500 °C (Figura 7). Foram utilizadas amostras de 0,2 mL \pm 0,1 mL, acondicionadas

em suportes de alumina, com taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. As análises foram conduzidas da temperatura ambiente até $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, sob atmosferas dinâmicas de argônio (gás inerte) e oxigênio (gás reativo), com vazão de $100\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. O objetivo foi identificar a temperatura de degradação da matéria orgânica, a liberação de voláteis e possíveis transformações de fase em altas temperaturas. Os ensaios foram realizados no LabFilm (Laboratório de Síntese e Caracterização de Filmes Finos) do CEAR/UFPB.

Figura 7. Ilustração fotográfica do Analisador Térmico Simultâneo SDT 650.



Fonte: Autoria própria (2025).

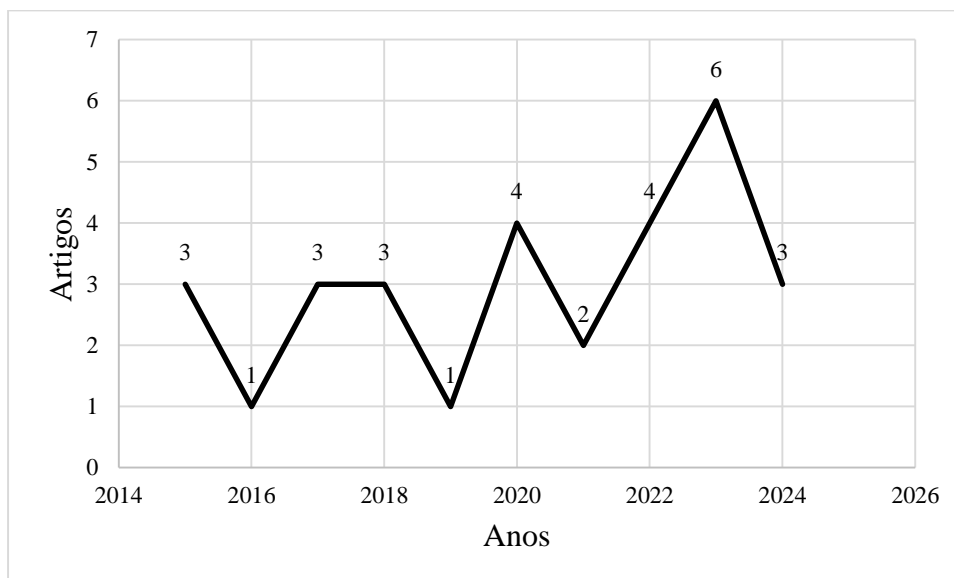
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliação Bibliométrica e Sistemática

Inicialmente, na Figura 8 foi ilustrado um recorte de tempo dos últimos 11 anos da produção científica que aborda o bio-óleo da pirólise do lodo de ETE. De forma geral, os dados apresentados realçam tanto a relevância como as tendências desta área de pesquisa. Considerando a linha de tempo adotada, a produção científica sobre o tema considerado tem demonstrado um crescimento consistente. Essa tendência reflete o aumento do interesse por soluções sustentáveis e inovadoras para o reaproveitamento de resíduos, alinhadas às metas globais de sustentabilidade.

Para os anos de 2014 e 2025, não foram identificados artigos. No período de 2015 a 2018, foram encontrados 10 artigos, representando 33% do portfólio bibliográfico analisado, possivelmente devido a avanços nas técnicas de pirólise ou políticas ambientais incentivadoras. Entre 2019 e 2024, o número de publicações aumentou significativamente, totalizando 20 artigos, o que corresponde a 66% do portfólio total. Esse crescimento sugere um impulso renovado e uma maior maturidade das pesquisas.

Figura 8. Produção Científica por ano abordando o tema bio-óleo da pirólise do lodo de estação de tratamento de esgoto entre os anos de 2014 – 2025.



Fonte: Autoria própria (2025).

O ano de 2023 registrou o maior número de publicações sobre o tema, com 6 artigos, representando 20% do portfólio. Este crescimento pode estar associado à implementação de novas regulamentações ambientais, avanços nas técnicas de pirólise ou por políticas ambientais incentivadoras, além de provável maior engajamento acadêmico e industrial.

Embora o número de publicações sobre o bio-óleo da pirólise do lodo de ETE seja menor quando comparado ao biocarvão e ao biogás, refletindo uma lacuna ainda expressiva na pesquisa e aplicação dessa tecnologia, os resultados encontrados indicam um crescente interesse nessa alternativa. Esse avanço está alinhado com a busca por soluções ambientalmente corretas para o tratamento do lodo, com destaque para a pirólise, que tem sido mais explorada na produção de biocarvão e biogás, contribuindo para abordagens mais sustentáveis. Ou seja, esse processo vai além da utilização desse tipo de resíduo como fertilizante agrícola (Vieira *et al.*, 2024; Hu *et al.*, 2022).

Considerando os anos de 2014 a 2025, Na Tabela 1 foram apresentadas as 10 principais fontes que abordam o tema bio-óleo da pirólise do lodo de ETE, juntamente com seus respectivos fatores de impacto. O fator de impacto é uma métrica utilizada na avaliação científica, auxiliando na identificação de fontes amplamente lidas, citadas e utilizadas, independentemente da localização geográfica (Salomão e Santos, 2025).

Tabela 1. Relevância dos periódicos e seus respectivos fatores de impacto nos artigos que

abordam o tema bio-óleo da pirólise do lodo de ETE.

Periódico	Nº de artigos	Fator de Impacto
Chemosphere	3	8.1
Journal of Environmental Management	3	8.0
Energies	3	3.0
Science of the Total Environment	2	8.2
Waste Management	2	7.1
Bioresource Technology	2	9.7
Energy	2	9.0
Acs Sustainable Chemistry and Engineering	1	7.1
Applied Energy	1	10.1
Biomass & Bioenergy	1	5.8

Fonte: Autoria própria (2025).

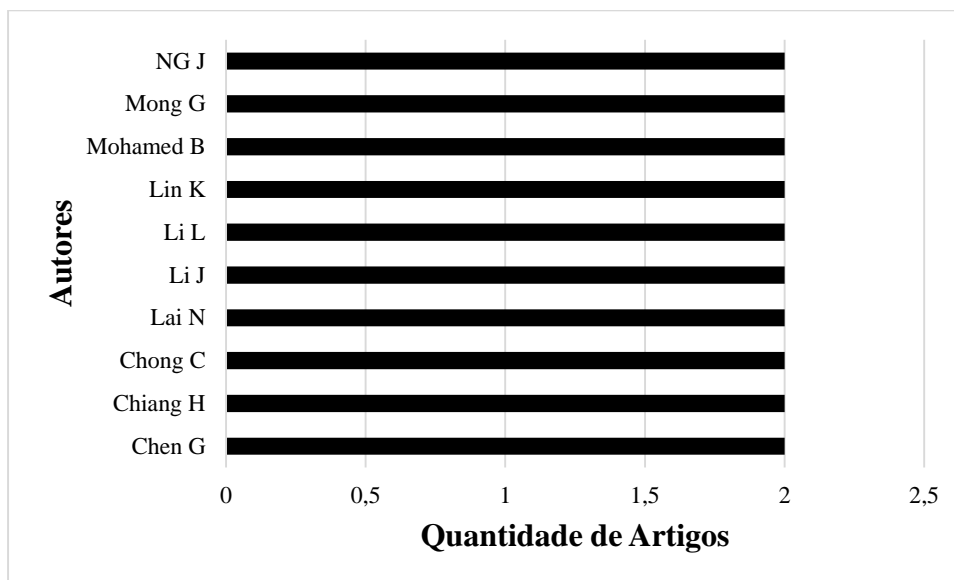
Os periódicos Chemosphere, Journal of Environmental Management e Energies apresentaram o maior número de publicações, em relação ao total, com 3 artigos cada. Além disso, as fontes Applied Energy, Bioresource Technology e Energy, exibiram os maiores fatores de impacto, 10.1, 9.7 e 9.0, respectivamente, tendo em vista que são reconhecidas por difundirem temas como sustentabilidade e eficiência energética; bioenergia e valorização de resíduos; e produção, conversão e impacto ambiental da energia.

Além disso, embora o periódico Applied Energy contabilizou apenas um artigo, seu alto fator de impacto, 10.1, respectivamente, reforçam a importância dessas fontes para a disseminação de pesquisas de alta qualidade no tema. Essa disparidade entre número de publicações e impacto destaca a diversidade de abordagens e prestígio dentro das fontes científicas relacionadas à bio-óleo da pirólise do lodo de ETE.

A análise seguinte priorizou a identificação dos principais autores que contribuíram para a disseminação do conhecimento sobre a pirólise do bio-óleo do lodo de ETE entre 2014 e 2025. Como apresentado na Figura 9, todos os autores destacaram-se por publicar 3 artigos cada, em um universo de 30 publicações analisadas.

Ao correlacionar os aspectos temáticos das publicações, observa-se que os autores Mohamed B e Li L, em 2023, investigaram a co-pirólise de lodo de esgoto e microalgas para produção de biocombustíveis, com foco na sustentabilidade e análise econômica, Chen G e Li J, em 2017 e 2018, focaram na produção de óleo pirolítico e na pirólise supercrítica de lodo de esgoto, com ênfase em aplicações energéticas.

Figura 9. Principais autores por quantidade de artigos publicados entre os anos de 2014-2025.

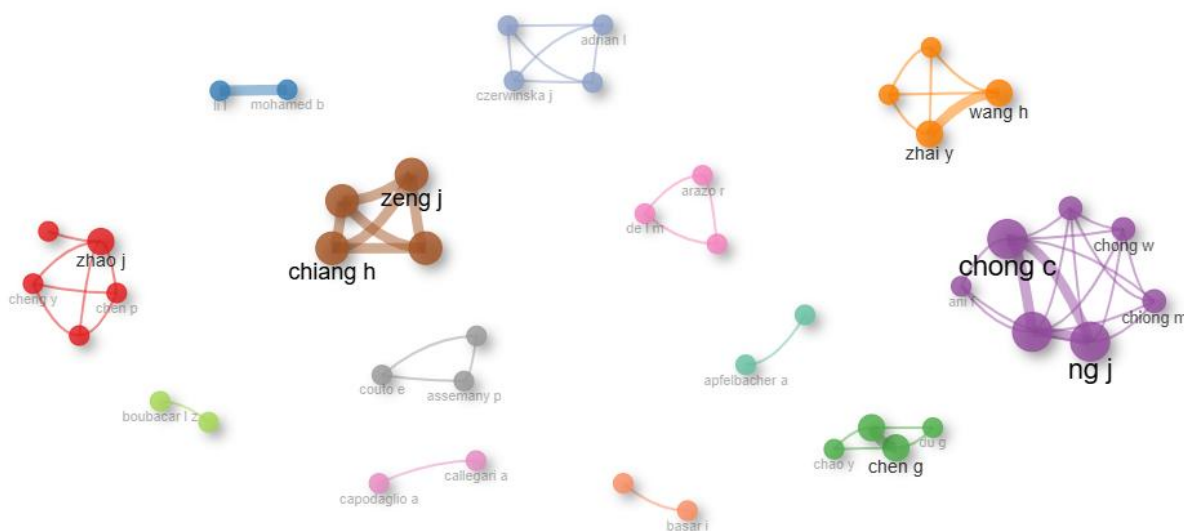


Fonte: Autoria própria (2025).

Esses estudos enfatizam abordagens inovadoras para a gestão de resíduos e a promoção de práticas ambientalmente responsáveis.

Na Figura 10 foi ilustrada a relação de coautoria existente entre os autores do portfólio bibliográfico analisado. A partir do Bibliometrix observa-se a presença de 13 *clusters* expressos pelas cores laranja, marrom, roxo, azul, rosa, verde, vermelho, cinza e ciano.

Figura 10. Correlação existente entre os autores na análise de coautoria realizada usando o Bibliometrix.



Fonte: Autoria própria (2025).

A ausência de *links* ligando os grupos indica que os autores não contribuíram em conjunto sobre a temática pirólise do bio-óleo do lodo de ETE, fator que ressalta o tema sendo pesquisado em particular por alguns grupos de pesquisas espalhados pelo mundo. Além disso, esse aspecto pode ser confirmado ao observar que os autores Mohamed B. e Chen G. aparecem em grupos separados e já foram destacados anteriormente pelo número de contribuições sobre o tema.

Na Tabela 2 está apresentada a análise da produção científica por país sobre o tema do bio-óleo da pirólise do lodo de ETE no período de 2014 a 2025. Os países de maior destaque foram a China, com 11 artigos e 280 citações, seguida pelos Estados Unidos, com 3 artigos e 111 citações, pelo Canadá, com 3 artigos e 61 citações, e pelo Brasil, com 2 artigos e 52 citações. Esses números refletem a liderança dessas nações na pesquisa sobre o tema, provavelmente impulsionada por fatores como condições econômicas, legislações ambientais rigorosas e avanços tecnológicos, que incentivam a busca por alternativas sustentáveis para o reaproveitamento do lodo, o qual, na ausência de tratamento adequado, geralmente é descartado em aterros sanitários ou corpos hídricos.

Tabela 2. Quantidade de publicações por países que mais concentraram estudos voltados a bio-óleo da pirólise do lodo de ETE entre os anos de 2014-2025.

País	Artigos	Citações
China	11	280
Estados Unidos	3	111
Canada	3	61
Brasil	2	52
Filipinas	1	99
Coréia do Sul	1	90
Itália	1	36
Espanha	1	36
Polônia	1	20
Alemanha	1	14

Fonte: Autoria própria (2025).

A China lidera tanto em número de publicações quanto em citações, provavelmente impulsionada por sua rápida industrialização e pela busca por soluções tecnológicas para a gestão de resíduos. Os Estados Unidos, por sua vez, mantêm destaque com um número expressivo de citações em relação às publicações, evidenciando o impacto significativo de suas contribuições científicas, especialmente em pesquisas que exploram o potencial econômico e ambiental da pirólise do lodo. O Brasil vem apresentando um quantitativo considerável em citações, refletindo uma combinação de esforços acadêmicos robustos e crescente visibilidade científica.

Outros países também contribuíram para a literatura científica, embora com menor intensidade. As Filipinas e a Coreia do Sul, por exemplo, registraram um número reduzido de artigos publicados (um cada), mas com expressivas 99 e 90 citações, respectivamente, o que pode sugerir a relevância qualitativa de suas pesquisas.

Tais estudos reforçam a importância global da pirólise como uma solução estratégica para o manejo de resíduos provenientes das ETEs. No entanto, de forma geral, se considerada a complexidade envolvida em relação aos contaminantes presentes neste tipo de resíduo, bem como o grande volume gerado diariamente, pode-se dizer que há uma forte necessidade de novas pesquisas e iniciativas voltadas para esta temática.

Assim, globalmente necessita-se de mais pesquisas, mas, por exemplo, em contrapartida, o Brasil, apesar de ser um dos principais produtores de lodo e detentor de muitos recursos naturais, apresenta apenas 2 artigos. Esse baixo número de publicações brasileiras, quando comparado com outros tipos de resíduos, como bagaço de cana-de-açúcar ou outros resíduos lignocelulósicos, e o reduzido impacto global apontam para uma lacuna no desenvolvimento de estudos sobre esta tecnologia sustentável. Esses dados também ressaltam a necessidade de maiores esforços acadêmicos e institucionais no Brasil para fomentar avanços nesta área. Iniciativas empresariais e governamentais podem desempenhar um papel crucial na ampliação da pesquisa e na aplicação da pirólise, aproveitando seu potencial ambiental e energético.

Na Figura 11 está ilustrada a análise de ocorrência das palavras-chave, destacando os termos mais citados nos estudos sobre o bio-óleo da pirólise do lodo de ETE. O *cluster* representado em verde agrupa os principais termos associados ao tema, como *pyrolysis*, *sewage sludge* e *biofuel*, entre outros. Essa análise é corroborada pela literatura, que enfatiza a proximidade entre os termos como uma característica crucial para identificar sua relevância e recorrência nas pesquisas científicas (Peixe e Pinto, 2021).

Os resultados estão alinhados com os termos observados na nuvem de palavras-chave ilustrada na Figura 12, na qual o tamanho das palavras reflete proporcionalmente sua frequência de ocorrência nos textos analisados. Entre as expressões de maior destaque estão *pyrolysis*, *sewage*, *biofuel* e *biomass*, evidenciando a ênfase dos estudos na produção sustentável de bioprodutos e na gestão de resíduos provenientes de ETEs.

Tabela 3. Conjunto de artigos mais citados utilizados na análise sistemática abordando bio-óleo da pirólise do lodo de ETE entre os anos de 2014-2025.

Bioprodutos	Processo Termoquímico	Resíduo	Referência
Bio-óleo	Liquefação Pirólise	Lodo de esgoto	Yuan <i>et al.</i> (2015)
Bio-óleo Biocarvão Biogás	Pirólise	Lodo de esgoto	Arazo <i>et al.</i> (2017)
Bio-óleo Biocarvão Gás não condensável	Pirólise	Lodo de esgoto	Ma <i>et al.</i> (2017)
Bio-óleo Biodiesel Biocarvão Biogás	Pirólise	Lodo de esgoto	Xin <i>et al.</i> (2018)
Bio-óleo Biocarvão Biogás	Pirólise	Lodo de esgoto	González-Arias <i>et al.</i> (2020)

Fonte: Autoria própria (2025).

Os artigos abordam a produção de bioprodutos a partir de resíduos, com foco no lodo de esgoto, por meio de processos termoquímicos e biológicos. O bio-óleo, principal bioproducto estudado, é produzido principalmente por pirólise, em suas diferentes variações (convencional, rápida, em água supercrítica e assistida por micro-ondas). Alguns estudos investigam a produção de bio-óleos a partir de lodo de esgoto por liquefação e pirólise, analisando a presença de metais pesados e os riscos ambientais associados. Outros se concentram na otimização do rendimento e das propriedades do bio-óleo produzido por pirólise rápida em reatores de leito fluidizado, além de explorar os efeitos das condições de reação na pirólise em água supercrítica.

A produção de bio-óleos a partir de lodo de esgoto foi investigada por Yuan *et al.* (2015), que utilizaram liquefação com etanol ou acetona e pirólise a diferentes temperaturas. O estudo destaca a presença de metais pesados (como Zn e Ni) nos bio-óleos, representando um risco ambiental significativo, e sugere a necessidade de pré-tratamento do lodo. Já Arazo *et al.* (2017) focaram na pirólise rápida de lodo de esgoto seco em um reator de leito fluidizado, com o objetivo de otimizar o rendimento e as propriedades do bio-óleo, como o baixo teor de umidade e o alto valor calorífico, além de analisar os produtos gerados, como biochar e biogás.

A pirólise do lodo de esgoto em água supercrítica (ASC) foi explorada por Ma *et al.* (2017), que analisaram como a temperatura e o teor de umidade influenciam a distribuição dos produtos e a composição do bio-óleo. O estudo destaca a *supercritical water* (SCW) como uma

técnica promissora para tratar lodo com alto teor de umidade. Por outro lado, Xin *et al.* (2018) propuseram um sistema integrado para a valorização de resíduos de estações de tratamento de águas residuais, como lodo, espuma e centrado, utilizando processos como transesterificação, cultivo de microalgas e pirólise assistida por micro-ondas para a produção de biodiesel, bio-óleo e *syngas*.

González-Arias *et al.* (2020) investigaram a integração da digestão anaeróbica de lodo de esgoto e resíduos de gordura com a pirólise dos digestatos. O estudo analisa a cinética da pirólise e o balanço energético do processo integrado, destacando o aumento da produção de biogás ao adicionar gordura ao lodo.

O bio-óleo é o bioproduto mais comum nos estudos, com foco em otimizar seu rendimento e qualidade. A pirólise, sendo o processo termoquímico mais utilizado para a conversão do lodo, é investigada com variações no tipo de pirólise e nas condições de reação. Além disso, Yuan *et al.* (2015) e González-Arias *et al.* (2020) abordaram a avaliação de riscos ambientais, principalmente relacionados ao tratamento e uso do lodo e seus subprodutos, enquanto Xin *et al.* (2018) também destacaram a redução do impacto ambiental como um objetivo central do sistema integrado.

Por fim, Xin *et al.* (2018) e González-Arias *et al.* (2020) investigaram soluções integradas que combinam processos biológicos e termoquímicos, buscando aumentar a eficiência e gerar múltiplos bioprodutos. Esses artigos oferecem uma visão abrangente das tecnologias emergentes para a valorização do lodo de esgoto, com foco na otimização da produção de bio-óleo e na integração de processos para maximizar a eficiência e minimizar o impacto ambiental.

Os resultados obtidos demonstram que os 5 artigos mais citados têm abordagens metodológicas que refletem o caráter global das questões analisadas, com contribuições significativas para a economia circular e práticas ambientalmente responsáveis. A disseminação desses estudos fortalece a base científica para futuros avanços tecnológicos, como a otimização de processos de pirólise e o desenvolvimento de soluções para a gestão de resíduos de forma sustentável, além de potencializar aplicações práticas em áreas de alto impacto ambiental e social, como o tratamento de efluentes e a produção de bioenergia.

Com base nos resultados alcançados, é possível afirmar que os materiais abordados nos artigos despertam considerável interesse na comunidade científica internacional. A amplitude dos temas e a aplicação de metodologias abrangentes refletem a natureza global das questões exploradas. A disseminação desses resultados pode contribuir significativamente para o avanço do conhecimento em suas áreas específicas, como a eficiência energética e a redução da pegada de carbono associada ao tratamento de lodo de esgoto. Além disso, essa repercussão internacional

enriquece a compreensão global de temas relevantes nas respectivas áreas de pesquisa, apontando para a aplicação de tecnologias limpas e soluções integradas para a valorização de resíduos. Essa repercussão destaca a relevância e aplicabilidade amplas dessas investigações, oferecendo uma base sólida para futuras contribuições e aprofundamento nas áreas abordadas.

5.2. Avaliação Físico-Química das Amostras do Bio-óleo

5.2.1. Determinação da Densidade

Na Tabela 4 estão apresentadas as densidades das três amostras de bio-óleos analisados: BioJP, BioCG e BioJPCG, as análises foram feitas em triplicata, além dos cálculos de média e desvio padrão.

Tabela 4. Densidade das amostras de bio-óleo oriundos de lodos de ETE.

Bio-óleo	BioJP (g/cm ³)	BioCG (g/cm ³)	BioJPCG (g/cm ³)
Média	0,9332	0,9641	0,9623
Desvio Padrão	0,0063	0,0307	0,0008

Fonte: Autoria própria (2025).

Analisando a densidade dos bio-óleos, observou-se que a amostra BioJP apresentou a menor densidade média (0,9332 g/cm³), com um desvio padrão de 0,0063 g/cm³. Esse resultado sugere uma maior presença de frações leves ou um menor teor de compostos densos. Essa composição mais fluida pode ser vantajosa em aplicações que exigem menor viscosidade, contribuindo para um melhor desempenho em processos de combustão.

Por outro lado, o BioCG apresentou uma densidade média de 0,9641 g/cm³ e um desvio padrão elevado (0,0307 g/cm³), indicando uma maior variabilidade entre as amostras. Esse comportamento pode estar relacionado à presença de compostos mais densos, como substâncias oxigenadas ou impurezas, além da possível degradação ou emulsificação durante o processo de obtenção, uma vez que o bio-óleo não passou por etapas de purificação. Essa variabilidade pode afetar negativamente a eficiência do material, mas também pode torná-lo mais adequado a aplicações que toleram combustíveis mais densos.

A mistura BioJPCG, obtida a partir da combinação dos dois bio-óleos individuais, apresentou uma densidade média de 0,9623 g/cm³, muito próxima à do BioCG, porém com um desvio padrão significativamente menor (0,0008 g/cm³). Isso demonstra elevada uniformidade entre as amostras, sugerindo que o processo de mistura foi eficiente e resultou em uma composição estável. Apesar da alta densidade, a homogeneidade observada pode favorecer sua aplicação em determinadas condições, desde que adequações no processo de combustão sejam

consideradas.

Do ponto de vista das aplicações, a menor densidade da amostra BioJP pode indicar maior adequação a usos que exigem fluidez e menor viscosidade. A densidade intermediária do BioCG pode estar associada a uma composição mais complexa, sendo interessante para aplicações específicas que demandam bio-óleos mais densos. Já o BioJPCG, apesar de denso, apresentou excelente consistência, o que sugere que sua qualidade e estabilidade podem ser ainda mais otimizadas com ajustes no processo de homogeneização.

Em suma, o desvio padrão é um importante indicador de consistência e homogeneidade das amostras. BioJP e BioJPCG apresentaram boa estabilidade, enquanto o BioCG revelou maior variabilidade, indicando a necessidade de controle mais rigoroso em sua produção. Ainda assim, considerando que se tratam de amostras de bio-óleo bruto, os resultados obtidos refletem boa qualidade e estabilidade para os bio-óleos estudados, evidenciando seu potencial como combustíveis renováveis.

Na Tabela 5 estão apresentadas as densidades de diferentes combustíveis, como álcool, gasolina, biodiesel, querosene e outros derivados do petróleo. Essas informações são essenciais para comparar as propriedades físico-químicas dos combustíveis e entender como suas densidades podem influenciar seu desempenho em processos industriais e energéticos. A análise dessas densidades oferece percepções importantes para a aplicação de bio-óleos, como os obtidos da pirólise do lodo de esgoto, como fontes alternativas de energia e biocombustíveis.

Tabela 5. Densidade (g/cm³) do balanço energético nacional 2017 | Ano base 2016.

Combustível	Densidade (g/cm³)
Álcool Etílico Anidro	0,791
Álcool Etílico Hidratado	0,809
Biodiesel (B100)	0,880
Gasolina Automotiva	0,742
Gasolina de Aviação	0,726
Nafta	0,702
Óleo Combustível	1,000
Óleo Diesel	0,840
Outros Energéticos de Petróleo	0,864
Outros Não-energéticos de Petróleo	0,864
Petróleo	0,884
Querosene de Aviação	0,799
Querosene Iluminante	0,799

Fonte: MME (2017).

Em comparação com os combustíveis comerciais, a amostra BioJP apresenta uma densidade média de $0,9332 \text{ g/cm}^3$, valor próximo ao de combustíveis como o Biodiesel (B100) ($0,880 \text{ g/cm}^3$) e o Óleo Combustível ($1,000 \text{ g/cm}^3$). Embora ainda ligeiramente mais denso que esses, esse comportamento é esperado, considerando que o BioJP é um bio-óleo bruto, enquanto os combustíveis comerciais são refinados. Sua densidade também se aproxima da faixa de outros óleos combustíveis, como o Óleo Diesel ($0,840 \text{ g/cm}^3$), sugerindo que o BioJP pode apresentar características de combustibilidade favoráveis para uso em motores e sistemas de queima, desde que submetido a processos adequados de purificação.

A amostra BioCG, com densidade média de $0,9641 \text{ g/cm}^3$, apresenta um valor ligeiramente superior ao do BioJP, situando-se ainda na faixa de combustíveis mais densos, como o próprio Óleo Combustível. Isso indica um perfil químico com presença potencialmente maior de compostos oxigenados, polares ou de cadeias mais longas, o que pode conferir ao BioCG um perfil energético mais denso, embora suas características de queima possam ser distintas. Essa amostra pode ser mais indicada para aplicações que demandam combustíveis de maior densidade, desde que se observe a necessidade de tratamentos para remover impurezas e melhorar a estabilidade do material.

Por sua vez, a amostra BioJPCG, com densidade média de $0,9623 \text{ g/cm}^3$, apresentou um valor muito próximo ao do BioCG. No entanto, ao contrário do que se poderia esperar de uma mistura dos dois bio-óleos, a densidade resultante não superou significativamente as dos bio-óleos individuais, o que sugere que a mistura foi bem equilibrada em termos de massa específica. Isso pode indicar uma composição com potencial de aproveitamento, especialmente considerando seu baixo desvio padrão, que aponta para uma boa homogeneidade. Ainda assim, comparado aos combustíveis convencionais, a densidade do BioJPCG é mais alta que a do biodiesel e diesel, o que pode exigir ajustes no processo de combustão.

De modo geral, as amostras BioJP e BioCG, por apresentarem densidades dentro da faixa de combustíveis líquidos comercializados, mostram-se promissoras como matéria-prima para biocombustíveis, desde que passem por processos de refino ou purificação para adequação aos padrões de uso. Já o BioJPCG, mesmo com boa uniformidade, apresenta densidade elevada em comparação com o diesel e o biodiesel, o que pode limitar sua aplicação direta como combustível renovável. A presença de compostos mais pesados ou impurezas pode comprometer sua eficiência de combustão e desempenho energético, ressaltando a necessidade de otimização no processo de mistura e no tratamento do bio-óleo.

5.2.2. Viscosidade Cinemática

Conforme apresentado na Tabela 6, foram analisadas três amostras de bio-óleo, a saber, BioJP e BioCG (individuais) e BioJPCG (mistura de ambos) as análises foram feitas em triplicata, além dos cálculos de média e desvio padrão. A viscosidade cinemática das amostras foi determinada utilizando a constante $k = 0,03301 \text{ mm}^2/\text{s}^{-2}$, com o objetivo de avaliar seu comportamento e possíveis aplicações como biocombustível.

A variação observada na viscosidade entre as amostras individuais, pode estar associada à composição química dos bio-óleos e à distribuição de frações mais leves e pesadas, além de possivelmente a inclusão de fatores como tempo de envelhecimento e degradação. Viscosidades baixas podem ser vantajosas em aplicações como biocombustíveis, pois favorecem o bombeamento e a atomização durante a combustão.

Tabela 6. Viscosidade Cinemática das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE.

Bio-óleo	BioJP (mm^2/s)	BioCG (mm^2/s)	BioJPCG (mm^2/s)	Óleo Bruto de Amêndoa ¹
Média	22,42	33,5	22,27	27,72
Desvio Padrão	0,00	0,24	0,07	

Fonte: Autoria própria (2025). ¹Sousa, (2023)

Esses resultados são importantes para a seleção e otimização dos bio-óleos como biocombustíveis, pois a viscosidade influencia diretamente a eficiência na combustão e o desempenho dos motores que utilizam esses combustíveis. A otimização de bio-óleos para adquirir viscosidades adequadas pode resultar em melhores índices de performance e sustentabilidade, alinhando-se com a crescente demanda por fontes de energia renováveis.

Os valores de viscosidade obtidos para os bio-óleos analisados se inserem na faixa típica observada para esses materiais, cuja variação é influenciada pela matéria-prima e pelo processo de produção.

A amostra BioCG apresentou a maior viscosidade ($33,47 \text{ mm}^2/\text{s}$), indicando maior resistência ao escoamento, possivelmente devido à presença de compostos de maior peso molecular, como alcatrões e polímeros mais complexos. A amostra BioJP, por outro lado, apresentou menor viscosidade ($22,42 \text{ mm}^2/\text{s}$), refletindo maior fluidez logo, corroborando ao comportamento observado em relação as densidades destas amostras. A mistura BioJPCG registrou a menor viscosidade ($22,27 \text{ mm}^2/\text{s}$), sugerindo que a interação entre os compostos do BioJP e do BioCG resultou em uma leve redução da viscosidade em relação ao BioJP puro. Essa diferença sutil pode indicar que a fração do BioJP tem maior influência na mistura ou que os compostos do BioCG não alteraram significativamente a viscosidade quando combinados.

Para óleos combustíveis, os limites de viscosidade são mais amplos e podem ultrapassar 30 mm²/s. De acordo com a Resolução ANP nº 52, de 29 de dezembro de 2010, a viscosidade cinemática a 50°C para óleos combustíveis marítimos pode variar conforme o tipo, podendo apresentar viscosidade de 120 mm²/s, 180 mm²/s e 380 mm²/s (ANP, 2010).

Embora os bio-óleo analisados apresentem viscosidades superiores aos limites estabelecidos pela Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014, que determina uma faixa de 3,0 a 6,0 mm²/s para a viscosidade cinemática a 40°C para biodiesel, cuja exigência foi reafirmada na Nota Técnica nº 10/2021 (ANP, 2021), no entanto, esses bio-óleo podem ser ajustados para atender aos padrões de mercado por meio de processos adicionais de refino, destilação ou mistura com aditivos.

A viscosidade dos bio-óleos pode variar conforme a matéria-prima utilizada. Por exemplo, para o bio-óleo de mamona encontra-se viscosidade de 141,5 mm²/s (Silva, 2014), considerada alta, o que pode afetar sua fluidez e exigir ajustes para determinadas aplicações. Em contraste, os valores de viscosidade do BioJP (22,42 mm²/s) e do BioCG (33,47 mm²/s) estão dentro de uma faixa mais aceitável para aplicações industriais, como combustíveis e lubrificantes, embora possam necessitar de ajustes dependendo das condições específicas de uso.

As amostras de bio-óleo BioJP e BioCG apresentaram viscosidade cinemática relativamente próximo ao do óleo bruto de amêndoa (27,72 mm²/s) (Sousa, 2023), indicando um potencial para aplicações industriais. No entanto, processos de refinamento ou a adição de aditivos podem ser necessários para atender a especificações normativas mais rigorosas. A mistura BioJPCG manteve características próximas ao BioJP, sugerindo que este exerce maior influência na composição final.

5.2.3. Determinação de Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico das amostras de lodo de ETE foram feitas em duplicata, além dos cálculos de média, os resultados apresentados na Tabela 7, mostram que o lodo de CG apresentou o maior PCS médio (14,41 MJ/kg), enquanto o lodo de JP apresentou o menor valor (13,74 MJ/kg). A mistura JPCG apresentou um valor intermediário (14,22 MJ/kg), como esperado, com o PCS próximo ao das amostras individuais.

Tabela 7. Poder Calorífico das amostras de lodos oriundos de ETEs da Paraíba.

Amostra	Média (MJ/kg)
Lodo JP	13,74
Lodo CG	14,41
Lodo JPCG	14,22

Fonte: Autoria própria (2025).

Em relação ao poder calorífico dos seus respectivos bio-óleos, foram feitas em duplicata, além dos cálculos de média, tem-se que, conforme descrito na Tabela 8, a amostra BioCG apresentou o maior valor de PCS (41,50 MJ/kg), enquanto a amostra BioJP registrou o menor PCS (40,09 MJ/kg). A amostra BioJPCG, por sua vez, apresentou um valor intermediário (40,67 MJ/kg).

Tabela 8. Poder Calorífico das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE.

Amostra	Média (MJ/kg)
BioJP	40,09
BioCG	41,50
BioJPCG	40,67

Fonte: Autoria própria (2025).

O valor do poder calorífico apresentado pelas amostras BioJP (40,09 MJ/kg), BioCG (41,50 MJ/kg) e BioJPCG (40,67 MJ/kg) é mais elevado do que o de bio-óleos obtidos a partir de diferentes biomateriais, como o bagaço de cana-de-açúcar (27,75 MJ/kg), a casca de arroz (28,71 MJ/kg) e o rizoma de mandioca (28,45 MJ/kg) (Varma e Mondal, 2017; Sirijanusorn, Sriprateep e Pattiya, 2013; Abu Bakar e Titiloye, 2013).

De acordo com a Tabela 9, pode-se observar que os bio-óleos estudados apresentaram um PCS semelhante ao de combustíveis fósseis líquidos, o que torna este material uma importante alternativa viável para substituição parcial ou total em aplicações energéticas.

Tabela 9. Poderes Caloríficos Superior (MJ/kg) do balanço energético nacional 2017 | Ano base 2016.

Combustível	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)
Álcool Etílico Anidro	29,68
Álcool Etílico Hidratado	27,74
Biodiesel (B100)	39,08
Gasolina Automotiva	46,91
Gasolina de Aviação	47,18
Nafta	47,39
Óleo Combustível	42,17
Óleo Diesel	44,95
Outros Energéticos de Petróleo	45,24
Outros Não-energéticos de Petróleo	45,24
Petróleo	45,24
Querosene de Aviação	46,34
Querosene Iluminante	46,34

Fonte: MME (2017).

A comparação dos valores do poder calorífico superior (PCS) das amostras de bio-óleo e dos materiais apresentados na Tabela 9 revela que a amostra BioCG possui um PCS muito próximo ao do óleo combustível (42,17 MJ/kg) e do óleo diesel (44,49 MJ/kg). Já a amostra BioJPCG e o BioJP têm PCS menores, mas ainda superior ao do biodiesel (B100) (39,08 MJ/kg), com BioJPCG (40,67 MJ/kg) destacando-se por apresentar um valor ligeiramente superior ao do biodiesel.

Ao considerar a comparação das amostras de bio-óleo com outros combustíveis líquidos já comercializados, como gasolina automotiva e gasolina de aviação, tem-se que o PCS das amostras de bio-óleo se apresenta um pouco inferior, mas ainda assim um valor significativamente considerável para um combustível de origem renovável. Tal afirmação ganha mais consideração ainda quando ressalta-se que as amostras de bio-óleo de ETE não passaram por nenhum processo de purificação ou refino. Assim, a análise demonstra que, embora as amostras de bio-óleo não atinjam o PCS de combustíveis como gasolina, elas ainda se encontram dentro de uma faixa de PCS semelhante a alguns combustíveis fósseis.

Em relação as amostras de lodo (Lodo JP, Lodo CG e Lodo JPCG) tem-se que apresentaram valores de PCS significativamente menores quando comparadas aos combustíveis fósseis e renováveis listados na Tabela 9. O Lodo JPCG (14,22 MJ/kg), o Lodo CG (14,41 MJ/kg) e o Lodo JP (13,74 MJ/kg) possuem PCS bem inferiores ao do biodiesel (B100), que tem um PCS de 39,08 MJ/kg.

Os valores de PCS das amostras de lodo estão significativamente abaixo dos de combustíveis com maior potencial energético, como a gasolina de aviação. No entanto, apresentam valores superiores aos de alguns combustíveis sólidos, conforme dados do Ministério de Minas e Energia (2017), por exemplo, bagaço de cana-de-açúcar (9,45 MJ/kg), lenha catada e lenha comercial (13,81 MJ/kg). O carvão vegetal, por outro lado, possui um PCS de 28,46 MJ/kg, valor superior ao das amostras de lodo, embora ainda assim inferior aos combustíveis líquidos mais energéticos.

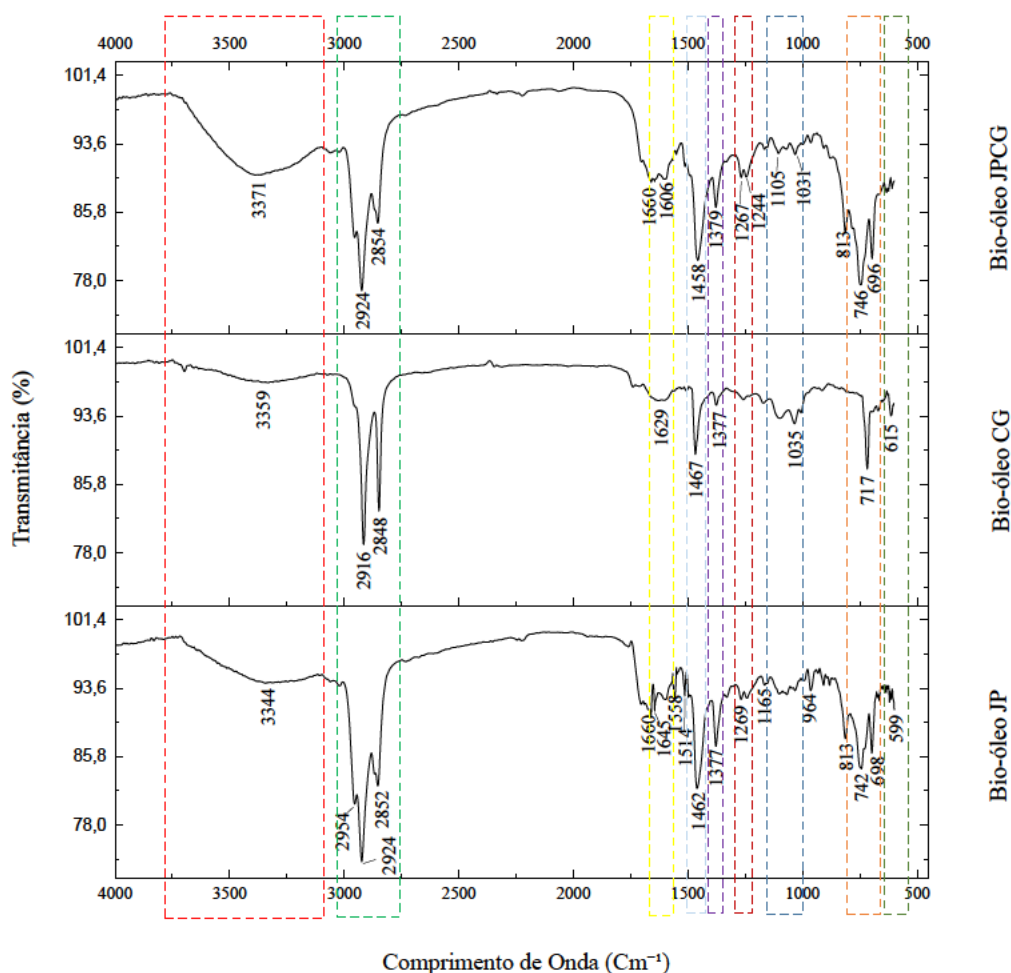
Essa comparação evidencia que as amostras de lodo possuem um poder calorífico inferior ao de muitos combustíveis, tanto fósseis quanto renováveis, o que sugere um menor valor energético para a sua queima em comparação aos outros materiais. Embora o lodo tenha menor valor energético, ele pode ser considerado para processos de coprocessamento em indústrias cimenteiras ou centrais de cogeração, desde que tratados aspectos como teor de umidade e composição de cinzas.

5.2.4. Análise de Espectrometria de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

Neste estudo, a técnica FTIR foi empregada para analisar as três amostras de bio-óleo derivadas da pirólise de lodo de ETE (BioJP, BioCG e BioJP CG).

A Figura 13 apresenta os espectros FTIR obtidos para cada amostra, destacando as principais bandas de absorção e os respectivos grupos funcionais identificados. A análise desses espectros possibilita a identificação de grupos funcionais como carbonilas, hidroxilas e éteres, fornecendo informações valiosas sobre a composição química dos bio-óleo. Esses resultados são fundamentais para avaliar o potencial de aplicação desses materiais nos setores energético, químico e industrial.

Figura 13. Análise de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) das amostras de bio-óleo de lodo de ETE.



Fonte: Autoria própria (2025).

As principais bandas observadas nos espectros FTIR das amostras analisadas estão descritas na Tabela 10, destacando a presença de grupos funcionais como hidroxilas, alquilas, carbonilas e compostos aromáticos.

Tabela 10. Atribuições para as principais bandas do espectro FTIR.

Número de onda (cm ⁻¹)	Atribuições
3371 – 3344	Estiramento O–H, característico de grupos hidroxila presentes em álcoois e fenóis. Pode indicar também presença de umidade. Associado à alta polaridade e reatividade.
2954 – 2848	Estiramentos assimétrico e simétrico C–H de grupos metila (CH ₃) e metileno (CH ₂), típicos de hidrocarbonetos alifáticos saturados (alcanos).
1660	Estiramento de C=O (grupos carbonílicos), indicando a presença de compostos como cetonas, aldeídos e ácidos carboxílicos. Reflete oxigenação elevada do bio-óleo.
1629 – 1606	Estiramento de C=C em compostos aromáticos e/ou alcenos. Em alguns casos, também pode haver sobreposição com C=O conjugado (ex: α,β -insaturados).
1511	Estiramento de ligações C=C específicas de anéis aromáticos, indicando estruturas com alta conjugação eletrônica.
1467 – 1458	Dobramento angular de C–H em grupos metila e metileno, comuns em estruturas alifáticas. Refletem a presença de cadeias saturadas.
1379 – 1371	Dobramento simétrico de CH ₃ , possivelmente associados a grupos metila ou isopropila. Indicadores de ramificações em cadeias alifáticas.
1267 – 1269	Estiramento de C–O em fenóis ou ésteres, associada a compostos oxigenados de média polaridade.
1174	Estiramento C–O relacionado a álcoois terciários ou ésteres mais ramificados, indicando variação na estrutura molecular dos oxigenados.
1105 – 1035	Estiramentos C–O–C e C–O de éteres e álcoois. Esta região é rica em informações sobre compostos oxigenados, como glicóis e polióis.
964	Vibração fora do plano das ligações C=C de alcenos (cis ou trans), sugerindo compostos com insaturações isoladas.
813	Deformações fora do plano dos anéis aromáticos substituídos, confirmando a presença de estruturas com alta conjugação e complexidade.
746 – 689	Deformações fora do plano das ligações C–H aromáticas, típicas de compostos aromáticos substituídos. A banda em 696 cm ⁻¹ pode sugerir substituições mono- ou orto-.
615 – 599	Vibrações fora do plano possivelmente associadas a deformações de ligações C–H em anéis aromáticos ou presença de haletos orgânicos (clorados, por exemplo).

Fonte: (Pavia *et al.*, 2010).

Os espectros dos três bio-óleos revelam similaridades marcantes, refletindo a presença de compostos comuns, embora diferenças sutis indiquem variações relacionadas à origem da matéria-prima e às condições específicas da pirólise de cada amostra.

A banda larga observada na região de 3370–3300 cm^{-1} nos três bio-óleos é atribuída à vibração de estiramento da ligação O–H, característica de grupos hidroxila. Essa absorção pode estar associada à presença de umidade residual, álcoois ou fenóis — compostos oxigenados típicos de bio-óleos. A intensidade dessas bandas também pode indicar uma elevada polaridade e reatividade, influenciando diretamente a estabilidade térmica e o poder calorífico dos bio-óleos.

As bandas localizadas entre 2950 e 2850 cm^{-1} são atribuídas ao estiramento das ligações C–H de grupos metila e metileno, indicando a presença de hidrocarbonetos alifáticos saturados. Segundo Pereira et al. (2021), as bandas em torno de 2923 cm^{-1} e 2853 cm^{-1} são características das vibrações de alongamento da ligação C–H nos grupos metileno (CH_2) e metila (CH_3) em cadeias alifáticas. Já a região entre 1700 e 1600 cm^{-1} revela bandas associadas tanto a estiramentos de ligações C=O (carbonilas) quanto C=C (aromáticas), evidenciando a presença de compostos aromáticos e oxigenados conjugados. As bandas nessa faixa indicam compostos como cetonas, aldeídos, ésteres e ácidos carboxílicos, frequentemente encontrados em bio-óleos (Sousa et al., 2021).

A presença de estruturas aromáticas pode ter duas origens principais: (i) a decomposição térmica de compostos orgânicos durante o processo de pirólise e (ii) a incorporação de contaminantes industriais, como solventes, hidrocarbonetos derivados de petróleo e outros poluentes despejados em esgotos, que se integram à matriz do lodo e são convertidos em bio-óleo. Esses compostos, além de conferirem toxicidade e maior resistência à biodegradação, contribuem para a complexidade química dos bio-óleos.

As bandas entre 1300 e 1000 cm^{-1} são atribuídas às vibrações de estiramento das ligações C–O e C–O–C, geralmente associadas à presença de compostos oxigenados como éteres, álcoois, fenóis e ésteres. Esta região apresenta uma complexidade espectral considerável, com bandas adicionais relacionadas a ligações C–H e C–N, indicando também a possível presença de compostos nitrogenados e estruturas heterocíclicas (Pavia et al., 2010). Notadamente, o bio-óleo BioJPCG exibe maior número e diversidade de bandas nessa faixa, sugerindo uma composição mais complexa e rica em compostos oxigenados, possivelmente decorrente da combinação dos resíduos urbanos de diferentes origens.

Por fim, as bandas observadas abaixo de 900 cm^{-1} , especialmente proeminentes nos bio-óleos BioJP e BioJPCG, estão relacionadas às deformações fora do plano das ligações C–H aromáticas. Essas vibrações são características de anéis aromáticos substituídos, corroborando a

presença de estruturas aromáticas complexas nas amostras analisadas.

A análise dos espectros de FTIR evidencia, portanto, que os bio-óleos possuem uma composição complexa, com predominância de compostos oxigenados, hidrocarbonetos saturados e estruturas aromáticas. Essas informações são cruciais para o entendimento das propriedades físico-químicas dos bio-óleos, influenciando diretamente sua aplicabilidade como fonte de energia renovável ou matéria-prima para rotas de refino.

Com base nos grupos funcionais identificados, é possível discutir os impactos diretos dessa composição na aplicação dos bio-óleos como combustíveis alternativos. Observa-se que as três amostras de bio-óleo de lodo de ETE apresentaram perfis espectrais semelhantes, com variações na intensidade das bandas que reforçam as diferenças na composição química.

O BioJPCG exibe uma absorção mais intensa na região de 3371 cm^{-1} , sugerindo maior presença de grupos hidroxila, associados a fenóis, álcoois ou umidade residual. O BioCG, por sua vez, apresenta uma banda menos pronunciada na região de 1700 cm^{-1} , o que pode indicar menor concentração de compostos carbonílicos. Já o BioJP apresenta um perfil intermediário, com bandas bem definidas em todas as regiões analisadas.

Essas diferenças podem ser atribuídas à variação na composição da matéria-prima e às condições locais de geração do lodo. Apesar das amostras serem oriundas do mesmo estado e submetidas às mesmas condições de pirólise, fatores como a presença de atividades industriais distintas nas cidades de origem, bem como a sazonalidade, podem influenciar significativamente a composição final dos bio-óleos.

A presença de grupos funcionais como hidroxilas, carbonilas e compostos aromáticos confirma a complexidade típica de materiais derivados da biomassa. Essa composição impacta diretamente a viabilidade energética dos bio-óleos: hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos são desejáveis por contribuírem para o poder calorífico e a estabilidade térmica. Compostos fenólicos e ésteres, quando em equilíbrio, favorecem propriedades como viscosidade e solubilidade, facilitando a mistura com combustíveis fósseis.

No entanto, um excesso de grupos hidroxila e fenólicos pode aumentar a acidez e a higroscopicidade, dificultando o armazenamento e o uso direto como combustível. Altas concentrações de compostos carbonílicos comprometem a estabilidade química e promovem a corrosão em sistemas de combustão. Além disso, a presença de compostos heterocíclicos contendo nitrogênio é indesejável, pois pode contribuir para a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) durante a queima.

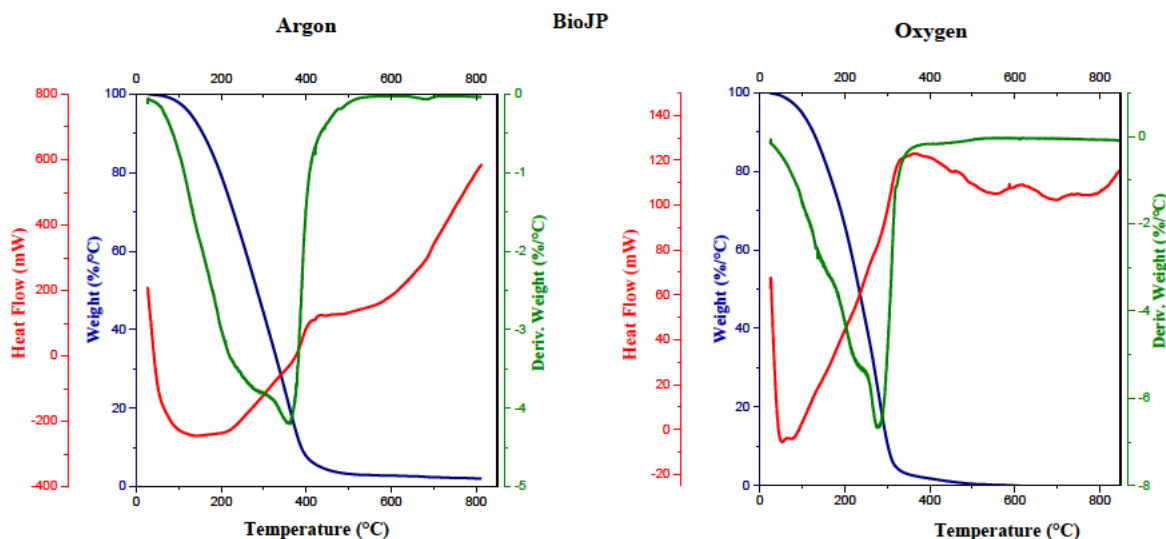
Portanto, os bio-óleos analisados apresentam um perfil com potencial energético, mas que exige tratamentos adicionais como hidrotratamento ou craqueamento catalítico para adequação

às exigências de uso como combustível. O equilíbrio entre os compostos presentes será determinante para sua aplicação em larga escala.

5.2.5. Análise de Termogravimetria (TGA/DTG/DSC)

A Figura 14 apresenta os perfis das análises termooanalíticas (TGA, DTG e DSC) do bio-óleo Bio JP, obtidos sob atmosferas de argônio (à esquerda) e oxigênio (à direita). É possível observar o impacto das diferentes atmosferas nas etapas de degradação térmica, bem como nos eventos endotérmicos e exotérmicos detectados.

Figura 14. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioJP sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).



Fonte: Autoria própria (2025).

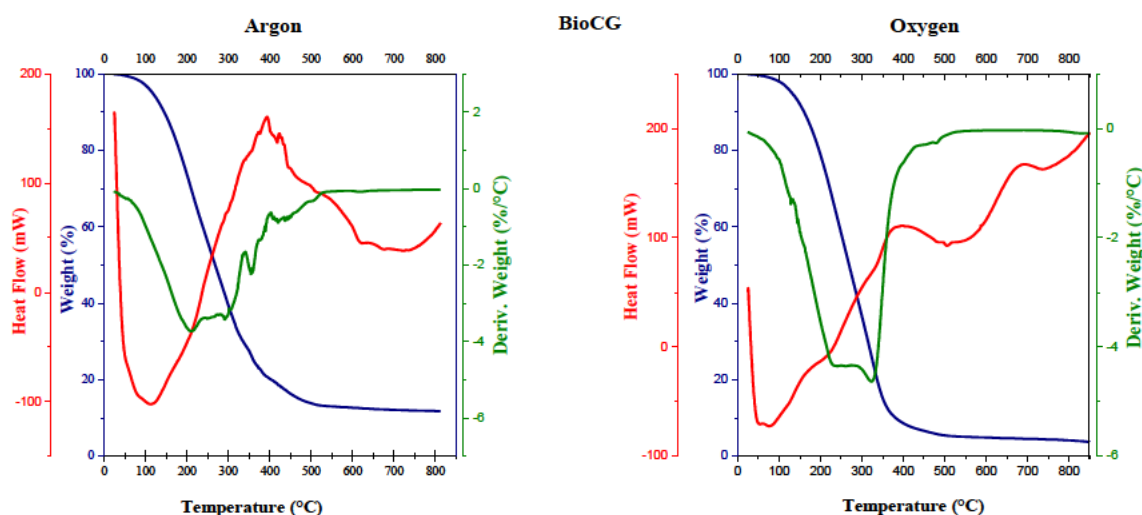
A amostra do BioJP sob atmosfera inerte (argônio), apresenta um perfil de degradação térmica em três etapas distintas. A curva de TGA revela uma perda de massa inicial modesta até aproximadamente 150 °C, associada à evaporação de compostos voláteis e umidade residual. A principal etapa de decomposição ocorre entre 200 °C e 400 °C, com uma perda acentuada de massa. A curva de DTG exhibe um pico pronunciado próximo de 320–350 °C, sugerindo um evento principal de degradação térmica, provavelmente relacionado à decomposição de frações orgânicas mais complexas. A curva de DSC indica eventos térmicos mistos, com um pico endotérmico entre 100 °C e 200 °C e um possível evento exotérmico próximo de 400 °C, que pode estar relacionado a rearranjos estruturais ou à liberação de energia interna.

Em atmosfera oxidante (oxigênio), o comportamento térmico é significativamente alterado. A perda de massa torna-se mais rápida e completa, estabilizando-se antes dos 500 °C. A curva de DTG mostra um pico mais agudo e intenso em temperaturas ligeiramente menores,

refletindo a aceleração da decomposição pela presença de oxigênio. Além disso, a curva de DSC exibe picos exotérmicos bem definidos entre 200 °C e 450 °C, indicando reações de oxidação e combustão de compostos orgânicos. O perfil sugere que, sob oxigênio, a amostra apresenta maior reatividade térmica e libera calor de forma mais expressiva durante a degradação.

Na Figura 15, são exibidos os resultados de TGA, DTG e DSC do BioCG sob atmosferas de argônio (à esquerda) e oxigênio (à direita) em função da temperatura, revelando comportamentos distintos de estabilidade e reatividade térmica.

Figura 15. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioCG sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).



Fonte: Autoria própria (2025).

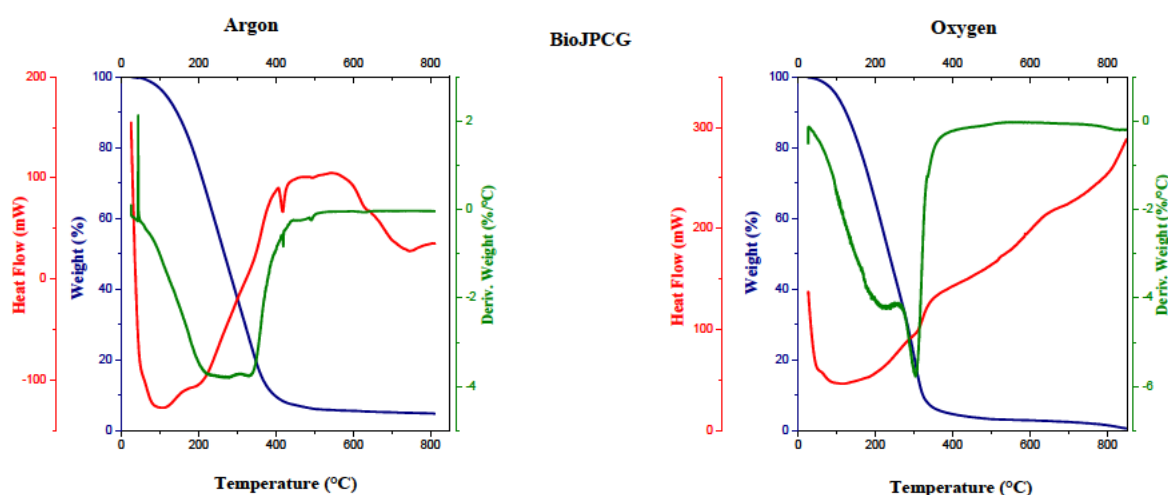
A amostra BioCG demonstra um comportamento térmico mais complexo sob atmosfera de argônio. A TGA mostra uma decomposição gradual com três estágios, sendo a maior perda de massa entre 200 °C e 450 °C. A DTG exibe múltiplos picos, indicando a presença de diversos compostos com diferentes temperaturas de decomposição. A curva de DSC apresenta uma série de transições térmicas, incluindo picos endotérmicos na faixa de 100–250 °C e eventos exotérmicos mais amplos em temperaturas mais elevadas, sugerindo uma degradação térmica em várias etapas, típica de misturas heterogêneas.

Na presença de oxigênio, observa-se uma decomposição mais acelerada. A perda de massa se intensifica nas mesmas faixas de temperatura, mas com maior eficiência, chegando a valores residuais mais baixos. A DTG apresenta um pico principal mais agudo, centrado em torno de 320 °C, indicando uma reação mais rápida e concentrada. A DSC revela um pico exotérmico expressivo entre 250 °C e 450 °C, compatível com reações de oxidação de cadeias orgânicas

complexas. Esses resultados indicam que o oxigênio favorece reações de combustão, promovendo a liberação de energia térmica adicional e a conversão de material carbonáceo em gases.

A Figura 16 ilustra os gráficos de TGA, DTG e DSC do BioJPCG sob atmosferas de argônio (à esquerda) e oxigênio (à direita) em função da temperatura. A amostra composta apresentou características térmicas particulares quando comparada às demais, com diferenças marcantes nos perfis de perda de massa e fluxo de calor em ambas as atmosferas.

Figura 16. Perfis de TGA, DTG e DSC do BioJPCG sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante).



Fonte: Autoria própria (2025).

A amostra Bio JPCG, resultante da mistura (BioJP e BioCG), apresenta características intermediárias. Sob argônio, a TGA revela uma decomposição em três etapas, com perda de massa significativa entre 200 °C e 400 °C. A DTG mostra um pico largo e assimétrico, com possível presença de um ombro, o que indica a sobreposição dos eventos térmicos típicos das amostras individuais. A DSC registra eventos térmicos mistos, com picos endotérmicos na faixa inicial (100–200 °C) e sinais exotérmicos moderados a partir de 300 °C, denotando reações secundárias ou liberação de energia por decomposição.

Na atmosfera de oxigênio, o perfil de degradação é mais agressivo. A perda de massa ocorre de forma mais abrupta e é finalizada antes dos 600 °C. A DTG apresenta um pico principal com intensidade elevada e possível divisão, novamente sugerindo a fusão dos comportamentos de Bio JP e Bio CG. A curva de DSC mostra um evento exotérmico intenso e largo entre 250 °C e 450 °C, relacionado à oxidação de componentes orgânicos mais reativos. Essa resposta térmica reforça a ideia de que a mistura carrega tanto a instabilidade do Bio JP quanto a complexidade

do Bio CG, resultando em um material altamente reativo em atmosfera oxidante.

As análises térmicas dos bio-óleos BioJP, BioCG e BioJPCG, realizadas sob atmosferas de argônio (inerte) e oxigênio (oxidante), revelam comportamentos distintos em função da composição química de cada amostra e das condições do meio. Em atmosfera inerte, os processos de degradação ocorrem predominantemente por pirólise, caracterizando-se por perdas de massa mais graduais e formação de resíduos carbonáceos. Já sob oxigênio, observa-se uma intensificação da decomposição térmica, com reações exotérmicas mais pronunciadas e perda de massa mais rápida, refletindo o potencial energético dos bio-óleos em atmosferas oxidantes.

Independentemente da atmosfera, todas as amostras apresentam perdas de massa significativas até cerca de 400 °C, o que indica que essa faixa de temperatura concentra os eventos térmicos mais intensos. Segundo Dantas Filho (2013), a destilação do bio-óleo ocorre principalmente até 300 °C, enquanto acima dessa temperatura predomina o processo de pirólise. No ambiente inerte, a degradação ocorre sem a presença de oxigênio, impedindo reações de combustão e favorecendo a quebra térmica dos compostos orgânicos, com liberação de voláteis e formação de carbono residual.

As curvas de calorimetria diferencial de varredura (DSC) mostram, inicialmente, eventos endotérmicos associados à evaporação de compostos voláteis e à degradação de macromoléculas orgânicas. Esses eventos são caracterizados pela absorção de calor, típica da pirólise. À medida que a temperatura aumenta, ocorre uma transição para eventos exotérmicos, especialmente evidentes em atmosfera oxidante, devido à combustão dos compostos remanescentes. De acordo com Francioso *et al.* (2010), reações exotérmicas significativas em torno de 300 °C estão relacionadas à decomposição de componentes termolábeis, como proteínas e grupos carboxílicos. Já reações exotérmicas em temperaturas superiores, próximas de 450 °C, são atribuídas à decomposição de carbono refratário, incluindo compostos aromáticos e cadeias alifáticas longas.

A análise detalhada das amostras revela comportamentos específicos. O BioJP apresenta múltiplos picos exotérmicos, indicativos da queima sequencial de diferentes compostos orgânicos. O BioCG exibe picos mais intensos e definidos, refletindo uma combustão mais eficiente, provavelmente devido à presença de frações mais voláteis e facilmente oxidáveis. Já o BioJPCG demonstra um perfil térmico intermediário, com eventos mais distribuídos e sem picos abruptos, o que sugere que a mistura suaviza as diferenças individuais entre os bio-óleos.

As curvas de derivada termogravimétrica (DTG) indicam que a degradação térmica ocorre em múltiplas etapas. A primeira etapa, marcada por um ponto de inflexão após o pico inicial de perda de massa, está relacionada à evaporação de compostos de baixo ponto de ebulição, como metanol, água e ácido acético, resultando em perdas superiores a 75%. A segunda

etapa corresponde à decomposição de moléculas maiores, como fenol, vanilina e sacarídeos, que levam à formação de carvão, alcatrão e gases (Long *et al.*, 2014).

Em atmosfera de argônio, a degradação térmica é mais distribuída ao longo da faixa de temperatura, com múltiplos picos associados à decomposição de diferentes classes de compostos orgânicos. A ausência de oxigênio impede a formação de radicais livres e a ocorrência de combustão, o que torna a pirólise o principal mecanismo de decomposição. Em contraste, sob atmosfera de oxigênio, a degradação é mais concentrada, com picos intensos entre 300 °C e 400 °C, indicando a combustão direta dos compostos voláteis. A taxa de decomposição é significativamente maior devido à presença de oxigênio, que favorece reações de oxidação mais rápidas e completas.

Especificamente, o perfil térmico do BioJP em argônio mostra três etapas principais: até cerca de 150 °C, com perda de umidade e compostos voláteis leves; entre 200–500 °C, com decomposição de frações mais pesadas; e acima de 500 °C, com pequena perda de massa residual, indicando a presença de carbono fixo. Sob oxigênio, essa degradação torna-se mais abrupta, com maior reatividade e menor temperatura de decomposição. O BioCG apresenta comportamento semelhante, mas com maior taxa de perda de massa e picos de degradação mais intensos, especialmente sob atmosfera oxidante. A amostra BioJPCG, por sua vez, mostra uma degradação mais homogênea, o que pode ser atribuído à interação entre os compostos dos dois bio-óleos, promovendo a decomposição das frações mais pesadas do BioJP.

As curvas DSC complementam essa interpretação ao evidenciar os eventos térmicos com maior clareza. O BioJP apresenta perfis com múltiplos picos exotérmicos, enquanto o BioCG exhibe eventos mais concentrados e intensos. A composição do BioCG, com frações mais voláteis e menos estáveis, favorece a combustão eficiente. O BioJPCG apresenta um comportamento intermediário, sugerindo que a mistura dos bio-óleos contribui para um perfil térmico mais equilibrado e distribuído.

A comparação entre os ambientes inerte e oxidante revela que, em argônio, ocorre apenas a pirólise, com maior estabilidade térmica e maior formação de resíduos. Já em oxigênio, a combustão acelera a decomposição, com maior liberação de calor e perda de massa mais intensa. O BioJP mostra maior estabilidade térmica, enquanto o BioCG se decompõe mais rapidamente, liberando mais calor. O BioJPCG combina essas características, proporcionando uma degradação mais homogênea e previsível, o que pode ser vantajoso para aplicações em processos de conversão térmica, como combustão e pirólise controlada.

Em contraste, no ambiente oxidante de oxigênio, a combustão dos voláteis e do carbono residual ocorre simultaneamente, promovendo uma degradação mais completa e reduzindo a

quantidade final de resíduo sólido como descrito na Tabela 11.

As perdas de massas das amostras em duas atmosferas diferentes (Argônio e Oxigênio) a altas temperaturas. As amostras expostas a Oxigênio mostraram uma perda de massa significativamente maior, com valores próximos a 99%, indicando uma intensa oxidação dos materiais, logo, sugerindo ser uma boa fonte para processos de queima e geração de calor. Por outro lado, as amostras expostas a Argônio, um gás inerte, apresentaram perdas de massa menores, refletindo uma menor decomposição dos materiais devido à ausência de reatividade com o ambiente. Esses resultados destacam o impacto da atmosfera na estabilidade e resistência das amostras à altas temperaturas.

Tabela 11. Perda de massa vs temperatura das amostras de bio-óleo oriundo de lodos de ETE.

Amostra	Atmosfera	Temperatura Final (°C)	Massa Final (%)	Perda de Massa (%)
BioJP	Argônio	813,350	02,06	98,00
BioCG	Argônio	810,291	11,77	88,40
BioJPCG	Argônio	812,686	04,85	99,03
BioJP	Oxigênio	589,668	00,05	99,99
BioCG	Oxigênio	847,937	03,75	99,06
BioJPCG	Oxigênio	849,176	00,64	99,92

Fonte: Autoria própria (2025).

As curvas térmicas dos bio-óleos BioJP e BioCG apresentaram comportamentos semelhantes, sugerindo propriedades térmicas comparáveis. A amostra BioJPCG, composta pela mistura dos dois bio-óleos, exibe um perfil intermediário, indicando que a combinação dos materiais não altera significativamente sua estabilidade térmica.

A quantidade de resíduo sólido remanescente é menor na atmosfera de oxigênio em comparação com o argônio, devido à combustão mais completa promovida pelo ambiente oxidante.

De modo geral, os bio-óleos apresentaram padrões de degradação térmica semelhantes, com variações sutis associadas à composição. A atmosfera oxidante acelera a degradação e reduz o resíduo sólido, enquanto a atmosfera inerte favorece a formação de carbono residual. A mistura BioJPCG segue um comportamento intermediário, reforçando a influência combinada dos dois bio-óleo.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a caracterização físico-química, térmica e energética dos bio-óleos obtidos por pirólise de lodos de ETES das cidades de João Pessoa (BioJP) e Campina

Grande (BioCG), além da mistura entre eles (BioJPCG). Também foi realizada uma análise bibliométrica e sistemática da produção científica sobre o tema, a fim de compreender o panorama atual da pesquisa e suas principais contribuições.

A análise bibliométrica indicou crescimento das publicações sobre o tema, com destaque para China e Estados Unidos. O Brasil figura como um país promissor, mas com produção científica ainda limitada. Os termos mais frequentes e os periódicos com maior impacto indicaram o foco atual das pesquisas em pirólise e aproveitamento energético de resíduos.

A revisão sistemática, realizada com os artigos mais citados, permitiu uma análise crítica dos enfoques metodológicos, aplicações práticas e lacunas na literatura. Essa abordagem complementou a análise bibliométrica ao aprofundar a compreensão sobre como o tema é tratado na comunidade científica internacional, reforçando a relevância dos dados obtidos neste trabalho e indicando direções promissoras para estudos futuros.

Os resultados experimentais demonstraram que o BioJP apresentou a menor densidade ($0,9332 \text{ g/cm}^3$) e menor viscosidade cinemática ($22,42 \text{ mm}^2/\text{s}$), indicando maior homogeneidade e predominância de frações leves em sua composição. O BioCG, por sua vez, apresentou a maior viscosidade cinemática ($33,5 \text{ mm}^2/\text{s}$), o que sugere a presença de compostos mais pesados ou maior complexidade estrutural. Já o BioJPCG exibiu uma densidade média de $0,9623 \text{ g/cm}^3$, levemente inferior à do BioCG, mas com maior uniformidade, refletindo uma composição intermediária entre os dois bio-óleos individuais, porém com características que ainda exigem análise quanto à sua aplicabilidade energética. Todos os bio-óleos analisados apresentaram valores de poder calorífico superior (PCS) entre 40,09 e 41,50 MJ/kg, próximos aos de combustíveis fósseis, evidenciando o potencial energético dos materiais, ainda que apontem para a necessidade de processos de refino.

A espectroscopia FTIR identificou compostos fenólicos, hidrocarbonetos e ácidos carboxílicos, relacionados ao desempenho térmico e energético dos bio-óleos. As análises térmicas (TGA/DTG/DSC) revelaram perfis de degradação estáveis, com perda de massa superior a 99% em ambas as atmosferas (inerte e oxidante), confirmando boa performance térmica.

Conclui-se que a pirólise do lodo de ETEs é uma alternativa tecnicamente viável para a valorização energética de resíduos urbanos. O bio-óleo gerado apresenta propriedades compatíveis com biocombustíveis líquidos, desde que submetido a processos adequados de purificação. Estudos complementares são recomendados para avaliação da viabilidade econômica, desempenho em aplicações práticas e conformidade com requisitos normativos e ambientais.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1- Refino e purificação dos bio-óleos

Investigar técnicas de refino físico e químico (como destilação fracionada, remoção de água e oxigênio, filtração, etc.) para melhorar a estabilidade, reduzir a acidez e adequar a composição dos bio-óleos às especificações de combustíveis líquidos comerciais.

2- Análise da Estabilidade em Armazenamento

Avaliar o comportamento dos bio-óleos ao longo do tempo sob diferentes condições de armazenamento (temperatura, contato com oxigênio, umidade), observando mudanças na viscosidade, densidade e formação de resíduos.

3- Avaliação de Misturas com Combustíveis Comerciais

Testar diferentes proporções de mistura dos bio-óleos com diesel, biodiesel ou etanol, avaliando as propriedades físico-químicas, estabilidade térmica e desempenho energético das misturas.

4- Ensaaios de Combustão e Emissões

Realizar testes de queima dos bio-óleos e suas misturas em queimadores, caldeiras ou motores para avaliar eficiência térmica, taxa de combustão e perfil de emissões (CO, NOx, material particulado etc.).

5- Otimização das Condições de Pirólise

Estudar diferentes temperaturas, tempos de residência, taxas de aquecimento, presença de catalisadores e atmosferas de reação na pirólise do lodo para maximizar o rendimento e a qualidade do bio-óleo.

6- Tratamento e Valorização das Frações Gasosas e Sólidas

Analisar as frações gasosa e sólidas geradas durante a pirólise, explorando seu potencial energético (gás combustível, biochar como condicionador de solo ou adsorvente).

7- Análise Econômica e de Ciclo de Vida (ACV)

Avaliar a viabilidade econômica da produção e uso dos bio-óleos, bem como seu impacto ambiental em comparação com combustíveis fósseis, utilizando a metodologia de Análise de Ciclo de Vida.

8- Aplicação em Tecnologias de Gaseificação ou Co-combustão

Investigar o uso dos bio-óleos como insumo em processos industriais de gaseificação ou co-combustão em plantas termoelétricas.

REFERÊNCIAS

- ABES. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Publicações e eventos técnicos. 2022. Disponível em: <https://abes-dn.org.br/>. Acesso em: 30 março 2025.
- ABNT. NBR 10441: Produtos de petróleo - líquidos transparentes e opacos - determinação da viscosidade cinemática e cálculo da viscosidade dinâmica. Rio de Janeiro, 2024. 25 p.
- Abu B., M. S.; Titiloye, J. O. Catalytic pyrolysis of rice husk for bio-oil production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 103, p. 362–368, 2013. DOI: 10.1016/j.jaap.2012.09.005.
- Albarelo, L. A.; Araujo, J. A. Uso de lodo de estação de tratamento de esgoto em adubagem agrícola e florestal: uma revisão narrativa. *Cadernos UniFOA*, Volta Redonda, v. 19, n. 54, p. 1-10, 2024. Disponível em: <https://www.unifoa.edu.br/revistas>. Acesso em: 22 fevereiro 2025.
- ANP -Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 52, de 29 de dezembro de 2010. Dispõe sobre as especificações dos óleos combustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br>. Acesso em: 10 fevereiro. 2025.
- ANP -Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014. Estabelece as especificações do biodiesel a serem atendidas no ANP. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 26 ago. 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/biodiesel/resolucoes-anp/resolucao-anp-no-45-de-2014-especificacoes-do-biodiesel.pdf>. Acesso em: 03 março 2025.
- ANP -Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Superintendência de Biocombustíveis e de Qualidade de Produtos – SBQ. Coordenação de Qualidade de Combustíveis. Nota Técnica nº 10/2021/SBQ-CPT-CQC/SBQ/ANP-DF. Brasília, 13 set. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/analise-de-impacto-regulatorio-air/arquivos/1607120-especificacoes-nacionais-do-biodiesel-b100.pdf>. Acesso em: 03 março 2025.
- Araújo, P. H. P.; Grilo, M. B.; Anselmo, G. C. S.; Evangelista, B. Análise sobre a viscosidade do biodiesel. In: *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, VI, 2010, Campina Grande. Anais... Campina Grande: UFCG, 2010.
- Araújo, A. T. F. A. Pirólise de cascas de grãos de girassol: determinação de parâmetros cinéticos, e influência da atmosfera (H₂ ou He) e da catálise ex-situ (HZSM-5) na geração de vapores. 2024. 193 f. Tese (Doutorado Multicêntrico em Química de Minas Gerais) – Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2024.
- Arazo, R. O.; Genuino, D. A. D.; De Luna, M. D. G.; Capareda, S. C. Bio-oil production from dry sewage sludge by fast pyrolysis in an electrically-heated fluidized bed reactor. *Sustainable Environment Research*, v. 27, n. 1, p. 7-14, 2017. DOI: 10.1016/j.serj.2016.11.010.
- Brasil. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/>. Acesso em: 30 março 2025.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Diário Oficial da União*, 3 agosto 2010.

Bridgwater, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68-94, 2012. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.01.048.

Bridgwater, A. V.; Peacocke, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000. DOI: 10.1016/s1364-0321(99)00007-6.

Sousa, B. A. Óleo da semente de macaúba (*Acrocomia aculeata*): extração, obtenção de biodiesel e caracterização da conversão e viscosidade cinemática. 2023. 93 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.

Carvalho, C. S.; Ribeirinho, V. S.; Andrade, C. A.; Grutzmacher, P.; Pires, A. M. M. Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 10, n. 3, p. 413-419, 2015. Disponível em: <https://www.agraria.ufrpe.br>.

Corrêa, A. G.; Silva, L. C. S.; Oliveira, A. F. M.; Müller, B. V.; Nadaletti, W. C. Análise de viscosidade cinemática de biocombustível de conservas de pêssego no município de Pelotas/RS. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, XI, 2020, Vitória. Anais... Vitória: IBEAS, 2020.

Dantas Filho, F. F. Estudo do bio-óleo e carvão obtido a partir do lodo de tratamento de esgoto sanitário por conversão à baixa temperatura. 2013. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

Feng, J.; Burke, I. T.; Chen, X.; Stewart, D. I. Assessing metal contamination and speciation in sewage sludge: implications for soil application and environmental risk. *Revista Environmental Science and Biotechnology*, v. 22, p. 1037-1058, 2023.

Francesquett, J. Z.; Costa, A. B.; Ferrao, M. F.; Marder, L.; Viera, M. S. Quantificação do poder calorífico da gasolina utilizando infravermelho próximo e análise multivariada. In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2011, Belo Horizonte, MG. Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial. Belo Horizonte, MG, 2011. p. 1-104.

Francioso, O.; Rodriguez-Estrada, M. T.; Montecchio, D.; Salomoni, C.; Caputo, A.; Palenzona, D. Chemical characterization of municipal wastewater sludges produced by two-phase anaerobic digestion for biogas production. *Journal of Hazardous Materials*, v. 175, n. 1-3, p. 740-746, 2010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2009.10.071.

Fonts, I.; Gea, G.; Azuara, M.; Ábrego, J.; Arauzo, J. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 5, p. 2781-2805, 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.070.

GOZ W PRAKTYCE. Circular business models. 2024a. Disponível em: <https://gozwpraktyce.pl/modele-biznesowe/>. Acesso em: 13 maio 2024.

GOZ W PRAKTYCE. Recovery of by-products. 2024b. Disponível em: <https://gozwpraktyce.pl/odzysk-produktow/>. Acesso em: 13 maio 2024.

González-Arias, J.; Gil, M. V.; Fernández, R. Á.; Martínez, E. J.; Fernández, C.; Papaharalabos,

G.; Gómez, X. Integrating anaerobic digestion and pyrolysis for treating digestates derived from sewage sludge and fat wastes. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-09461-1.

Hanif, M. U.; Capareda, S. C.; Iqbal, H.; Arazo, R. O.; Baig, M. A. Effects of pyrolysis temperature on product yields and energy recovery from co-feeding of cotton gin trash, cow manure, and microalgae: a simulation study. *PLOS ONE*, San Francisco, v. 11, n. 4, p. e0152230, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0152230>. Acesso em: 10 fevereiro. 2025.

Hartman, L.; Lago, R. C. A. Rapid preparation of fatty acid methyl esters. *Laboratory Practice*, v. 22, n. 6, p. 475-494, 1973.

Hu, Y.; Zhang, B.; Guo, Q.; Wang, S.; Lu, S. Characterization into environmentally persistent free radicals formed in incineration fly ash and pyrolysis biochar of sewage sludge and biomass. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133666, 2022.

INMETRO. Ensaios de proficiência em viscosidade – 1ª rodada – viscosidade cinemática: relatório final nº 004/16. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2016. Disponível em: <https://www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 06 janeiro 2025.

Leme, G. R.; Fernandes, D. M.; Lopes, C. L. Utilização da pirólise para o tratamento de resíduos no Brasil. In: 8º Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, Curitiba, PR, 2017.

Li, Y.; Tao, C.; Li, S.; Chen, W.; Fu, D.; Jafvert, C. T.; Zhu, T. Feasibility study of machine learning to explore relationships between antimicrobial resistance and microbial community structure in global wastewater treatment plant sludges. *Bioresource Technology*, v. 417, 131878, 2025.

Long, T.; Li, M.; Chen, Y.; Zhu, X. Study on evaporation characteristics of bio-oil and its compound models. *BioResources*, v. 9, n. 3, p. 4242-4252, 2014.

Ma, W.; Du, G.; Li, J.; Fang, Y.; Hou, L.; Chen, G.; Ma, D. Supercritical water pyrolysis of sewage sludge. *Waste Management*, v. 59, p. 371-378, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.10.053.

Ministério de Minas e Energia - MME. Balanço Energético Nacional 2017: ano base 2016. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/>. Acesso em: 20 fevereiro 2025.

Moura, A. F. F.; Siqueira, A. M. O.; Leite, I. C.; Martins, M. C.; Castro, F. D.; Silva, J. L. da. Reaproveitamento energético do lodo de estação de tratamento de esgoto – uma revisão. *The Journal of Engineering and Exact Sciences – JCEC*, v. 6, n. 5, p. 740-747, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/ojs/jcec>. Acesso em: 23 fevereiro 2025.

Pavia, D. L.; Lampman, G. M.; Kriz, G. S.; Vyvyan, J. R. Introdução à espectroscopia. Tradução da 4ª edição norte-americana. Revisão técnica de Paulo Sergio Santos. São Paulo: Cengage Universitário; Cengage Learning, 2010.

Pedroza, M. M.; Gomes, M. C. F. A.; Paz, E. C. S.; Pedrosa, A. L.; Vieira, G. E. G.; Soares, J. E. M. Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise. *Revista*

Brasileira de Energias Renováveis, v. 6, n. 2, p. 184-207, 2017.

Peixe, A. M. M.; Pinto, J. S. P. Infometria nas bases Web of Science e Scopus: governança corporativa, informação e tecnologia da informação; precificação de ações e riscos de mercado. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 5, p. e56110515433-e56110515433, 2021.

Pereira, L. M.; Machado, N. T.; Mendonça, N. M.; Assunção, F. P. C.; Valle, B. O.; Santos, M. C.; Pereira, A. M. Obtenção de bio-óleo através de craqueamento térmico catalítico de lodo de esgoto mais gordura residual em escala piloto. In: *Educação Ambiental e Cidadania: Pesquisa e Práticas Contemporâneas*. v. 2. [S.l.]: Editora Científica, 2021. Cap. 17, p. 206-219. DOI: 10.37885/210404428.

Petrovič, A.; Vohl, S.; Cenčič Predikaka, T.; Bedoić, R.; Simonič, M.; Ban, I.; Čuček, L. Pirólise de digestato sólido de lodo de esgoto e biomassa lignocelulósica: análise cinética e termodinâmica, caracterização de biochar. *Sustentabilidade, Basel*, v. 13, n. 17, p. 9642, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13179642>.

Rodrigues, T. O.; Rousset, P.; Vale, A. T.; Broust, F. Bio-óleo: uma alternativa para valorização energética da biomassa. *Revista Brasileira de Energia*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 39, p. 39–56, 2. sem. 2011.

Salomão, P. E. A.; Santos, A. T. O. Evolução e desafios na avaliação científica: da classificação de periódicos à qualidade intrínseca dos artigos. *Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro*, v. 1, n. 1, p. 1-18, 2025.

Santos, S. F.; Silva, F. M.; Vieira, G. E. G.; Paschoalato, C. F. P. R. Avaliação das características químicas por CG-EM da fase gasosa do lodo digerido residual obtida a partir da pirólise lenta. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 7, n. 4, p. 465-481, 2018.

Silva, O. M. C.; Almeida, R. S.; Evangelista, D. V. P.; Monteiro, E. C. Uso do biossólido como constituinte de substrato para produção de mudas de espécies florestais: uma revisão. In: *Engenharia Florestal: contribuições, análises e práticas em pesquisa*. v. 1. Editora Científica Digital, 2022. p. 264-273. Disponível em: <https://www.editoracientifica.org>. Acesso em: 22 fevereiro. 2025.

Silva, D. F.; SOARES, V. V.; Silva, D. R.; Araújo, A. M. M.; Gondin, A. D. Pirólise para obtenção de hidrocarbonetos renováveis: uma revisão. In: *Anais do II Congresso da Rede Brasileira de Bioquerosene e Hidrocarbonetos Sustentáveis de Aviação*, 2023. Editora Científica Digital, p. 158-160, 2023. DOI: 10.37885/230914470. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/230914470>. Acesso em: 10 fevereiro. 2025.

Silva, H. K. T. A. Estudo da influência do biodiesel de mamona como aditivo antioxidante para o biodiesel de girassol e soja. 2014. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Química, Natal, 2014.

Sirijanusorn, S.; Sriprateep, K.; Pattiya, A. Pyrolysis of cassava rhizome in a counter-rotating twin screw reactor unit. *Bioresource Technology*, v. 139, p. 343-348, 2013. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.04.02.

Sousa, J. L.; Gurreiro, L. H. H.; Bernar, L. P.; Ribeiro, H. J. S.; Oliveira, R. L.; Santos, M. C.; Almeida, H. S. Análise da composição química do bio-óleo produzido via pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart). *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 15549-15565, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n2-261.

Urbano, D. L.; Antal, M. J. Study of the kinetics of sewage sludge pyrolysis using DSC and TGA. *Fuel*, [S.l.], v. 61, n. 9, p. 799–806, 1982.

Varma, A. K.; Mondal, P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*, v. 95, p. 704-717, 2017. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.11.039.

Vieira, F. B.; Silva, G. V.; Cardoso, R.; Barros, C. F. O.; Lemos, M. A. F. P. Pirólise de lodo de esgoto: uma revisão sistemática. *Revista DAE*, São Paulo, v. 72, n. 246, p. 01-11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.056>.

Vieira, G. E. G.; Alexandre, G. P. Tratamento, caracterização e obtenção de bio-óleo combustível a partir da pirólise termocatalítica de lodo de esgoto doméstico – uma revisão. *Revista Liberato*, Novo Hamburgo, v. 15, n. 23, p. 1-104, jan./jun. 2014.

Xin, C.; Addy, M. M.; Zhao, J.; Cheng, Y.; Ma, Y.; Liu, S.; Ruan, R. Waste-to-biofuel integrated system and its comprehensive techno-economic assessment in wastewater treatment plants. *Bioresource Technology*, v. 250, p. 523-531, 2018. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.11.040.

Wan Ranizang, W. N. A. A.; Mohammed Yussuf, M. A.; Mohamed, M.; Jusoh, M.; Zakaria, Z. Y. Catalytic pyrolysis of fuel oil blended stock for bio-oil production: a review. *Chemical Engineering Transactions*, v. 97, p. 373-378, 2022. DOI: 10.3303/CET2297063.

Yuan, X.; Leng, L.; Huang, H.; Chen, X.; Wang, H.; Xiao, Z.; Zeng, G. Speciation and environmental risk assessment of heavy metal in bio-oil from liquefaction/pyrolysis of sewage sludge. *Chemosphere*, v. 120, p. 645-652, 2015. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2014.10.010.