



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2025) v. 12, n. 3, p. 174–180
<https://doi.org/10.21712/lajer.2025.v12.n3.p174-180>

1º Encontro Interdisciplinar em Energia, Programa de Pós-graduação em Energia, Ufes



Condensação fracionada de vapores de pirólise: Fundamentos, equipamentos e potencial na valorização do bio-óleo

Fractional condensation of pyrolysis vapors: Fundamentals, equipment and potential for bio-oil valorization

Daniela Luz Leite¹, Thiago Padovani Xavier² e Taisa Shimosakai de Lira^{2,*}

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

² Professor do Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo – Ufes, campus São Mateus, ES, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: taisa.lira@ufes.br

Resumo: A pirólise rápida é uma tecnologia estabelecida e eficiente na conversão da biomassa em produtos líquidos, mas o bio-óleo resultante é uma mistura complexa e reativa, o que requer etapas adicionais de melhoria para viabilizar seu uso. O desenvolvimento de uma técnica eficaz é crucial para extrair produtos químicos valiosos. A condensação fracionada (CF) é um método de separação *online* promissor, que atua diretamente sobre vapores quentes da pirólise, reduzindo o consumo energético. Esta pesquisa realiza uma revisão da CF, avaliando seus parâmetros e equipamentos. O processo consiste em uma série de condensadores com temperaturas decrescentes, que permitem a separação dos componentes com base em seus pontos de orvalho. O controle da temperatura é o parâmetro mais importante, ditando a seletividade e a composição das frações obtidas. Os resultados demonstram que a CF é eficaz na obtenção de frações mais estáveis e utilizáveis. Foi possível identificar frações orgânicas com teor de água significativamente reduzido e alto poder calorífico, além da remoção de ácidos carboxílicos nos estágios de baixa temperatura, melhorando a estabilidade e mitigando a corrosão. Frações ricas em fenóis também podem ser obtidas, reforçando o potencial da pirólise como uma plataforma de biorrefinaria. Contudo, desafios persistem, como a necessidade de controle preciso da temperatura e o impacto dos gases não condensáveis (NCGs). Pesquisas futuras devem focar na otimização do controle da composição, na modelagem dos efeitos dos NCGs e na extração máxima de produtos químicos valiosos em escala industrial. Esses avanços podem consolidar a CF como uma etapa-chave para o aproveitamento eficiente e sustentável do bio-óleo em aplicações energéticas e químicas.

Palavras-chave: separação *online*; biomassa; decomposição térmica; temperatura de condensação; maquinários.

Abstract: Fast pyrolysis is an established and efficient technology for converting biomass into liquid products, but the resulting bio-oil is a complex and reactive mixture, requiring additional refinement steps to make its use viable. Developing an effective technique is crucial for extracting valuable chemicals. Fractional condensation (FC) is a promising online separation method that acts directly on hot pyrolysis vapors, reducing energy consumption. This research reviews FC, evaluating its parameters and equipment. The process consists of a series of condensers with decreasing temperatures, which allow the separation of components based on their dew points. Temperature control is the most important parameter, dictating the selectivity and composition of the obtained fractions. The results demonstrate that FC is effective in obtaining more stable and usable fractions. It was possible to identify organic fractions with significantly reduced water content and high calorific value, in addition to the removal of carboxylic acids in the low-

temperature stages, improving stability and mitigating corrosion. Phenol-rich fractions can also be obtained, reinforcing the potential of pyrolysis as a biorefinery platform. However, challenges remain, such as the need for precise temperature control and the impact of non-condensable gases (NCGs). Future research should focus on optimizing composition control, modeling the effects of NCGs, and maximizing the extraction of valuable chemicals on an industrial scale. These advances could solidify CF as a key step toward the efficient and sustainable use of bio-oil in energy and chemical applications.

Keywords: *online separation; biomass; thermal decomposition; condensation temperature; machinery.*

1 Introdução

A crescente demanda global por energia, produtos químicos e materiais, aliada aos desafios inerentes ao uso de recursos fósseis, reforça a importância do uso de recursos sustentáveis. Nesse contexto, os líquidos derivados de biomassa oferecem uma oportunidade promissora para diversificar o fornecimento de combustíveis e produtos químicos. A biomassa é amplamente considerada uma fonte de energia renovável, abundante e potencialmente neutra em carbono, o que a torna uma rota viável para a descarbonização do setor de transporte e para o alcance das metas de redução de gases de efeito estufa. Entre as diversas opções de conversão, a pirólise rápida é uma tecnologia termoquímica bem estabelecida e amplamente reconhecida por sua eficiência na conversão da biomassa em líquidos combustíveis (Li et al., 2020; Mati et al., 2022; Singh-Morgan et al., 2022).

O processo consiste em aquecer rapidamente a biomassa na ausência de oxigênio, sendo atualmente uma via de conversão tecnológica promissora para a produção sustentável de combustíveis alternativos. O principal produto deste processo, o bio-óleo, pode ser refinado em biocombustíveis de hidrocarbonetos ou produtos químicos renováveis. No entanto, a utilidade desse produto é limitada pela sua natureza altamente complexa, consistindo em uma mistura de centenas de compostos com uma ampla variação de pesos moleculares. A instabilidade e a reatividade das moléculas, como ácidos, aldeídos, olefinas e fenóis, levam a reações de polimerização e condensação, mesmo em temperaturas moderadas. Portanto, o bio-óleo não é adequado para uso direto como combustível em sistemas existentes e requer etapas adicionais de melhoria, com o objetivo de modificar suas características e adequá-lo às exigências do uso final (Siriwardhana, 2020; Xu et al., 2021; Wang et al., 2021; Raymundo et al., 2022).

Os métodos tradicionais de separação têm tido pouco sucesso devido à instabilidade e à reatividade dos compostos. Diante disso, o desenvolvimento de um método de separação eficaz é crucial, tanto para melhorar a qualidade do bio-óleo quanto para extrair produtos químicos valiosos. Uma alternativa promissora é a condensação fracionada, uma técnica de separação *online* que atua sobre os vapores quentes da pirólise, minimizando a demanda de energia térmica. O processo envolve direcionar o fluxo de vapor através de uma série de condensadores operando em temperaturas progressivamente mais baixas. Esta pesquisa concentra-se na revisão de literatura sobre a condensação fracionada (CF) aplicada aos vapores de pirólise, avaliando o efeito dos parâmetros nas frações e os equipamentos comumente adotados (Wang et al., 2021; Xu et al., 2022; Mufrodi et al., 2025; Vilas-Boas et al., 2025). Assim, entender os princípios, limitações e progressos recentes na utilização da condensação fracionada é fundamental para expandir seu uso na indústria e melhorar a viabilidade do bio-óleo como recurso energético e químico.

2 Fundamentos teóricos, parâmetros e efeitos nas frações

A temperatura de pirólise, ou temperatura de reação, influencia diretamente a distribuição dos produtos e a composição dos vapores que são posteriormente submetidos à condensação fracionada. Em alguns estudos, no entanto, foi observado que o efeito da variação da temperatura de pirólise sobre o rendimento de constituintes químicos específicos no bio-óleo ou em sua distribuição nas frações era, em geral, limitado. Isso sugere que a manipulação primária da composição das frações deve ser realizada por meio do controle das temperaturas dos estágios de condensação (Koo e Kim, 2014; Johansson et al., 2017; Raymundo et al., 2022).

A CF, ou condensação em estágios, é uma tecnologia de separação dos vapores de pirólise, atuando diretamente sobre o fluxo de vapor quente antes que este seja totalmente liquefeito. O processo é análogo à destilação e tem como objetivo separar os componentes complexos do bio-óleo em frações mais estáveis e utilizáveis. Baseia-se nos pontos de orvalho dos compostos que formam o bio-óleo, os quais estão intimamente relacionados aos seus pontos de ebulição. O gás de pirólise que deixa o reator é conduzido através de uma série de condensadores, cada um mantido em uma temperatura diferente e progressivamente

mais baixa. Essa diferenciação de temperatura permite a condensação e coleta de compostos com base em suas volatilidades (Xu et al., 2021; Mati et al., 2022; Mufrodi et al., 2025; Vilas-Boas et al., 2025).

A temperatura de condensação é um dos parâmetros mais relevantes e amplamente investigados nessa abordagem, sendo o principal fator determinante da separação e a composição das frações de bio-óleo obtidas. O ajuste das temperaturas operacionais dos estágios de condensação permite influenciar diretamente a seletividade da separação, ao alinhar-se com as faixas estimadas de ponto de orvalho de compostos ou classes específicas de compostos. É essencial destacar que a temperatura de condensação de um composto não depende apenas do seu ponto de ebulição puro, mas também da sua pressão parcial, a qual é afetada pelo rendimento do composto e pelas taxas de fluxo do gás carreador e do gás de pirólise produzido. A presença de gases não condensáveis (NCGs) pode diluir os vapores orgânicos, fazendo com que a temperatura de condensação da água e de outros compostos seja significativamente inferior aos seus respectivos pontos de ebulição. Em um estudo, a temperatura em que a água condensa foi deslocada de 100 °C para próximo de 35 °C devido à diluição do vapor d'água pelos NCGs (Raymundo et al., 2022; Sui et al., 2024).

A manipulação da temperatura (Figura 1) permite o enriquecimento seletivo de frações com propriedades e composições químicas desejadas, resultando em bio-óleos mais estáveis e com maior valor energético ou químico. A CF realizada acima de 100 °C pode resultar em frações com teor de água não detectável ou muito baixo, contendo principalmente compostos de alto peso molecular, oligômeros de lignina, açúcares e benzeno. O poder calorífico aumenta com a temperatura de condensação, enquanto a acidez é significativamente reduzida, resultando em frações orgânicas ricas em carbono. A faixa de 50 a 100 °C é considerada benéfica para a condensação de ácidos carboxílicos, álcoois e água, além de fenóis, ciclopentenonas, metoxifenóis e furfurais. Uma coleta realizada a 70 °C obteve baixo teor de água e acidez, mas a maioria dos ácidos carboxílicos permaneceu no estado de vapor. Em temperaturas abaixo de 50 °C, são condensados compostos leves e voláteis. As frações coletadas são predominantemente aquosas, enriquecidas com ácidos, álcoois, aldeídos e cetonas. O teor de água muitas vezes excede 50%, podendo chegar a 90,3% (Peterson et al., 2019; Liaw et al., 2020; Xu et al., 2021; Vilas-Boas et al., 2025). No estudo de Mati et al. (2022), mais de 90% do ácido acético produzido foi recuperado no resfriador intensivo a cerca de -10°C, o que demonstra a remoção eficiente destes compostos na fração orgânica.

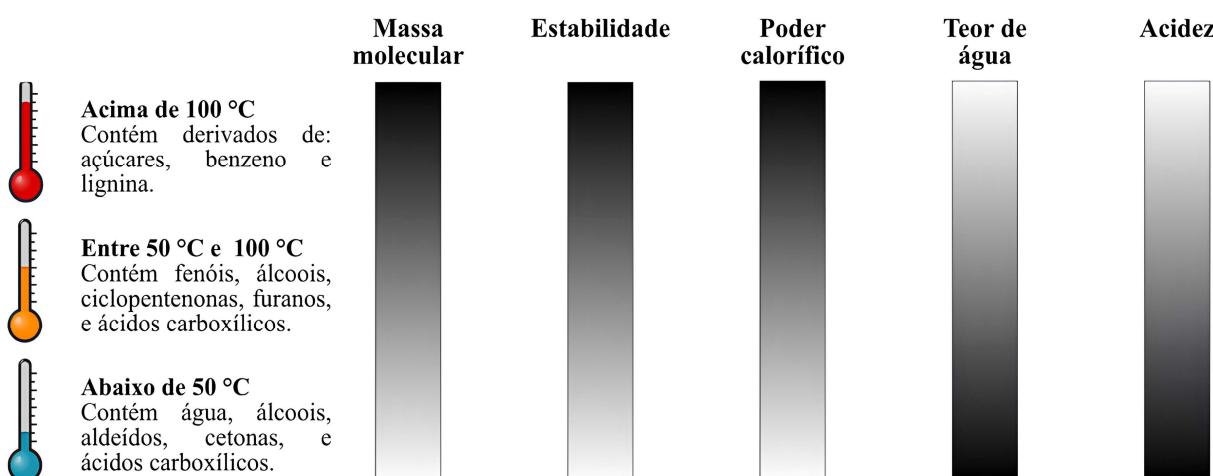


Figura 1. Efeito da manipulação da temperatura nas frações de bio-óleo obtidas por CF.

Valores acima de 100 °C são considerados desfavoráveis, pois resultam em bio-óleo semissólido, de difícil refino, e devem ser evitados para minimizar perdas de energia e material. O gradiente de temperatura deve decrescer gradualmente para garantir a CF contínua; por exemplo, diferenças de 20 °C entre condensadores foram suficientes para atender ao requisito de um gradiente de condensação eficiente (Wang et al., 2021).

Esses fundamentos reforçam a importância do controle térmico na CF, não apenas como estratégia de separação, mas também para ajustar suas propriedades e tornar as frações mais úteis para diferentes aplicações.

3 Equipamentos utilizados após a pirólise

A instrumentação utilizada após a pirólise (Tabela 1) geralmente é organizada em uma série de unidades, começando pela remoção de sólidos e prosseguindo com múltiplos estágios de resfriamento e coleta.

Tabela 1. Equipamentos utilizados após a pirólise.

| Categoria do processo | Equipamento | Função e detalhes específicos |
|------------------------------------|--|--|
| Remoção de sólidos | Ciclones | Usados para a separação inicial do biocarvão (char) e outros particulados arrastados do fluxo de gás. Muitos sistemas utilizam dois ciclones em série (Koo et al., 2014; Peterson et al., 2019). |
| | Filtros de gás quente | Essenciais para capturar finos e metais alcalinos (Singh-Morgan et al., 2022). Estes podem incluir filtros cerâmicos projetados para capturar partículas maiores que 2 μm (Koo et al., 2014). |
| | Vaso/pote de coleta | Usado para a separação do biocarvão (Sui et al., 2024) ou para coletar o líquido a granel através da separação gravitacional, podendo ser resfriado por água (Singh-Morgan et al., 2022). |
| | Condensadores indiretos | São os mais comuns e utilizam um fluido de resfriamento externo, consistindo em vários trocadores de calor ou tubos de vidro segmentados colocados em sequência (Wang et al., 2021). |
| | Condensadores diretos | Utilizam a injeção de um líquido em contato direto com o vapor, promovendo troca simultânea de calor e massa, o que pode aumentar a eficácia da condensação (Mati et al., 2022). |
| | Precipitador eletrostático | Crucial na captura de gotículas suspensas de bio-óleo que não são eficientemente condensadas por resfriamento simples (Ille et al., 2018). Pode ser colocado a jusante dos condensadores ou pode ser controlado termicamente e usado como um estágio de coleta dentro da série de separação (Peterson et al., 2019). |
| Múltiplos estágios de resfriamento | Separador de impacto | Geralmente consiste em um tubo jaquetado com um único eletrodo operando em alta voltagem (Mati et al., 2022). |
| | Resfriador intensivo | Projetado para capturar componentes lentos e de alto peso molecular, induzindo sua colisão com uma série de placas (Koo et al., 2014). |
| | Armadilhas frias | Estágio final de resfriamento, composto por um condensador tubo em tubo jaquetado a água (Mati et al., 2022). |
| | Filtros coalescentes ou filtros de lã de vidro/algodão | Operam em temperaturas muito baixas, como -10 °C e -15 °C, ou usando gelo seco/etanol para condensar os vapores leves remanescentes (Johansson et al., 2017; Peterson et al., 2019). |
| Após o resfriamento | Frascos/potes de coleta ou pontos de sangria | Capturaram gotículas que escaparam (Hossain et al., 2016). |
| Equipamentos auxiliares | Termopares | Usados para coletar as frações líquidas (Xu et al., 2021). |
| | Controladores de fluxo de massa e medidores de vazão | Usados para medição precisa de temperatura (Johansson et al., 2017). |
| | Sistemas de controle eletrônico | Dispositivos de controle e suporte essenciais para o funcionamento do sistema de CF (Wang et al., 2021). |
| | | Incluem resistências elétricas ou controladores PID, usados para manter a temperatura de cada estágio (Li et al., 2020). |

Antes que os vapores atinjam os condensadores de líquido, é essencial remover partículas sólidas, como carvão e cinzas, para evitar a contaminação do bio-óleo. O sistema de CF utiliza múltiplos estágios de coleta mantidos a temperaturas decrescentes. Nos condensadores indiretos, o controle de temperatura é frequentemente alcançado por meio de camisas de água, banhos com gelo, água ou etanol, ou meios de aquecimento como óleo de silicone e resistências elétricas. Já em condensadores diretos, o óleo de parafina, que apresenta baixa pressão de vapor e boa estabilidade térmica, pode ser usado como fluido de injeção.

Em estágios finais de condensação, armadilhas frias e resfriadores intensivos são aplicados na captura de vapores leves e voláteis remanescentes, assim como filtros que capturam gotículas que escaparam. Ao longo de todo o processo, equipamentos auxiliares, como sensores de temperatura e pressão, e sistemas de controle, podem estar presentes (Hossain et al., 2016; Ille et al., 2018; Liaw et al., 2020; Siriwardhana, 2020). A escolha e o arranjo adequado desses equipamentos são fundamentais para garantir a eficiência da condensação fracionada e a qualidade das frações obtidas.

4 Vantagens da condensação fracionada

O principal benefício da CF é permitir a separação seletiva de classes de compostos em frações distintas, superando os problemas de instabilidade, corrosividade e baixo teor energético do bio-óleo bruto, fatores essenciais para transformar a pirólise em uma plataforma de biorrefinaria. A técnica permite a coleta de frações orgânicas com teor de água significativamente reduzido, geralmente entre 3% e 7% em massa, especialmente nos primeiros estágios de condensação, que ocorrem em temperaturas elevadas, enquanto o bio-óleo bruto normalmente contém de 15% a 30% ou mais de água. As frações de bio-óleo com baixo teor de água têm maior poder calorífico e podem variar entre 22 MJ/kg e 31 MJ/kg, superando combustíveis líquidos convencionais como o biometanol e o bioetanol (Sui et al., 2024; Vilas-Boas et al., 2025).

Essa metodologia facilita a remoção de ácidos carboxílicos, como o ácido acético, nos estágios de baixa temperatura, nos quais predomina a fração aquosa. A redução de ácidos e carbonilas é crucial para promover um óleo desacidificado, característica importante na mitigação da corrosão em oleodutos e equipamentos, além de melhorar as propriedades de estabilidade durante o envelhecimento. Portanto, o método demonstrou-se eficaz na obtenção de um bio-óleo líquido em fase única, que permaneceu homogêneo após meses de armazenamento, além de possibilitar a formação de frações ricas em fenóis, compostos precursores valiosos para a indústria de resinas e polímeros (Johansson et al., 2017; Peterson et al., 2019; Siriwardhana, 2020).

A CF otimiza a integração do processo de pirólise com as etapas subsequentes de refino, proporcionando economia de energia e custo. Por atuar diretamente nos vapores quentes da pirólise, aproveita-se o calor residual do processo, minimizando a demanda de energia térmica em comparação com técnicas que operam no produto líquido final, como a destilação a vácuo ou flash, as quais enfrentam desafios técnicos. Por ser um processo contínuo e de baixa severidade térmica, a condensação fracionada demonstrou apresentar menor geração de resíduos em comparação com a destilação fracionada do óleo condensado, além de vantagens econômicas e ambientais destacadas em um estudo de avaliação do ciclo de vida (Xu et al., 2022; Mufrodi et al., 2025). Essas vantagens reforçam o papel estratégico da condensação fracionada na valorização do bio-óleo, contribuindo para o avanço de tecnologias limpas e sustentáveis no contexto da biorrefinaria.

5 Conclusões e perspectivas futuras

A condensação fracionada demonstrou ser uma alternativa promissora aos métodos tradicionais, atuando diretamente nos vapores quentes da pirólise, minimizando a demanda de energia em comparação com técnicas que operam no produto líquido final. O principal benefício reside na separação seletiva de compostos em frações distintas, superando os problemas de corrosão, instabilidade e baixo teor energético do bio-óleo bruto. As principais descobertas reafirmam a eficácia na melhoria da qualidade do bio-óleo, aumento da estabilidade, separação de frações de alto valor agregado e na otimização e integração das etapas de refino.

A instrumentação deve ser organizada em uma série de condensadores mantidos em temperaturas progressivamente decrescentes, garantindo a separação contínua e eficiente, com remoção prévia de partículas sólidas, a fim de evitar a contaminação das frações, bem como o uso de equipamentos auxiliares ao longo de todas as etapas. Os desafios mais comuns na adoção dessa tecnologia envolvem o controle preciso de temperatura, o efeito de gases não condensáveis (NCGs) e a reatividade dos compostos.

Para consolidar a condensação fracionada como uma tecnologia central na biorrefinaria, as pesquisas futuras devem focar em:

- a) Otimização do controle da composição: Explorar, ajustar e otimizar o controle das temperaturas dos estágios de condensação;
- b) Modelagem e predição: Aprofundar a compreensão dos efeitos dos NCGs sobre a pressão parcial e, consequentemente, sobre a temperatura de orvalho;
- c) Desenvolvimento de biorrefinarias: Focar na otimização da separação visando a extração eficiente de produtos químicos valiosos por meio da CF;
- d) Integração e economia: Investigar e validar, em escala industrial, os ganhos energéticos e econômicos proporcionados pela integração em série da CF com o processo de pirólise.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, à FAPES (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo) e ao Programa de Pós-Graduação em Energia/Universidade Federal do Espírito Santo em São Mateus/ES.

Referências bibliográficas

- Hossain, MM, Scott, IM, Berruti, F e Briens, C (2016) ‘Application of 1D and 2D MFR reactor technology for the isolation of insecticidal and anti-microbial properties from pyrolysis bio-oils’, *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 51, n. 12, p. 860–867. <https://doi.org/10.1080/03601234.2016.1211908>
- Ille, Y et al. (2018) ‘Activity of water in pyrolysis oil—Experiments and modelling’, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 135, p. 260–270. <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2018.08.027>
- Johansson, AC et al. (2017) ‘Fractional condensation of pyrolysis vapors produced from Nordic feedstocks in cyclone pyrolysis’, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 123, p. 244–254. <https://doi.org/10.1016/j.jaat.2016.11.020>
- Koo, WM, Jung, SH e Kim, JS (2014) ‘Production of bio-oil with low contents of copper and chlorine by fast pyrolysis of alkaline copper quaternary-treated wood in a fluidized bed reactor’, *Energy*, v. 68, p. 555–561. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.020>
- Li, N et al. (2020) ‘Pyrolysis of rice husk in a fluidized bed reactor: evaluate the characteristics of fractional bio-oil and particulate emission of carbonaceous aerosol (CA)’, *Journal of Renewable Materials*, v. 8, n. 3, p. 329–346. <https://doi.org/10.32604/jrm.2020.08618>
- Liaw, SS et al. (2020) ‘Biomethane production from pyrolytic aqueous phase: biomass acid washing and condensation temperature effect on the bio-oil and aqueous phase composition’, *BioEnergy Research*, v. 13, n. 3, p. 878–886. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10100-3>
- Mati, A et al. (2022) ‘Fractional condensation of fast pyrolysis bio-oil to improve biocrude quality towards alternative fuels production’, *Applied Sciences*, v. 12, n. 10, p. 4822. <https://doi.org/10.3390/app12104822>
- Mufrodi, Z et al. (2025) ‘Investigation and characterization of polypropylene plastic waste pyrolysis oil: Effect of temperature and fractional condensation’, *Journal of Ecological Engineering*, v. 26, n. 1. <https://doi.org/10.12911/22998993/195533>
- Peterson, B et al. (2019) ‘Catalytic hot-gas filtration with a supported heteropolyacid catalyst for preconditioning biomass pyrolysis vapors’, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 7, n. 17, p. 14941–14952. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b03188>
- Raymundo, LM et al. (2022) ‘Online separation of biomass fast-pyrolysis liquids via fractional condensation’, *Energy & Fuels*, v. 36, n. 21, p. 13094–13104. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c02624>
- Singh-Morgan, A, Puente-Urbina, A e Van Bokhoven, JA (2022) ‘Technology overview of fast pyrolysis of lignin: current state and potential for scale-up’, *ChemSusChem*, v. 15, n. 14, p. e202200343. <https://doi.org/10.1002/cssc.202200343>

- Siriwardhana, M (2020) ‘Fractional condensation of pyrolysis vapours as a promising approach to control bio-oil aging: Dry birch bark bio-oil’, *Renewable Energy*, v. 152, p. 1121–1128. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.095>
- Sui, H, Tian, C, Agblevor, FA e Li, J (2024) ‘Fractional condensation of sawdust pyrolysis vapors: Separation of complex components, enhancement of bio-oil properties, and life cycle assessment’, *Separation and Purification Technology*, v. 330, p. 125362. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125362>
- Vilas-Boas, ACM et al. (2025) ‘Improving bio-oil fractions through fractional condensation of pyrolysis vapors from Eucalyptus globulus biomass residues in a prototype auger reactor’, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, p. 107329. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107329>
- Wang, C, Yang, Y, Ma, Y e Zhu, X (2021) ‘Experimental study on the composition evolution and selective separation of biomass pyrolysis vapors in the four-staged indirect heat exchangers’, *Bioresource Technology*, v. 332, p. 125115. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125115>
- Xu, J, Brodu, N, Wang, J, Abdelouahed, L e Taouk, B (2021) ‘Chemical characteristics of bio-oil from beech wood pyrolysis separated by fractional condensation and water extraction’, *Journal of the Energy Institute*, v. 99, p. 186–197. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.09.006>
- Xu, J, Brodu, N, Devougue-Boyer, C, Youssef, B e Taouk, B (2022) ‘Biobased novolac resins cured with DGEBA using water-insoluble fraction of pyrolysis bio-oil: Synthesis and characterization’, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 138, p. 104464. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2022.104464>