

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

MARIANA ALVES FERREIRA

**INVESTIGANDO A CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E RESÍDUOS
DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) NA PRODUÇÃO E
QUALIDADE DO BIO-ÓLEO**

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2026

MARIANA ALVES FERREIRA

**INVESTIGANDO A CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E
RESÍDUOS DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) NA
PRODUÇÃO E QUALIDADE DO BIO-ÓLEO**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior. Conselheira: Dra. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2026

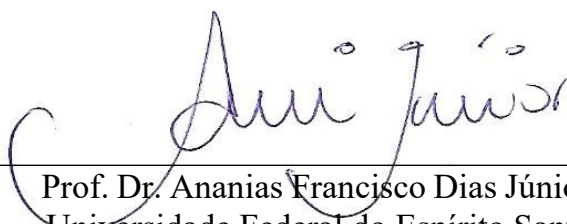
MARIANA ALVES FERREIRA

**INVESTIGANDO A CO-PIRÓLISE DE BIOMASSA E
RESÍDUOS DE POLIETILENO TEREF TALATO (PET) NA
PRODUÇÃO E NA QUALIDADE DO BIO-ÓLEO**

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial na obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 03 de fevereiro de 2026.

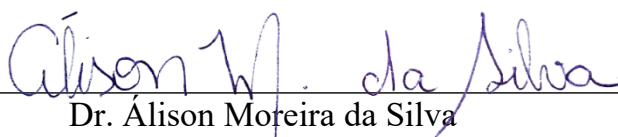
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Dra. Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino
Universidade Federal do Espírito Santo
Conselheira



Dr. Álison Moreira da Silva
Tellus - Plant I Ltda
Examinador

À minha família, Regina, Ademir e Maria Clara.

Vocês são a base de tudo que eu sou e minha maior inspiração.

Aos meus avós maternos, Laurita e Ermínio (*in memoriam*).

À minha avó paterna, Ormi (*in memoriam*).

Com todo meu coração, dedico.

“Percebe e entende que os melhores amigos, são aqueles que estão em casa, esperando por ti...”

(Anjos de Resgate, 2002)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela força e luz concedidas em minha caminhada e a Nossa Senhora, por sua constante intercessão e proteção ao longo deste caminho.

Aos meus pais, Regina e Ademir, deixo o mais profundo agradecimento. Obrigada por me criarem com tanto amor, por acreditarem em mim e por sempre me apoiarem em cada etapa da vida. Vocês me ensinaram o valor da honestidade, do esforço e da dedicação, e me mostraram, com o próprio exemplo, o poder transformador da educação. Sou imensamente grata por todo o incentivo, paciência e sacrifício de vocês, por nunca medirem esforços para que eu pudesse realizar o sonho de me tornar engenheira. Tudo o que conquistei até aqui é reflexo do amor e dos valores que vocês me transmitiram.

À minha irmã, Maria Clara, minha gêmea e uma das pessoas mais importantes da minha vida. Compartilhamos não apenas o mesmo nascimento, mas também sonhos, conquistas e desafios. Sua presença sempre foi uma fonte de força e alegria, ter você ao meu lado tornou cada etapa dessa jornada mais especial. Te amo.

Aos meus avós paternos (*in memoriam*) e ao meu avô materno (*in memoriam*), por fazerem parte das minhas raízes e por tudo o que representam na minha história.

À minha avó materna, Laurita, exemplo de amor, simplicidade e sabedoria, obrigada por me ensinar a ler e escrever e por despertar em mim a curiosidade para descobrir o mundo. Te amo e sou imensamente grata pela sua presença na minha trajetória.

À família Alves Guimarães, Dalzira, Aparecida, Lucenir, Luciana, Nete e Mara. Vocês são mulheres inspiradoras, alguns dos meus maiores exemplos de empoderamento e força feminina. Com vocês, aprendi que mulheres podem e devem ser tudo o que quiserem. Sou imensamente grata pelo amor e carinho que sempre tiveram comigo e por me inspirarem, todos os dias, a ser uma mulher sonhadora, forte e independente. Aos professores do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, em especial ao meu professor orientador, Ananias pela

paciência, orientação e pelas contribuições que foram essenciais para este trabalho e para o meu aprendizado.

À Universidade Federal do Espírito Santo – Campus de Alegre, pela oportunidade de aprendizado e crescimento.

Ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB/UFES), que foi muito mais do que um espaço de pesquisa. Foi um ambiente de convivência, aprendizado e amadurecimento, onde vivi experiências que contribuíram tanto para o meu desenvolvimento acadêmico quanto pessoal.

Aos integrantes do Grupo de Pesquisa em Bioenergia e Bioprodutos de Base Florestal (BioEP), especialmente à Gabriela Cupertino, Álison Moreira, Fabíola Delatorre, Renato Oliveira e Juliana Terezinha, agradeço pelo apoio, pelas trocas de conhecimento e pela amizade construída ao longo dessa trajetória.

À minha melhor amiga Marianna Dias, presente na minha vida desde a infância, agradeço por sempre manter nossa amizade, mesmo com a distância. Sua presença e incentivo significam muito para mim. E à minha amiga Eloisa Bueno, que conheci na faculdade e que se tornou uma grande amiga, obrigada por compartilhar comigo tantos momentos, por me ouvir, aconselhar e por tornar essa jornada mais leve.

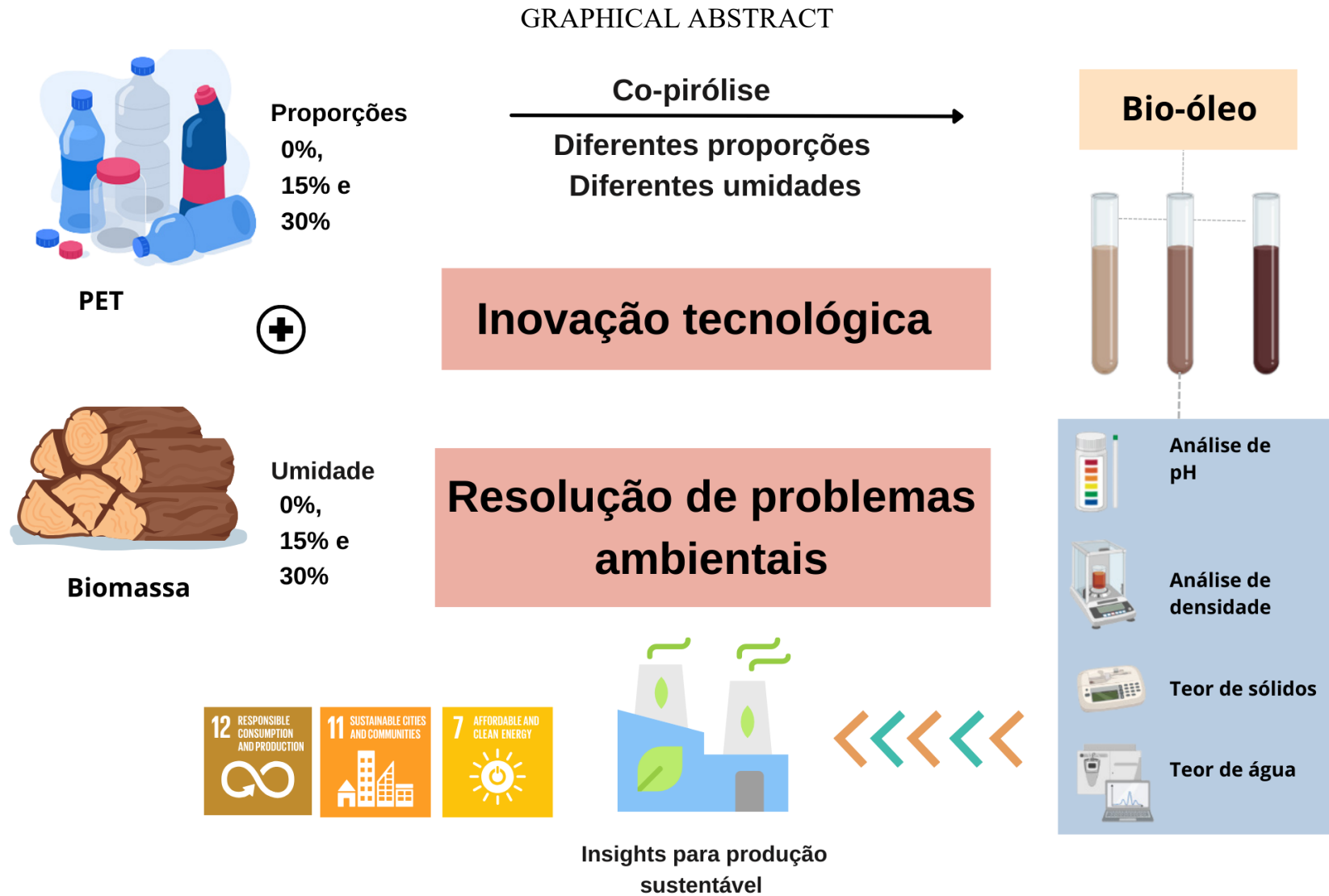
Ao meu amor, Luiz Piol, por todo apoio e incentivo. Obrigada por sempre me mostrar que eu sou capaz. Te amo.

Aos meus amigos do Grupo de Oração Universitário “Florescer no Amor”, Thaís Feletti, William Masioli, Gabriela Goldner e Luana Protázio, agradeço pelos momentos de oração, partilha e amizade. A convivência com vocês fortaleceu minha fé e tornou essa caminhada mais significativa.

Por fim, aos meus colegas de graduação das turmas de Engenharia Florestal de 2020/1, 2021/1, e demais colegas de outros cursos, agradeço por cada momento vivido juntos. A troca de experiências, o apoio e a amizade de vocês tornaram essa jornada muito mais especial.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação e trajetória até aqui.

Muito obrigada!



RESUMO

A crescente geração de resíduos plásticos, associada à baixa taxa de reciclagem e à elevada persistência ambiental desses materiais, intensifica a busca por alternativas tecnológicas sustentáveis para sua valorização. Por outro lado, a necessidade de diversificação da matriz energética impulsiona o desenvolvimento de processos capazes de converter resíduos em produtos energéticos e químicos de alto valor agregado. Nesse contexto, a co-pirólise se mostra uma rota promissora, ao permitir a degradação térmica conjunta de biomassa lignocelulósica e resíduos plásticos, favorecendo interações sinérgicas que influenciam o rendimento e a qualidade dos produtos obtidos, em especial, o bio-óleo. O presente trabalho teve como objetivo investigar a influência da proporção de resíduos de polietileno tereftalato (PET) e do teor de umidade da biomassa de *Eucalyptus spp.* na produção e nas propriedades físico-químicas do bio-óleo obtido por meio da co-pirólise. Os ensaios foram conduzidos em reator de leito fixo, à temperatura final de 450 °C, utilizando blends contendo 0 %, 15 % e 30 % de PET e biomassa com 0 %, 15 % e 30 % de umidade. Foram avaliados os rendimentos gravimétricos de bio-óleo, bem como suas propriedades de densidade, pH, teor de sólidos e teor de água. Os resultados indicaram que teores elevados de PET tendem a reduzir o rendimento de bio-óleo, enquanto a umidade da biomassa exerce influência positiva sobre a recuperação da fração líquida. Observou-se ainda que a adição de PET e o aumento da umidade afetam significativamente as propriedades físico-químicas do bio-óleo, alterando sua acidez, densidade e estabilidade. De modo geral, a utilização de biomassa com umidade intermediária associada à adição controlada de PET mostrou-se mais adequada para a obtenção de bio-óleos com propriedades ajustáveis, demonstrando o potencial da co-pirólise como estratégia para a valorização de resíduos integrada à produção de combustíveis e insumos renováveis.

Palavras-chave: Co-pirólise; Bio-óleo; Valorização de resíduos.

ABSTRACT

The increasing generation of plastic waste, combined with low recycling rates and the high environmental persistence of these materials, intensifies the search for sustainable technological alternatives for waste valorization. At the same time, the need to diversify the energy matrix has driven the development of processes capable of converting waste into high value-added energy and chemical products. In this context, co-pyrolysis has emerged as a promising route, as it enables the simultaneous thermal degradation of lignocellulosic biomass and plastic waste, promoting synergistic interactions that influence the yield and quality of the resulting products, particularly bio-oil. This study aimed to investigate the influence of polyethylene terephthalate (PET) waste proportion and the moisture content of *Eucalyptus* spp. biomass on the production and physicochemical properties of bio-oil obtained through co-pyrolysis. Experiments were carried out in a fixed-bed reactor under an inert nitrogen atmosphere at a final temperature of 450 °C, using blends containing 0%, 15%, and 30% PET and biomass with moisture contents of 0%, 15%, and 30%. Bio-oil gravimetric yields were evaluated, as well as its density, pH, solid content, and water content. The results indicated that higher PET contents tend to reduce bio-oil yield, while biomass moisture exerts a positive influence on liquid fraction recovery. Additionally, PET addition and increased moisture significantly affected the physicochemical properties of bio-oil, altering its acidity, density, and stability. Overall, the use of biomass with intermediate moisture content combined with controlled PET addition proved to be more suitable for obtaining bio-oils with adjustable properties, demonstrating the potential of co-pyrolysis as a strategy for waste valorization integrated with the production of renewable fuels and chemical feedstocks.

Keywords: Co-pyrolysis; Bio-oil; Waste valorization.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3. REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1 Resíduos plásticos e impactos ambientais	15
3.2 O processo de co-pirólise e geração do bio-óleo	16
4.1 Matérias-primas e processo de co-pirólise.....	18
4.2 Propriedades físico-químicas do bio-óleo.....	21
4.3 Análise de dados	21
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
5.1. Rendimento do bio-óleo obtido na co-pirólise de biomassa e resíduos de PET.....	21
5.2. Avaliação das propriedades físico-químicas do bio-óleo	23
5.3. Impactos e perspectivas futuras da co-pirólise de biomassa e resíduos de PET.....	26
6. CONCLUSÃO.....	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de co-pirólise de biomassa e PET	20
Figura 2. Rendimento do bio-óleo na co-pirólise de biomassa e PET, considerando diferentes proporções de matéria-prima e níveis de umidade da biomassa.	22
Figura 3. Características físico-químicas do bio-óleo obtido na co-pirólise de biomassa e PET, considerando diferentes proporções de matéria-prima e níveis de umidade da biomassa.....	24

1. INTRODUÇÃO

A expressiva geração de resíduos plásticos, aliada à crescente demanda por fontes alternativas de energia, tem impulsionado a busca por soluções tecnológicas sustentáveis voltadas à valorização de materiais residuais. Nas últimas décadas, o consumo global de plásticos ultrapassou bilhões de toneladas e, associado à sua baixa taxa de reciclagem, tem resultado em graves impactos ambientais (Bhanderi, Joshi e Patel, 2023). Entre esses impactos, destacam-se o acúmulo de resíduos em ecossistemas terrestres e marinhos, bem como a liberação de microplásticos no meio ambiente, fenômenos que agravam significativamente os riscos ambientais e à saúde humana (Isobe e Iwasaki, 2022).

Nesse contexto, estimativas indicam que, em 2015, a produção global de plástico alcançou aproximadamente 6,3 bilhões de toneladas métricas. Além disso, projeta-se que esse valor alarmante atinja cerca de 12 bilhões de toneladas métricas até o ano de 2050, o que reforça a necessidade de ações urgentes frente a esse cenário preocupante. (Bhanderi, Joshi e Patel, 2023). Soma-se a esse panorama o fato de que os plásticos, amplamente utilizados há cerca de um século, apresentam elevada durabilidade ambiental, podendo persistir no meio ambiente por períodos estimados entre 200 e 400 anos. Como consequência direta dessa característica, os primeiros materiais plásticos produzidos ainda permanecem no ambiente até os dias atuais (Geyer, Jambeck e Law, 2017).

Diante desse cenário crítico, torna-se essencial o desenvolvimento de alternativas tecnológicas capazes de promover a conversão desses resíduos em produtos de maior valor agregado, contribuindo, de forma simultânea, para a mitigação dos impactos ambientais e para o avanço da transição energética em escala global. Nesse contexto, estratégias que integram a gestão de resíduos à produção de energia renovável têm se destacado no meio científico e tecnológico como soluções promissoras. Entre as tecnologias termoquímicas emergentes, a co-pirólise destaca-se como uma rota promissora para o aproveitamento simultâneo de biomassa e resíduos plásticos. Esse processo consiste na degradação térmica conjunta de dois ou mais materiais, realizada na ausência total ou parcial de oxigênio, favorecendo interações sinérgicas que influenciam tanto o rendimento quanto a qualidade dos produtos obtidos (Wang et al.,

2021; Xu et al., 2023). Dentre esses produtos, o bio-óleo configura-se como uma fração particularmente relevante, em razão de sua composição química diversificada e de seu potencial de aplicação como combustível renovável ou como matéria-prima para a indústria química (Mengfan et al., 2022).

Nesse contexto tecnológico, a utilização de resíduos de polietileno tereftalato (PET) na co-pirólise com biomassa lignocelulósica apresenta vantagens significativas, especialmente quando associada ao controle das condições de umidade da biomassa e da proporção de plástico adicionada ao sistema. Estudos recentes têm demonstrado que o PET pode modificar as reações térmicas envolvidas no processo, influenciando a composição química e as propriedades físico-químicas do bio-óleo, como acidez, teor de sólidos e densidade (Cupertino et al., 2024; Dimassi et al., 2023). Dessa forma, a integração entre biomassa lignocelulósica e resíduos plásticos configura-se como uma estratégia eficaz não apenas para a redução do volume de resíduos descartados, mas também para a viabilização da produção de combustíveis com propriedades ajustáveis. Nesse contexto, a umidade da biomassa exerce influência direta sobre a eficiência da pirólise e sobre as características do bio-óleo, podendo afetar parâmetros como rendimento, teor de água, acidez e estabilidade.

De maneira complementar, o percentual de PET adicionado ao sistema altera a dinâmica das reações térmicas, influenciando a composição química e as propriedades físico-químicas do bio-óleo. Assim, compreender como a umidade da biomassa e a fração de PET impactam as propriedades do bio-óleo torna-se essencial para o aprimoramento e a otimização das tecnologias de conversão termoquímica. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo analisar a geração e a qualidade do bio-óleo produzido a partir da co-pirólise de biomassa de *Eucalyptus spp.* e resíduos de PET, avaliando como a variação na proporção dos materiais e nos níveis de umidade influencia os parâmetros físico-químicos do produto líquido. Dessa forma, a pesquisa busca contribuir para o avanço do conhecimento acerca da valorização de resíduos sólidos, bem como para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis voltadas à produção de energia e de insumos químicos renováveis.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Investigar a influência da proporção de resíduos de polietileno tereftalato (PET) e da umidade da biomassa de *Eucalyptus spp.* na produção e qualidade do bio-óleo obtido por co-pirólise, visando compreender os efeitos dessas variáveis sobre o rendimento e as propriedades físico-químicas do produto.

2.2 Objetivos específicos

- i. Avaliar os rendimentos de bio-óleo obtidos a partir de diferentes combinações de biomassa lignocelulósica e PET, considerando distintos níveis de umidade da biomassa.
- ii. Analisar a influência da umidade da biomassa e da fração de PET adicionada sobre as propriedades físico-químicas do bio-óleo, incluindo densidade, pH, teor de sólidos e teor de água.
- iii. Investigar o comportamento térmico e potenciais interações químicas entre a biomassa e o PET ao longo do processo de co-pirólise.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduos plásticos e impactos ambientais

Os plásticos são materiais sintéticos conhecidos por suas propriedades e aplicações em diversos setores da economia moderna, devido ao seu baixo custo e versatilidade. Esses materiais são formados por macromoléculas orgânicas denominadas polímeros, que podem apresentar diversas formulações que conferem características como transparência ou cor, flexibilidade ou rigidez (Costa, 2025).

Desde o desenvolvimento do primeiro plástico sintético, a baquelite, em 1907, o uso desses materiais expandiu-se de forma acelerada, impulsionado por sua aplicabilidade em diversos setores industriais e domésticos (Thompson et al., 2009). Embora os estudos clássicos tenham fundamentado a compreensão sobre a evolução do uso de polímeros, seus impactos ambientais permanecem altamente relevantes no cenário atual, em função da persistência e do acúmulo de resíduos plásticos no meio ambiente.

A produção mundial de plásticos, que já havia atingido cerca de 6,3 bilhões de toneladas métricas em 2015, continua em crescimento, com projeções que indicam um volume acumulado superior a 12 bilhões de toneladas até 2050 (Bhandari, Joshi e Patel, 2023). A durabilidade dos plásticos, que pode ultrapassar dois séculos, associada à baixa taxa de reciclagem e à degradação extremamente lenta, resulta em acúmulo significativo em solos, oceanos e aterros (Geyer, Jambeck e Law, 2017). Estudos de referência, documentaram a entrada massiva de resíduos plásticos nos ecossistemas marinhos e a formação de extensas áreas de acúmulo, como a chamada “Grande Mancha de Lixo do Pacífico” (Jambeck et al., 2015).

Entre os diversos tipos de polímeros, o polietileno tereftalato (PET) se destaca por ser amplamente utilizado na fabricação de embalagens, especialmente de bebidas e alimentos, devido às suas propriedades mecânicas, estabilidade térmica e transparência (Dimassi et al., 2023). No entanto, essas mesmas características que conferem resistência e utilidade ao material também dificultam sua degradação e reciclagem convencional, tornando o PET um dos principais responsáveis pelo acúmulo de resíduos plásticos no ambiente (Hopewell, Dvorak e Kosior, 2009).

Os impactos ambientais decorrentes do acúmulo de plásticos são amplos e persistentes. No ambiente terrestre, esses materiais podem alterar a estrutura física do solo, comprometendo sua permeabilidade e aeração, além de liberar substâncias químicas potencialmente tóxicas que podem ser absorvidas pelas plantas e entrar na cadeia alimentar (Bläsing e Amelung, 2018). Em ambientes aquáticos, a fragmentação dos plásticos gera microplásticos que são ingeridos por organismos marinhos, acumulando-se ao longo da cadeia trófica e representando riscos à fauna e à saúde humana (Rochman et al., 2013).

Diante desse cenário, torna-se necessário desenvolver tecnologias capazes de promover a valorização energética e química de resíduos plásticos, reduzindo o impacto ambiental e viabilizando o aproveitamento sustentável desses materiais. Nesse contexto, a co-pirólise tem se destacado como uma alternativa promissora. O processo permite a conversão simultânea de plásticos e biomassa em produtos de maior valor agregado, como o bio-óleo, integrando o gerenciamento de resíduos à produção de energia renovável (Cupertino et al., 2024).

A combinação de biomassa e plásticos durante o processo termoquímico favorece reações sinérgicas que podem otimizar o rendimento e melhorar a qualidade dos produtos obtidos. Além de reduzir o volume de resíduos descartados, a co-pirólise contribui para a valorização de materiais de difícil degradação, aproximando-se dos princípios da economia circular, que busca reinserir resíduos em ciclos produtivos de forma sustentável (Adeniyi et al., 2024). Assim, a utilização de resíduos plásticos na co-pirólise representa uma estratégia tecnológica que alia a mitigação de impactos ambientais à geração de energia limpa e à produção de compostos de interesse industrial.

3.2 O processo de co-pirólise e geração do bio-óleo

A co-pirólise consiste em um processo termoquímico que envolve a degradação térmica de dois ou mais materiais distintos simultaneamente. O aquecimento ocorre na ausência total ou parcial de oxigênio e diferente da pirólise convencional, pode levar à efeitos sinérgicos que alteram o rendimento e a composição dos produtos obtidos (Wang et al., 2021). Durante o processo, as elevadas temperaturas e a atmosfera inerte rompem as ligações químicas dos componentes orgânicos, dando origem a três frações principais:

sólida, líquida e gasosa (Xu et al., 2023). Entre os produtos gerados, o bio-óleo, que também é denominado como extrato pirolenhoso, ácido pirolenhoso, vinagre de madeira, licor pirolenhoso ou fumaça líquida, constitui a fração líquida resultante do processo, apresentando uma mistura complexa de compostos químicos orgânicos com características que variam de acordo com a natureza das matérias-primas utilizadas e com as condições operacionais (Wang et al., 2021).

A composição final do bio-óleo, fração líquida do processo, é fortemente influenciada por três fatores: a constituição química das matérias-primas, a natureza do processo e o teor de umidade inicial da biomassa (Fakayode et al., 2023). Pesquisas recentes indicam que a co-pirólise de biomassa com plásticos tende a favorecer o aumento do rendimento em bio-óleo quando comparada à pirólise isolada da biomassa (Fakayode et al., 2023; Xu et al., 2023). Esse comportamento está associado às características químicas dos polímeros, que podem atuar como agentes de hidrogenação, promovendo reações de quebra e condensação que favorecem a formação de compostos líquidos.

O bio-óleo produzido por meio da co-pirólise apresenta elevado potencial tanto para aplicação como fonte de energia renovável quanto como matéria-prima para a indústria química, especialmente na síntese de compostos de maior valor agregado (Mengfan et al., 2022). Nesse cenário, a co-pirólise de biomassa lignocelulósica com resíduos plásticos, como o polietileno tereftalato (PET), emerge como uma alternativa promissora para a valorização de materiais de difícil degradação e para o aproveitamento sustentável de resíduos (Cupertino et al., 2024). Durante a degradação térmica do PET, a formação de um meio ácido pode modificar as vias reacionais do processo, influenciando a geração de compostos oxigenados e aromáticos e, consequentemente, propriedades físico-químicas do bio-óleo, como acidez, densidade e teor de sólidos (Berthold et al., 2023; Li et al., 2021).

Paralelamente, a umidade intrínseca da biomassa constitui um fator determinante para o desempenho da pirólise e para a qualidade do bio-óleo, uma vez que afeta diretamente o rendimento, a densidade e a estabilidade do produto final (Vieira et al., 2015). Durante o aquecimento, a água presente na estrutura lignocelulósica é liberada na forma de vapor e interage com os compostos voláteis e oxigenados gerados no

sistema, promovendo reações secundárias que alteram a composição do bio-óleo (Chen et al., 2023). Assim, compreender de forma integrada a influência da adição de PET e da umidade inicial da biomassa sobre o comportamento térmico e as propriedades do bio-óleo é fundamental para o avanço tecnológico da co-pirólise como estratégia sustentável de conversão de resíduos em produtos energéticos e químicos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matérias-primas e processo de co-pirólise

Neste estudo, as matérias-primas utilizadas foram a biomassa de *Eucalyptus* spp. e resíduos plásticos sintéticos de polietileno tereftalato (PET) pós-consumo. A biomassa de *Eucalyptus* spp., proveniente de uma plantação experimental, apresentou uma composição química constituída por 30,41% ($\pm 0,62$) de lignina total, 0,95 % ($\pm 0,08$) de extrativos e 68,64 % ($\pm 0,74$) de holocelulose, determinada conforme normas estabelecidas (TAPPI, 1997; Tappi, 2002). Já a fonte plástica foi obtida a partir de materiais pós-consumo à base de PET, como garrafas contendo água, sucos, refrigerantes e outras bebidas, coletadas em uma unidade de manejo de resíduos. As biomassas e os plásticos foram triturados em um moinho de facas do tipo Wiley e peneirados em malhas de 40 a 60 mesh (0.425–0.250 mm). Posteriormente, foram preparados blends de biomassa e PET, nos quais o PET foi incorporado em 0 %, 15 % e 30 % em massa, garantindo que a biomassa permanecesse como o componente predominante do processo. Além dessas variações, a umidade da biomassa foi ajustada para 0 %, 15 % e 30 %, valores comumente encontrados em processos industriais de produção de carvão vegetal, a fim de verificar a influência dessas condições sobre as características do bio-óleo para aplicações em biorrefinaria. As matérias-primas e os blends foram previamente secas conforme e posteriormente avaliadas quanto ao teor de matéria volátil, teor de cinzas e carbono fixo (ASTM, 2021), visando elucidar as propriedades que afetam a produção e a qualidade do bio-óleo obtido (Tabela 01).

Tabela 1. Composição química aproximada das matérias-primas e das misturas utilizadas no estudo.

Análises	Biomassa	PET	15P	30P
Materiais Voláteis	85.55% $\pm$ 0.21	91.14% $\pm$ 0.18	86,39% $\pm$ 0.25	87.23% $\pm$ 0.27
Cinzas	0.26% $\pm$ 0.03	0.10% $\pm$ 0.02	0.24% $\pm$ 0.02	0.21% $\pm$ 0.02
Carbono Fixo	14.19% $\pm$ 0.19	8.75% 0.16	13.37% $\pm$ 0.22	12.56% $\pm$ 0.24

Em que: 15P = 15% PET + 85% biomassa; 30P = 30% PET + 70% biomassa.

Os processos de co-pirólise foram realizados em um reator metálico de leito fixo, inserido em um forno tipo mufla (Fig. 1A) e sem adição de gases de modo a minimizar a oxidação da biomassa e do PET. Este tipo de reator constitui uma tecnologia simples, confiável e bem estabelecida, adequada para o processamento de partículas sólidas com tamanho relativamente uniforme. Cada ensaio utilizou 15 gramas de matéria-prima, combinando diferentes proporções de biomassa, PET e níveis de umidade, conforme o planejamento experimental. O controle e monitoramento da temperatura foram realizados por meio de um controlador programável Contemp (C704), com termopar distribuído ao longo do reator e acoplado a um *datalogger* (Fig. 1B e 1C), permitindo a verificação contínua da temperatura nas amostras e garantindo condições térmicas precisas e uniformes durante todo o processo. Considerando que o principal objetivo do estudo era a obtenção de bio-óleo, as amostras foram aquecidas a uma taxa de $16\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, partindo de uma temperatura inicial de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, até atingir a temperatura final de $450\text{ }^{\circ}\text{C}$, a qual foi mantida por 15 minutos para permitir a completa recuperação dos condensados.

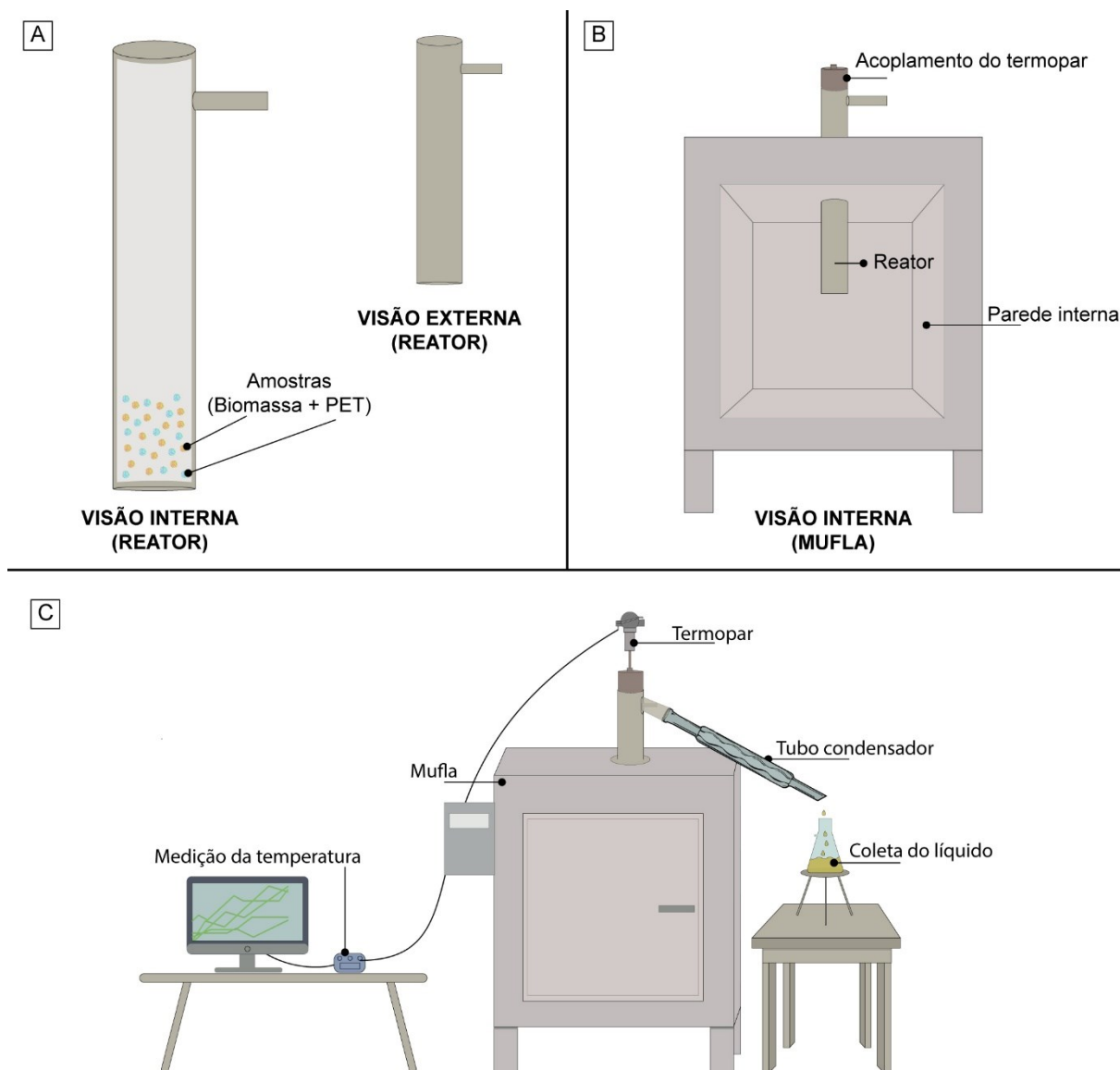


Figura 1. Sistema de co-pirólise de biomassa e PET. A = reator de leito fixo; b = forno mufla acoplado ao reator; c = sistema de condensação de bio-óleo. Fonte: A autora.

Os bio-óleos obtidos com diferentes proporções de PET e níveis de umidade da biomassa foram rotulados de acordo com a composição de cada blend. Os produtos gerados a partir de biomassa com 0 % de umidade e PET incorporado em 0 %, 15 % e 30 % foram denominados 0U0P, 0U15P e 0U30P, respectivamente. Para a biomassa com 15 % de umidade, os blends com 0 %, 15 % e 30 % de PET foram rotulados como 15U0P, 15U15P e 15U30P, enquanto para a biomassa com 30 % de umidade, os bio-óleos correspondentes foram identificados como 30U0P, 30U15P e 30U30P. Após cada ensaio, os rendimentos gravimétricos dos bio-óleos foram determinados utilizando a Equação 1.

$$RBIO = \left(\frac{M_{bio}}{M_{mp}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: RBIO = rendimento em bio-óleo (%); M_{bio} = massa do bio-óleo (g); M_{mp} = massa da matéria prima (g)

4.2 Propriedades físico-químicas do bio-óleo

Os bio-óleos obtidos nas diferentes combinações de biomassa e PET foram submetidos a uma série de análises físico-químicas para caracterização completa de suas propriedades. Entre os parâmetros avaliados estão a densidade ($D = \text{Massa}/\text{Volume}$, em g.cm³), teor de sólidos e pH. O teor de água foi determinado por meio de titulação Karl-Fischer, utilizando um sistema equipado com bombas para enchimento e descarte dos reagentes, o que possibilitou a quantificação precisa da umidade presente nas amostras, minimizando perdas por evaporação e garantindo elevada confiabilidade dos resultados.

4.3 Análise de dados

Os dados foram coletados em cinco repetições, e os resíduos foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (Bartlett). Com os pressupostos atendidos, a análise de variância (ANOVA) foi conduzida ($\alpha = 0,05$) seguindo um delineamento inteiramente aleatorizado com distribuição fatorial 3x3, onde foram analisados os efeitos de três níveis de umidade (0%, 15% e 30%) e três proporções de PET (0%, 15% e 30%) nas variáveis de interesse. Em casos de diferenças significativas ($p\text{-valor} < 0,05$), procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão, sendo selecionado o modelo que melhor previu o comportamento dos dados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Rendimento do bio-óleo obtido na co-pirólise de biomassa e resíduos de PET

A Figura 2 apresenta os rendimentos de bio-óleo em função das combinações entre biomassa lignocelulósica e resíduos de PET, considerando distintos níveis de umidade da biomassa.

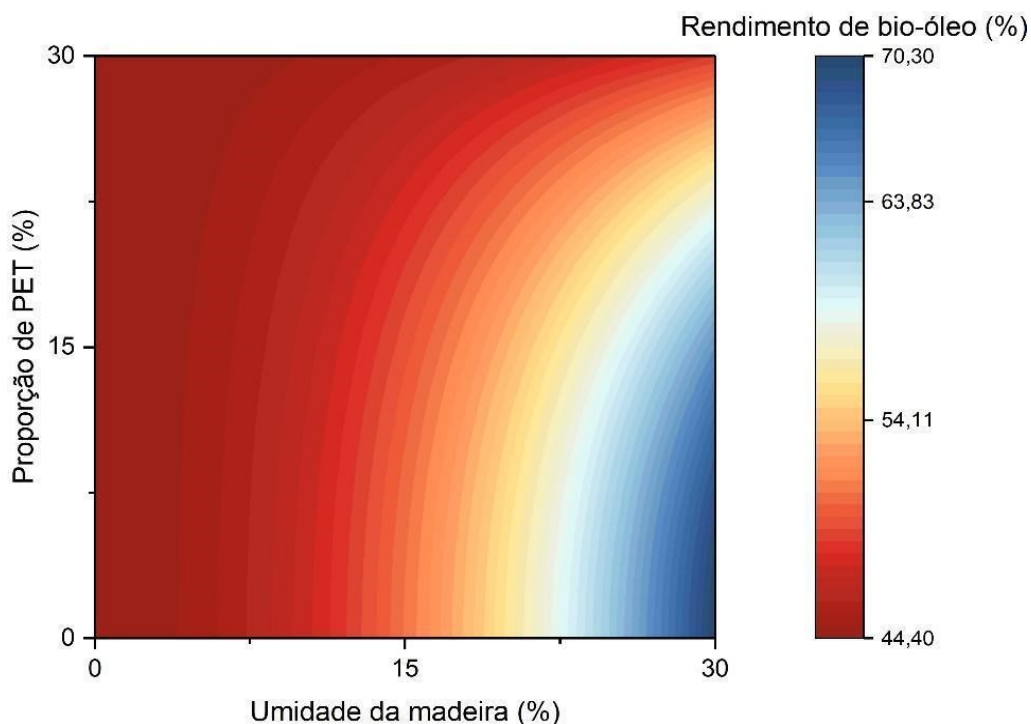


Figura 2. Rendimento do bio-óleo na co-pirólise de biomassa e PET, considerando diferentes proporções de matéria-prima e níveis de umidade da biomassa (UMI). O rendimento foi descrito pelo modelo polinomial: $REN = 44,4700855 - 0,0286853 UMI^2 - 2,66E-05 (UMI^2 \times PET^2)$. Fonte: A autora.

A partir da análise da Figura 2, observa-se que o aumento gradual da fração de PET mantém o rendimento de bio-óleo relativamente constante até um determinado limite. Contudo, quando a proporção de PET atinge aproximadamente 30%, ocorre uma redução significativa no rendimento de bio-óleo. Esse comportamento pode ser associado à interferência do polietileno tereftalato nos mecanismos de degradação térmica da biomassa, uma vez que o PET apresenta maior estabilidade térmica e diferentes temperaturas de degradação em comparação aos constituintes lignocelulósicos (Al-Rumaihi et al., 2022). Essa diferença pode comprometer a sincronia entre a liberação de voláteis da biomassa e a formação da fase líquida, reduzindo a eficiência global de produção de bio-óleo (Cupertino et al., 2024).

Do ponto de vista prático, teores elevados de PET tendem a favorecer a formação de produtos gasosos e resíduos sólidos, além de demandar maior aporte energético para a degradação térmica do sistema. Esses fatores não apenas reduzem o rendimento da fração líquida, como também podem impactar negativamente a operação do reator, exigindo maior controle térmico e podendo aumentar a geração de resíduos sólidos indesejáveis. Assim, proporções excessivas de PET podem tornar o processo menos

eficiente e economicamente menos atrativo quando o objetivo principal é a maximização da produção de bio-óleo.

Em contrapartida, na ausência de PET, observa-se que o aumento da umidade da biomassa promove um incremento no rendimento de bio-óleo. Esse efeito está relacionado à liberação de vapor de água durante o aquecimento, o qual contribui para o aumento da pressão parcial no interior do reator e favorece a condensação dos compostos orgânicos voláteis (Fernandez et al., 2022). Na prática, esse fenômeno pode facilitar a recuperação da fase líquida e reduzir perdas por arraste gasoso, especialmente em sistemas de pirólise em escala piloto ou industrial (Fernandez et al., 2022).

Dessa forma, os resultados evidenciam que tanto a proporção de PET quanto o teor de umidade da biomassa exercem influência direta sobre o rendimento de bio-óleo, destacando a necessidade de um balanceamento adequado dessas variáveis. Sob a perspectiva operacional, o controle do teor de umidade da biomassa e a definição de limites ótimos para a adição de PET são estratégias fundamentais para maximizar a eficiência do processo de co-pirólise, reduzir custos energéticos e viabilizar a aplicação prática dessa tecnologia na valorização integrada de resíduos. Entretanto, o rendimento por si só não é suficiente para avaliar a viabilidade do bio-óleo obtido, sendo igualmente importante a análise de suas propriedades físico-químicas, as quais determinam sua qualidade, estabilidade e potencial de aplicação energética ou química. Nesse sentido, o próximo tópico aborda a caracterização do bio-óleo produzido, permitindo uma avaliação mais completa dos efeitos das condições operacionais sobre o produto final.

5.2. Avaliação das propriedades físico-químicas do bio-óleo

A avaliação das propriedades físico-químicas do bio-óleo é fundamental para a compreensão da qualidade do produto obtido no processo de co-pirólise e para a definição de suas possíveis aplicações. Parâmetros como densidade, teor de sólidos, teor de água e pH estão diretamente relacionados ao comportamento do bio-óleo durante o armazenamento, transporte e uso final, além de influenciarem a necessidade de etapas adicionais de tratamento ou condicionamento (Al-Rumaihi et al., 2022). A Figura 3 apresenta os resultados dessas propriedades para o bio-óleo produzido a partir da co-

pirólise de biomassa e PET, considerando diferentes proporções de matéria-prima e teores de umidade da biomassa.

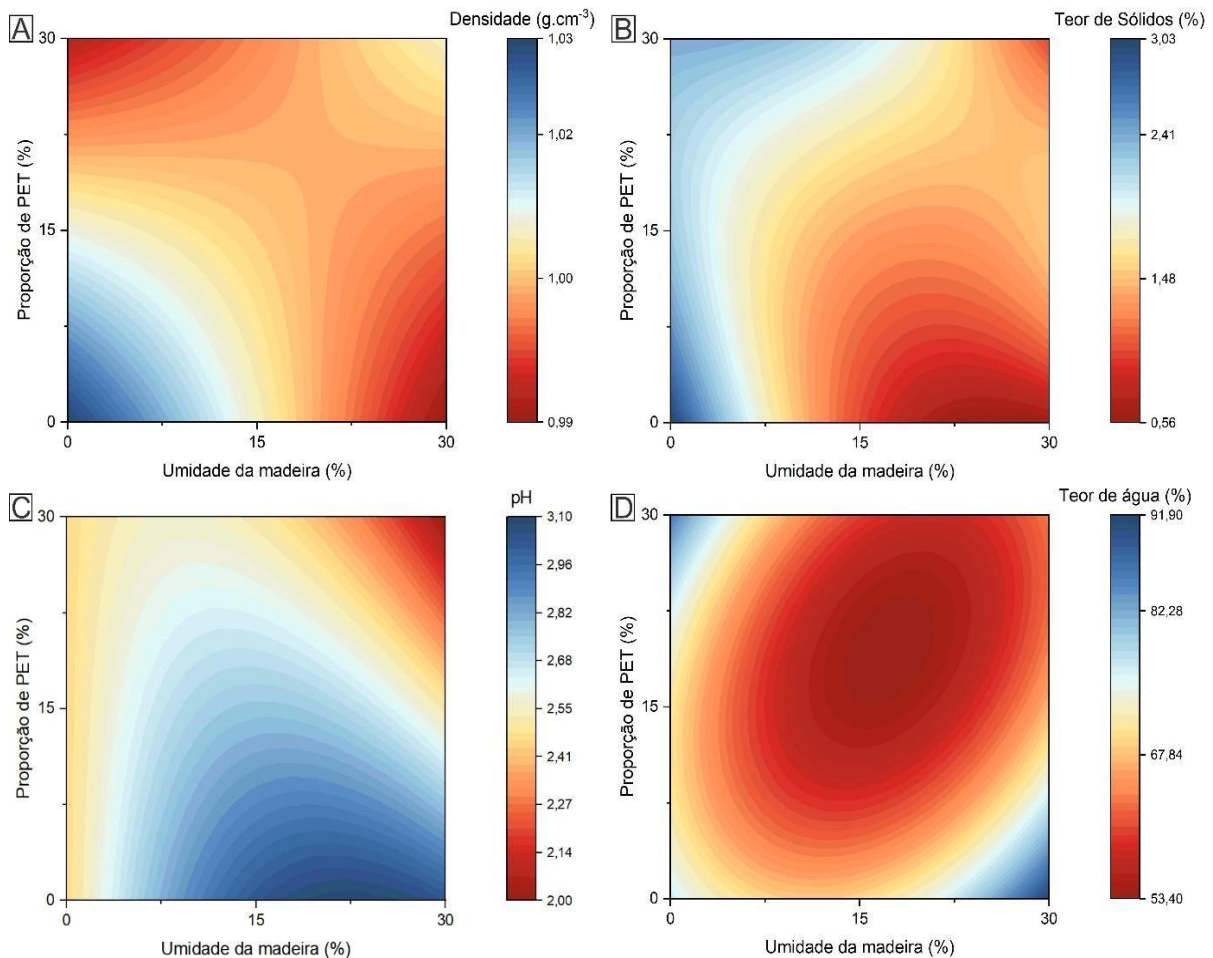


Figura 3. Características físico-químicas do bio-óleo obtido na co-pirólise de biomassa e PET, considerando diferentes proporções de matéria-prima e níveis de umidade da biomassa (UMI). As propriedades foram descritas pelos seguintes modelos polinomiais: $DENS = 1,0305481 - 0,0012752 \text{ UMI} - 0,0011866 \text{ PET} + 0,0000607 (\text{UMI} \times \text{PET})$; $pH = 2,4606667 + 0,0561644 \text{ UMI} - 0,0012415 \text{ UMI}^2 - 0,0011369 (\text{UMI} \times \text{PET})$; $TS = 3,0242918 - 0,1879114 \text{ UMI} - 0,0815849 \text{ PET} + 0,0035863 \text{ UMI}^2 + 0,0020429 \text{ PET}^2 + 0,0063219 (\text{UMI} \times \text{PET}) - 5,8E-06 (\text{UMI}^2 \times \text{PET}^2)$; $TH_2O = 76,5521065 - 1,464838 \text{ UMI} - 1,0649028 \text{ PET} + 0,0658049 \text{ UMI}^2 + 0,0461883 \text{ PET}^2 + 0,0422046 (\text{UMI} \times \text{PET})$. Fonte: A autora.

A densidade do bio-óleo (Figura 3A) apresentou tendência de redução com o aumento da umidade da biomassa e com a adição de PET, especialmente na proporção de 30% na ausência de umidade. Esse comportamento pode ser atribuído à maior

incorporação de água à fase líquida e à alteração da composição química do bio-óleo, com menor participação de compostos de maior massa molecular. Em termos práticos, bio-óleos de menor densidade tendem a apresentar melhor fluidez, facilitando o bombeamento e o transporte em sistemas industriais. No entanto, essa redução pode estar associada a menor conteúdo energético por unidade de volume, aspecto relevante quando se considera o uso do bio-óleo como combustível (Cupertino et al., 2024).

Quanto ao teor de sólidos (Figura 3B), observa-se que o aumento da umidade da biomassa resultou em valores mais baixos, enquanto a adição de PET promoveu um incremento dessa propriedade. A redução do teor de sólidos em bio-óleos provenientes de biomassa mais úmida está relacionada ao efeito de diluição causado pela água condensada durante o processo de pirólise. Por outro lado, a presença de PET favorece a formação de resíduos não voláteis e oligômeros durante sua degradação térmica, elevando o teor de sólidos na fase líquida (Al-Rumaihi et al., 2022). Do ponto de vista operacional, elevados teores de sólidos podem comprometer a estabilidade do bio-óleo, favorecendo a formação de sedimentos, o entupimento de bicos injetores e o desgaste de equipamentos, tornando necessárias etapas adicionais de filtração ou separação antes do uso.

O pH do bio-óleo (Figura 3C) também foi influenciado pelas condições do processo. O aumento da umidade da biomassa resultou em bio-óleos menos ácidos, em função da diluição dos ácidos orgânicos presentes na fase líquida. Em contrapartida, a adição de PET contribuiu para a obtenção de bio-óleos mais ácidos, devido à formação de compostos ácidos durante a decomposição térmica do polímero. Do ponto de vista prático, valores mais baixos de pH indicam maior potencial corrosivo, o que pode restringir o uso direto do bio-óleo em equipamentos metálicos convencionais e exigir cuidados adicionais no armazenamento, bem como processos de neutralização ou estabilização antes da aplicação final (Cupertino et al., 2024).

O teor de água do bio-óleo (Figura 3D) mostrou-se fortemente dependente do teor de umidade inicial da biomassa. Na ausência de PET, o aumento da umidade da biomassa resultou em maior incorporação de água ao bio-óleo, devido à condensação direta do vapor de água liberado durante o aquecimento. Em termos práticos, elevados teores de água reduzem o poder calorífico do bio-óleo, limitando sua aplicação direta

como combustível. Por outro lado, a presença de água pode reduzir a viscosidade do produto, facilitando o manuseio e o transporte, especialmente em sistemas de escala piloto ou industrial (Fernandez et al., 2022).

De modo geral, os resultados evidenciam que tanto a proporção de PET quanto o teor de umidade da biomassa exercem influência significativa não apenas sobre o rendimento do bio-óleo, mas também sobre suas propriedades físico-químicas e, conseqüentemente, sobre sua viabilidade de uso. Os dados obtidos indicam que diferentes condições operacionais favorecem distintas rotas de aproveitamento dos produtos da co-pirólise. Bio-óleos produzidos a partir de biomassa com maior teor de umidade, caracterizados por elevado teor de água e menor densidade energética, mostram-se mais adequados para aplicações que envolvem processos de reforma a vapor, especialmente para a produção de hidrogênio, nos quais a presença de água constitui um fator favorável.

Em contrapartida, a utilização de biomassa com teor de umidade intermediário associada à adição controlada de PET, na faixa de 10 a 20% em massa, resulta em bio-óleos com menor teor de água, maior estabilidade e melhores propriedades energéticas, tornando-os mais indicados para aplicações térmicas e para a substituição parcial de derivados do petróleo, como óleos combustíveis, após etapas de melhoria. Dessa forma, o ajuste das condições de processo permite direcionar a co-pirólise para a obtenção de produtos com características específicas, ampliando as possibilidades de uso energético e industrial dos bio-óleos gerados, o que reforça a importância da caracterização detalhada dessas propriedades para a definição da aplicação final desejada.

5.3. Impactos e perspectivas futuras da co-pirólise de biomassa e resíduos de PET

A co-pirólise de biomassa lignocelulósica e resíduos de PET destaca-se como uma alternativa ambiental e tecnologicamente relevante para a valorização integrada de resíduos, contribuindo para a redução do volume destinado a aterros e para o aproveitamento energético de materiais com elevado potencial de recuperação, em consonância com os princípios da economia circular (Al-Rumaihi et al., 2022).

Os resultados obtidos demonstram que as características do bio-óleo são fortemente influenciadas pela composição das matérias-primas e pelas condições

operacionais. A adição de PET pode modificar o rendimento e as propriedades físico-químicas do produto, sendo necessária a definição de proporções adequadas para evitar a redução da fração líquida e alterações indesejáveis, como aumento da acidez e do teor de sólidos (Cupertino et al., 2024). De forma complementar, o teor de umidade da biomassa exerce influência direta sobre o rendimento e a qualidade do bio-óleo, impactando sua estabilidade e a necessidade de tratamentos posteriores (Fernandez et al., 2022).

Como perspectivas futuras, destaca-se a importância de estudos voltados à otimização das condições de co-pirólise, à avaliação de diferentes combinações de biomassa e resíduos plásticos e à aplicação de estratégias de melhoria da qualidade do bio-óleo, como o uso de catalisadores e etapas de refino. Além disso, análises ambientais e econômicas são fundamentais para consolidar a co-pirólise como uma rota tecnicamente viável e ambientalmente promissora para a conversão sustentável de resíduos (Mendes et al., 2023; Benedini et al., 2024).

6. CONCLUSÃO

A co-pirólise de biomassa lignocelulósica e resíduos de polietileno tereftalato (PET) mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável para a valorização integrada de resíduos, desde que conduzida sob condições operacionais adequadas. Os resultados obtidos indicam que a utilização de biomassa com teor de umidade intermediário associada à adição controlada de PET, em torno de 10 a 20% em massa, favorece a obtenção de rendimentos mais estáveis de bio-óleo, sem comprometer significativamente suas propriedades físico-químicas. O controle dessas variáveis operacionais contribui para a eficiência do processo e amplia o potencial da co-pirólise como ferramenta de apoio ao gerenciamento sustentável de resíduos, ao possibilitar a conversão de materiais com destinação final limitada em produtos de maior valor agregado.

Além do bio-óleo, o processo gera frações gasosa e sólida, que podem ser exploradas para fins energéticos, químicos e ambientais, como a produção de energia térmica, insumos industriais e materiais carbonáceos. Sob a perspectiva ambiental, a co-pirólise pode contribuir para a redução da disposição inadequada de resíduos e da

dependência de fontes fósseis, alinhando-se aos princípios da economia circular. No entanto, a ampliação dessa tecnologia requer atenção ao controle de emissões e à avaliação dos impactos ambientais associados ao processo. Dessa forma, a co-pirólise de biomassa e PET apresenta potencial para o desenvolvimento de novas rotas de conversão termoquímica e geração de produtos, desde que integrada a estratégias adequadas de controle de processo e sustentabilidade ambiental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adeniyi, A. G.; Iwuozor, K. O.; Emenike, E. C.; Ajala, O. J.; Ogunniyi, S.; Muritala, K. B. Thermochemical co-conversion of biomass-plastic waste to biochar: a review. **Green Chemical Engineering**, v.5, n. 1, p. 31-49, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.gce.2023.03.002>.

Al-Rumaihi, A.; Shahbaz, M.; McKay, G.; Mackey, H.; Al-Ansari, T. A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 167, p. 112715, 2022. American Society for Testing and Material.

Benedini, L.; Jensen, C. D.; Ahrenfeldt, J.; Henriksen, U. B. Production and characterization of two-step condensation bio-oil from pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 183, p. 106744, out. 2024.

Berthold, E. E. S.; Deng, W.; Zhou, J.; Bertrand, A. M. E.; Xu, J.; Jiang, L.; Su, S.; Hu, S.; Hu, X.; Wang, Y.; Xiang, J. Impact of plastic type on synergistic effects during co-pyrolysis of rice husk and plastics. **Energy**, v. 281, p. 128270, 2023.

Bhanderi, K. K.; Joshi, J. R.; Patel, J. V. Reciclagem de plásticos de tereftalato de polietileno (PET) – Uma alternativa para a obtenção de produtos de valor agregado. **Journal of the Indian Chemical Society**, v.100, n.1, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ics.2022.100843>.

Bläsing, M.; Amelung, W. Plásticos no solo: métodos analíticos e possíveis fontes. **Ciência do Meio Ambiente Total**, v. 612, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>.

Chen, W. H.; Naveen C; Ghodke, P. K.; Sharma, A. K.; Bobde, P. Co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with other carbonaceous materials: A review on advance technologies, synergistic effect, and future prospectus. **Fuel**, v. 345, p. 128177, 2023.

Chen, Y.; Feng, C.; Jin, C.; Zhu, Y.; Huang, J.; NA, H.; Zhu, J. Ácidos sólidos bifuncionais in situ contendo grupos B –OH e –COOH para hidrólise eficiente de celulose em açúcar em uma fase aquosa pura. **Química Verde**, v. 26, n. 2, p. 948-959, 2024.

Costa, D. Arqueologia dos plásticos: um estudo contemporâneo sobre os polímeros. **Vestígios - Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica**, v. 19, n. 1, p. 127–154, 2025. DOI: 10.31239/pdv6bg57.

Cupertino, G. F. M. ; Silva, A. M. ; Pereira, A. K. S. ; Delatorre, F. M. ; Ucella Filho, J. G. M. ; Souza, E. C. ; Profeti, D. ; Profeti, L. P. R. ; Oliveira, M. P. ; Saloni, D. ; Luque, R. ; Dias Júnior, A. F. Co-pyrolysis of biomass and polyethylene terephthalate (PET) as an alternative for energy production from waste valorization. **Fuel**, v. 362, p. 130761, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130761>.

D1762-84. Standard Test Method for Screening Apparent Specific Gravity and Bulk Density of Waste. Philadelphia, 2021.

Dimassi, S. N.; Hahladakis, J. N.; Yahia, M. N. D.; Ahmad, M. I.; Sayadi, S.; Al-Ghouti, M. A. Insights into the degradation mechanism of PET and PP under marine conditions using FTIR. **Journal of Hazardous Materials**, v. 447, p. 130796, 2023.

FAKAYODE, O. A.; WAHIA, H.; ZHANG, L.; ZHOU, C.; MA, H. State-of-the-art co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomass feedstocks for improved bio-oil production- A review. **Fuel**, v. 332, p. 126071, 2023.

Fernandez, E.; Santamaria, L.; Amutio, M.; Artetxe, M.; Arregi, A.; Lopez, G.; Bilbao, J.; Olazar, M. Role of temperature in the biomass steam pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Energy**, v. 238, p. 122053, 1 jan. 2022.

Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, 2017.

Hopewell, J.; Dvorak, R.; Kosior, E. Reciclagem de plásticos: desafios e oportunidades. **Transações Filosóficas da Royal Society B: Ciências Biológicas**, v. 1526, pág. 2115-2126, 2009. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008>.

Isobe, A.; Iwasaki, S. The fate of missing ocean plastics: Are they just a marine environmental problem? **Science of The Total Environment**, v. 825, p. 153935, jun. 2022.

Jambeck, Jr.; Geyer, R.; Wilcox, C.; e outros. Entradas de resíduos plásticos da terra para o oceano. **Ciência**, v. 347, 2015. <https://doi.org/10.1126/science>.

Li, S.; Cañete Vela, I.; Järvinen, M.; Seemann, M. Polyethylene terephthalate (PET) recycling via steam gasification – The effect of operating conditions on gas and tar composition. **Waste Management**, v. 130, p. 117–126, 2021.

Mendes, F. L.; Pinho, A. R. De; Almeida, M. B. B. De; Caramão, E. Biomass pyrolysis in a circulating fluidized bed reactor: Evaluating two strategies for the reduction of oxygen content in bio-oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 175, p. 106150, out. 2023.

Mengfan, L., Jingjing, Y., Chengliang, Z., Runqin, H., Zhongguo, Z., & Wenbo, C.. Quantitative analysis of multi-components by single-marker: An effective method for the chemical characterization of wood vinegar. **Industrial Crops and Products**, 182, 114862, 2022. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2022.114862>.

Rochman, CM; Hoh, E.; Kurobe, T.; Teh, SJ. Plástico ingerido transfere produtos químicos perigosos para peixes e induz estresse hepático. **Relatórios Científicos**, v. 3, 2013. <https://doi.org/10.1038/srep03263>.

Thompson, RC; Moore, CJ; Vom Saal, FS; Swan, SH. Plásticos, meio ambiente e saúde humana: consenso atual e tendências futuras. **Transações Filosóficas da**

Royal Society B: Ciências Biológicas, v. 1526, pág. 2153-2166, 2009.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>.

Vieira, R. P.; Mokochinski, J. B.; Palma, L. C.; Lidoino, V. G.; Halasz, M. R. T. **Caracterização Química do Extrato Pirolenhoso Oriundo da Carbonização**. In: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2015.

Wang, Z.; Burra, K. G.; Lei, T.; Gupta, A. K. Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 84, p. 100899, 2021.

Xu, D., Zhang, Z., He, Z., & Wang, S. Machine learning-driven prediction and optimization of monoaromatic oil production from catalytic co-pyrolysis of biomass and plastic wastes. **Fuel**, 350, 128819, 2023.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.128819>.

Yusoff, Y.; Sann, T. E. Biomass-plastic fusion: In-depth characterization through FTIR and TGA analysis. **Materials Today: Proceedings**, v. 12, p. 100-105, 2024.