



OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DA CO-PIRÓLISE DE PINUS E POLIETILENO DE BAIXA DENSIDADE VISANDO À PRODUÇÃO DE SAF DROP-IN

Nicolas B. Dêgar¹; Hellen M. Oltramari¹; Gabriel R. M. Logrado¹

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS

E-mail: nicolasdegar@gmail.com

Palavras-Chave: Resíduos, Destilação, Combustível Alternativo.

Introdução

O setor de aviação enfrenta um dos maiores desafios da sua história: conciliar o crescimento da demanda por transporte aéreo com a necessidade urgente de reduzir suas emissões de gases de efeito estufa. O combustível representa um dos principais custos operacionais das companhias aéreas, e a queima de querosene de aviação (QAV) de origem fóssil é responsável por cerca de 5% das emissões globais de carbono. Estima-se que a aviação comercial contribua significativamente para o aquecimento global, o que impulsiona pesquisas no sentido de desenvolver processos comercialmente viáveis e sustentáveis para produção de combustível de aviação renovável com baixo custo e baixas emissões. Neste contexto, os biocombustíveis sustentáveis oferecem solução para questões relativas aos preços do petróleo bruto, segurança nacional, impacto ambiental e sustentabilidade.

De acordo com dados da FAPESP, é previsto o consumo mundial de 7,7 bilhões de litros de SAF em 2025, sendo esta demanda ampliada para 449 bilhões de litros em 2050. Atualmente, o consumo anual estimado deste combustível é de 390 bilhões de litros, sendo que sua produção é de apenas 14 milhões de litros. A produção global de SAF ainda é incipiente, sendo o mercado dominado pelos Estados Unidos, Alemanha e França. No Brasil, a Resolução CNPE nº 64/2024 estabelece a proporção mínima de óleos e gorduras residuais em relação às matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel, SAF e diesel verde. Resultados promissores foram obtidos pela Refinaria Henrique Lage (Revap) da Petrobras, que realizou testes para a produção de SAF a partir do coprocessamento de óleo vegetal com petróleo, prevendo-se que a partir de 2027 as companhias aéreas no Brasil deverão começar a usar combustíveis sustentáveis, de acordo com programa da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI).

A biomassa lignocelulósica, especialmente resíduos florestais como os de Pinus e Eucalipto, destaca-se como uma matéria-prima abundante e de baixo custo. No Rio Grande do Sul, o cultivo de Pinus e Eucalipto tem importância econômica consolidada, gerando



significativos volumes de resíduos que podem ser aproveitados energeticamente. A conversão termoquímica desses resíduos por pirólise gera três produtos principais: biochar, gases não condensáveis e bio-óleo. Estudos têm demonstrado que a pirólise de biomassas como Pinus e Eucalipto é eficiente na geração de frações de grande interesse industrial, incluindo bio-óleo como substituto de óleo combustível, aditivo para diesel e fonte de insumos químicos, além de biochar como precursor de adsorvente industrial e combustível sólido limpo.

No entanto, o bio-óleo obtido por pirólise convencional, embora composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos oxigenados, apresenta propriedades energéticas inferiores às do petróleo, como alto teor de água (15–30%), alta acidez (pH ~2,5), baixo poder calorífico (cerca de 17 MJ/kg) e alta viscosidade, o que limita seu uso direto como combustível. Para superar essas limitações, a copirólise da biomassa com resíduos plásticos, como o Polietileno de Baixa Densidade (PEBD), tem se mostrado uma estratégia eficaz. O plástico atua como doador de hidrogênio, promovendo a desoxigenação do bio-óleo e aumentando o teor de hidrocarbonetos, elevando seu poder calorífico. Estudos reportam redução de cerca de 65% na proporção de compostos oxigenados para biomassas com polietileno e polipropileno, e redução de cerca de 95% para biomassas com poliestireno.

Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma rota tecnológica para a produção de combustíveis sustentáveis de aviação drop-in (SAF) a partir do bio-óleo resultante da copirólise de blendas de biomassa de Pinus e PEBD. Para tanto, busca-se produzir e caracterizar as blendas formuladas com biomassa e PEBD, bem como o bio-óleo obtido a partir da copirólise, avaliando suas propriedades de interesse para o uso em formulações para produção de SAF. Adicionalmente, propõe-se o processamento do bio-óleo por técnicas de destilação para a obtenção de frações com potencial para formulação de combustíveis de aviação, as quais serão caracterizadas por técnicas como FTIR e CG-MS para identificação de sua composição química e potencial energético. A implementação desta tecnologia agrega valor a resíduos que muitas vezes representam um passivo ambiental com pouco ou nenhum valor comercial, sendo a obtenção de bio-óleo uma possibilidade promissora. O possível esgotamento das fontes que constituem a matriz energética atual fortalece a ideia de reciclagem e aproveitamento de resíduos, o que minimizaria o contingente de passivos ambientais que exigem soluções e regulamentação para descarte. A soma de esforços e conhecimentos das indústrias da aviação, combustíveis e instituições de pesquisa resultará em um processo com viabilidade econômica e ambiental.



Material e Métodos

Foram utilizados resíduos de madeira de *Pinus* spp., provenientes de indústria madeireira, e Polietileno de Baixa Densidade (PEBD). A biomassa foi triturada em moinho de facas, peneirada em malhas de 5 e 10 mm e seca em estufa a 105 °C por 24 h. O PEBD foi moído e peneirado para homogeneização. Ambos os materiais foram caracterizados por análises imediata e elementar. A umidade, o teor de cinzas e o teor de materiais voláteis foram determinados conforme normas CEN/TS, enquanto o carbono fixo foi obtido por balanço de massa. A composição elementar (CHN) foi determinada em analisador PerkinElmer 2400 Series II, sendo o oxigênio calculado por diferença. O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) foram calculados pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$\text{PCS} = 0,3491\text{C} + 1,1783\text{H} + 0,1005\text{S} - 0,1034\text{O} - 0,0151\text{N} - 0,0211\text{CZ} \quad (1)$$

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2,5\text{W} - 22,5\text{H} \quad (2)$$

Os experimentos de pirólise e copirólise foram realizados inicialmente em reator de leito fixo vertical em escala de bancada para definição das condições operacionais e, posteriormente, em reator do tipo Auger em escala protótipo, com capacidade de 10 kg h⁻¹ e alimentação de aproximadamente 3 kg h⁻¹. Os ensaios foram conduzidos a 550 °C, com taxa de aquecimento de 15 °C min⁻¹, sob atmosfera de N₂. Os vapores foram condensados em sistemas refrigerados, obtendo-se o bio-óleo, posteriormente separado em fração aquosa (FA) e fração oleosa (FO) por centrifugação ou funil de separação. Os rendimentos de biochar, bio-óleo e gases foram determinados por balanço de massa.

A FO foi submetida à destilação simples, fracionada e a pressão reduzida, conforme as normas ASTM D86 e ASTM D1160, visando à obtenção de frações com potencial para formulação de combustíveis de aviação. As frações foram armazenadas sob refrigeração para caracterização.

A caracterização da FO compreendeu determinação da densidade e grau API, viscosidade cinemática, índice de acidez, teor de água, poder calorífico, composição elementar, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS). Todos os ensaios foram realizados em triplicata, sendo os resultados expressos como média ± desvio padrão.



Resultados e Discussão

A biomassa de Pinus apresentou características favoráveis à produção de bio-óleo por pirólise: umidade de 10,37%, baixo teor de cinzas (0,39%) e elevado teor de voláteis (71,66% em base seca). O baixo teor de cinzas minimiza incrustações e corrosão, enquanto o alto teor de voláteis favorece a formação de líquidos. A análise elementar indicou 50,37% C, 7,43% H, 0,22% N e 41,54% O, com PCS e PCI de 22,03 e 20,32 MJ/kg, respectivamente. O PEBD apresentou 72,6% C, 12,8% H, 0,14% N e 14,5% O, com PCS de 39,90 MJ/kg e PCI de 37,04 MJ/kg. Sua incorporação (5%) favoreceu a desoxigenação do bio-óleo por efeito doador de hidrogênio, elevando o teor de carbono e reduzindo compostos oxigenados.

Os bio-óleos de pirólise e copirólise apresentaram densidades de 1,0753 e 1,2994 g/cm³, com graus API < 15, indicando materiais pesados. As densidades superiores às de bio-óleos de eucalipto sugerem maior concentração de aromáticos derivados da lignina. A viscosidade cinemática da fração orgânica foi de 142,5 e 168 mm²/s a 25 °C para pirólise e copirólise, reduzindo para 51,2 e 61,2 mm²/s a 40 °C (Tabela 1). Embora a temperatura melhore a fluidez, os valores permanecem acima dos combustíveis convencionais, exigindo upgrading

Tabela 1. Resultado das viscosidades cinemáticas das fases oleosas do bio-óleo de pirólise e co-pirólise em diferentes faixas de temperatura.

Amostra	Temperatura (°C)	Viscosidade Cinemática (mm ² s ⁻¹)
FO - bio-óleo pirólise	25 °C	142,5
FO - bio-óleo co-pirólise	25 °C	168
FO - bio-óleo pirólise	40 °C	51,2
FO - bio-óleo co-pirólise	40 °C	61,2

O índice de acidez foi de $54,8 \pm 3,3$ mg KOH/g (pirólise) e $55,5 \pm 1,5$ mg KOH/g (copirólise), muito superiores ao de petróleo (<1 mg KOH/g), evidenciando a necessidade de upgrading para reduzir corrosividade e aumentar estabilidade.

O teor de água foi de $16,47 \pm 0,76\%$ (pirólise) e $11,08 \pm 0,62\%$ (copirólise) – Tabela 2. A redução com PEBD confirma o efeito desoxigenante, aproximando as propriedades às de combustíveis de hidrocarbonetos.

Tabela 2. Resultado do teor de água das fases oleosas do bio-óleo de pirólise e co-pirólise à temperatura ambiente.

Amostra	Teor de água (%)
FO - bio-óleo pirólise	$16,47 \pm 0,76\%$
FO - bio-óleo co-pirólise	$11,08 \pm 0,62\%$



O poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) determinados para as FO dos bio-óleos de pirólise e co-pirólise foram de 25,73 MJ/kg e 25,85 MJ/kg, e 25,73 MJ/kg e 25,46 MJ/kg, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Determinação do poder calorífico superior e inferior das frações oleosas de bio-óleo de pirólise e co-pirólise.

Amostra	Determinação	Resultado (MJ/kg)
FO - bio-óleo pirólise	PCS	25,73
FO - bio-óleo co-pirólise	PCS	25,73
FO - bio-óleo pirólise	PCI	25,85
FO - bio-óleo co-pirólise	PCI	25,46

Estes valores são superiores aos reportados para FO de bio-óleos obtidos por pirólise convencional (cerca de 17 MJ/kg), porém ainda inferiores aos de combustíveis fósseis e biodiesel (cerca de 42 MJ/kg). Esses resultados indicam que, embora a qualidade energética dos bio-óleos obtidos seja superior à de bio-óleos convencionais, ainda são necessários aprimoramentos no processo para elevar suas propriedades energéticas e ampliar seu potencial de aplicação como combustível.

A análise elementar das FOs dos bio-óleos (Tabela 4) de pirólise e co-pirólise mostrou teores de carbono de $60,08 \pm 1,75\%$ e $62,28 \pm 3,13\%$, hidrogênio de $6,13 \pm 0,38\%$ e $6,52 \pm 0,30\%$, oxigênio, determinado por diferença, de $33,37 \pm 2,07\%$ e $30,61 \pm 3,15\%$ e nitrogênio de $0,41 \pm 0,08\%$ e $0,59 \pm 0,08\%$, respectivamente. Os teores de oxigênio são consideráveis para um produto a ser empregado na produção de combustíveis, reforçando a necessidade de desoxigenação.

Tabela 4. Valores obtidos na análise elementar para bio-óleos de pirólise e co-pirólise.

Teor Calculado	Pirólise - % (m/m)	Co-pirólise - % (m/m)
C	$60,08 \pm 1,75$	$62,28 \pm 3,13$
H	$6,13 \pm 0,38$	$6,52 \pm 0,30$
O*	$33,37 \pm 2,07$	$30,61 \pm 3,15$
N	$0,41 \pm 0,08$	$0,59 \pm 0,08$
* Por diferença		

Processamento e Caracterização das Frações Destiladas

A destilação fracionada da FO de pirólise recuperou 49,3% do volume inicial, com frações iniciais (1 a 6) abaixo de 100 °C, sugerindo água e ácidos orgânicos. Para a copirólise,

a recuperação foi de 54,7%. Destilações a pressão reduzida (40-54 mbar) alcançaram temperaturas equivalentes a até 355 °C, mas com menor recuperação (28,6%), indicando compostos de alta massa molar no resíduo.

Tabela 5. Dados de destilação de bio-óleo de pirólise e co-pirólise de pinus 550 °C; temperatura inicial de recolha das frações e percentagens volumétricas.

Fração	Pirólise - Temp. Inicial (°C)	Pirólise - Porcentagem Volumétrica (%)	Co-pirólise - Temp. Inicial (°C)	Co-pirólise - Porcentagem Volumétrica (%)
1	63,6	6,6	72,9	4
2	90,2	5,1	94	23,2
3	93,3	13,8	94,5	8,2
4	90,5	3,4	96,2	1,5
5	96,7	5,4	129	6,2
6	97,9	5,4	181	6
7	161,2	5,3	198,5	3,2
8	134,8	4,3	217	2,4
Volume Total (%)	-	49,3	-	54,7
Volume Residual (%)	-	50,7	-	45,3

A análise por CG-MS da FO do bio-óleo de pirólise revelou a presença majoritária de compostos oxigenados (82,7%), com destaque para fenóis (54,1%), cetonas (10,8%) e benzofuranos (5,4%) (Tabela 6). Os compostos não oxigenados corresponderam a apenas 10,8%, sendo predominantemente aromáticos monocíclicos. Esta composição é característica de bio-óleos derivados de biomassas lignocelulósicas e está relacionada à degradação da lignina, que produz fenóis e seus derivados, e da celulose/hemicelulose, que geram cetonas, aldeídos e furanos. O elevado teor de fenóis é particularmente interessante, pois estes compostos podem ser quimicamente modificados por esterificação para a produção de ésteres fenólicos, com potencial para melhorar as propriedades do bio-óleo como combustível.

Tabela 6. Agrupamento em níveis, de acordo com aromaticidade, presença ou não de oxigênio e dados percentuais para o óleo obtido por pirólise.

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Percentual
Oxigenado	Aromático	Fenol	54,10%
Oxigenado	Aromático	Benzofurano	5,40%
Oxigenado	Aromático	Aldeído	8,10%



Oxigenado	Aromático	Éter	2,70%
Oxigenado	Não aromático	Cetona	10,80%
Oxigenado	Não aromático	Aldeído	2,70%
Oxigenado	Não aromático	Carboidrato	5,40%
Não oxigenado	Aromático	Aromático monocíclico	8,10%
Não oxigenado	Aromático	Aromático policíclico (PAH)	2,70%

A análise por CG-MS das frações destiladas (Tabela 7) mostrou uma variação significativa na composição ao longo do processo de destilação. As frações mais leves (1 e 2) apresentaram maior proporção de compostos não oxigenados (até 93,8%), enquanto as frações mais pesadas (5 a 8) eram quase exclusivamente compostas por aromáticos oxigenados, principalmente fenóis. Esta tendência indica que a destilação é eficaz na separação de compostos de diferentes polaridades e massas molares, sendo uma ferramenta valiosa para o enriquecimento de frações com maior potencial energético.

Tabela 7. Frações percentuais das espécies químicas constituintes das frações obtidas na destilação fracionada do (bio-)óleo de pirólise.

Frações	Oxigenados - Aromáticos (%)	Oxigenados - Não Aromáticos (%)	Não Oxigenados - Aromáticos (%)	Não Oxigenados - Não Aromáticos (%)
1	6,3	-	9380,00%	-
2	29,4	4	6220,00%	4,5
3	50	50	-	-
4	57,9	8,7	3330,00%	-
5	70,7	17,1	1230,00%	-
6	79,3	10,4	1020,00%	-
7	88,9	11,1	-	-
8	80	20	-	-

A análise por FTIR corroborou os resultados, evidenciando bandas de hidroxila (3300 cm^{-1}), C-H (2900 cm^{-1}), carbonila (1710 cm^{-1}) e C=C aromática (1600 cm^{-1}) em todas as frações. Bandas C-O (1250 e 1050 cm^{-1}) foram mais intensas nas frações pesadas, indicando maior concentração de fenóis.

A copirólise de Pinus com 5% de PEBD é promissora para produzir bio-óleo com propriedades aprimoradas, reduzindo água e elevando carbono. A destilação permitiu obter frações enriquecidas em hidrocarbonetos e menos oxigenadas, com frações pesadas ricas em fenóis, com potencial para upgrading (ex.: esterificação). A rota contribui para a valorização de resíduos lignocelulósicos e plásticos, alinhando-se à economia circular e à produção de combustíveis sustentáveis de aviação.



Conclusões

O presente trabalho demonstrou o potencial da copirólise de biomassa de *Pinus* com Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) para a produção de bio-óleo com características favoráveis à obtenção de combustíveis sustentáveis de aviação (SAF). Os resultados permitiram atingir os objetivos propostos, evidenciando que a adição de 5% de PEBD promoveu redução do teor de água e aumento do teor de carbono do bio-óleo, confirmando o efeito desoxigenante do plástico durante o processo termoquímico.

O processamento da fração oleosa por destilação permitiu a obtenção de frações enriquecidas em hidrocarbonetos e compostos menos oxigenados, enquanto as frações mais pesadas permaneceram predominantemente fenólicas. A destilação a pressão reduzida possibilitou a obtenção de frações de maior faixa de ebulição, ampliando o potencial de aproveitamento do bio-óleo.

A caracterização por CG-MS confirmou a predominância de compostos oxigenados, principalmente fenóis, cetonas e benzofuranos, evidenciando a necessidade de etapas complementares de upgrading para adequação às especificações de combustíveis aeronáuticos. Ainda assim, a rota proposta mostrou-se tecnicamente promissora para a valorização simultânea de resíduos lignocelulósicos e plásticos, contribuindo para os princípios da economia circular e para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Como perspectivas futuras, propõem-se a modificação química das frações fenólicas por esterificação, a formulação de misturas com querosene de aviação e a caracterização do produto obtido conforme normas internacionais, visando à produção de um combustível sustentável de aviação do tipo drop-in.

Agradecimentos

Os autores agradecem primeiramente a Cristo, aos seus pais pelo incentivo e apoio constantes e à FAPERGS (RITES 22/2551-0000393-1) e ao CNPq (BIOQAv 405798/2022-9) pelo apoio técnico e financeiro.

Referências

LEE, D. S. et al. The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, v. 244, p. 117834, 2021.

FAPESP. O desafio do setor aéreo para anular sua pegada de carbono. *Revista Pesquisa FAPESP*, 2024. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-setor-aereo-para-anular-sua-pegada-de-carbono/>. Acesso em: 26 maio 2026.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Resolução nº 64, de 10 de dezembro de 2024. Brasília, DF, 2024.



BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68–94, 2012. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.01.048>.

DYER, A. C.; NAHIL, M. A.; WILLIAMS, P. T. Catalytic co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a route to upgraded bio-oil. *Journal of the Energy Institute*, v. 97, p. 27–36, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.JOEL.2021.03.022>.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN/TS 14774-2: Solid biofuels - Determination of moisture content. Brussels: CEN, 2009.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN/TS 14775: Solid biofuels - Determination of ash content. Brussels: CEN, 2009.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. CEN/TS 15148: Solid biofuels - Determination of the content of volatile matter. Brussels: CEN, 2009.

DE PELETEIRO, D.; FERREIRA, L.; ANDRADE, C. H.; SANTA ROSA, L. P.; SILVA, L. D. Transformando biomassa em energia: oportunidades sustentáveis para o Brasil. <https://doi.org/10.37885/241218541>.

CNPEM. LNBR | BioValue – Caracterização de biomassas florestais. 2025. Disponível em: <https://lnbr.cnpem.br/biovalue/ferramentas/caracterizacao-biomassas-florestais/>. Acesso em: 26 maio 2026.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D86: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Atmospheric Pressure. West Conshohocken: ASTM, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1160: Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure. West Conshohocken: ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D5355: Standard Test Method for Specific Gravity by Pycnometer. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1200: Standard Test Method for Viscosity by Ford Viscosity Cup. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D974: Standard Test Method for Acid and Base Number by Color-Indicator Titration. West Conshohocken: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E203: Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration. West Conshohocken: ASTM, 2016.

VILAS BOAS, M. A. et al. Characterization and energetic potential of Pinus wood residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 170, p. 105–115, 2025.

SEAH, C. H. et al. Co-pyrolysis of biomass and waste plastics for liquid fuel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 175, p. 113–125, 2023.

FARAH, M. A. *Petróleo e seus derivados*. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Boletim da Qualidade do Petróleo*. Brasília: ANP, 2023.

ZHANG, Q. et al. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading techniques. *Energy Conversion and Management*, v. 48, n. 1, p. 87–92, 2007.

HARRIES, R. et al. Distillation characteristics of fast pyrolysis bio-oils for fuel applications. *Fuel Processing Technology*, v. 160, p. 45–53, 2017.

PASANGULAPATI, V. et al. Effects of process parameters on product yields and characterization of bio-oil. *Bioresource Technology*, v. 112, p. 280–288, 2012.

BAKSHI, S. et al. Upgrading of phenolic compounds in bio-oil via esterification. *Energy & Fuels*, v. 36, n. 4, p. 2100–2110, 2022.