

Impacto da Eletrificação em Sistemas Intensificados de Produção de Biodiesel

Willian Dimas Pompeo Siqueira^a, Diego Rafael Mágero Elihimas^a, Kenny Yusimy Garcia Angarita^a,
Caliane Bastos Borba Costa^a, Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani^a, Leandro Vitor Pavão^{a,*}

^a Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Maringá-PR,
Brasil

*lvpavao2@uem.br

RESUMO

A acentuação das mudanças climáticas reforça a necessidade de estratégias para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, especialmente no setor de transporte. O biodiesel surge como alternativa relevante, mas sua produção convencional demanda alto consumo energético, sobretudo nas etapas de separação. A integração de destilação reativa (*reactive distillation*, RD) com recompressão de vapor (*vapor recompression*, VR), formando a configuração denominada destilação reativa com bomba de calor (*heat pump reactive distillation*, HPRD), tem potencial para ganhos de eficiência e sustentabilidade. Portanto, este trabalho avalia o impacto da razão de *boil-up* sobre o desempenho ambiental e econômico da produção de biodiesel nessas configurações, simulando cenários com matriz elétrica renovável e fóssil. Resultados mostram que baixos valores de *boil-up* e uso de eletricidade limpa favorecem a redução de emissões e a viabilidade econômica, enquanto a precificação do carbono amplia a receita adicional obtida em cenários de descarbonização.

Palavras-chave: Bomba de Calor, Biodiesel, Eletrificação, Matriz Energética.

1. Introdução

As mudanças climáticas têm se intensificado nos últimos anos, o que ressalta a necessidade de estratégias eficazes para redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente em setores com elevada contribuição nas emissões globais. O setor de transporte, responsável por mais de 15% nas emissões de carbono antropogênicas, destaca-se nesse contexto, tornando sua descarbonização prioritária para o cumprimento das metas climáticas (Ferrer & Thomé, 2023). Dentre as alternativas tecnológicas disponíveis, os biocombustíveis constituem uma opção relevante para diminuir a intensidade de carbono dos combustíveis empregados.

Entre os biocombustíveis, o biodiesel tem apresentado expansão significativa nas últimas décadas, impulsionada por políticas de mistura obrigatória em diversos países. No Brasil, verifica-se um aumento contínuo da fração de biodiesel incorporada ao diesel fóssil, o que intensifica a demanda por processos produtivos mais eficientes e sustentáveis (Zheng & Cho, 2025). Contudo, a rota convencional de produção de biodiesel ainda apresenta elevado consumo energético, principalmente devido à necessidade de utilidades térmicas nas etapas de separação. No âmbito da Engenharia de Sistemas em Processos, a intensificação de processos tem sido amplamente investigada como estratégia para melhorar a eficiência energética de operações químicas. A destilação reativa (*reactive distillation*, RD) destaca-se por integrar as etapas de reação e separação em uma única unidade, promovendo a remoção contínua dos produtos formados e favorecendo o deslocamento do equilíbrio químico para a síntese de ésteres (Rodriguez-Robles et al., 2019). Recentemente, estratégias de eletrificação têm sido propostas com o objetivo de reduzir as emissões associadas ao consumo de utilidades térmicas. Entre essas alternativas, a recompressão de vapor (*vapor recompression*, VR) permite a reutilização do vapor do topo da coluna de destilação como fonte térmica no reator, reduzindo a dependência de vapor externo. A integração entre RD e VR resulta na configuração conhecida como destilação reativa com bomba de calor (*heat pump reactive distillation*, HPRD), na qual reação, separação e recuperação de energia ocorrem simultaneamente (Steffen et al., 2024).

Além das vantagens estruturais associadas à HPRD, estudos recentes que analisam a influência das variáveis de processo demonstraram que determinadas variáveis operacionais desempenham papel predominante na definição do desempenho econômico e ambiental de sistemas intensificados de produção de biodiesel. Em particular, análises de correlação baseadas em simulações indicaram que a razão de *boil-up* na coluna de destilação

reativa está entre as variáveis mais relevantes nas configurações HPRD, pois impacta diretamente a circulação de vapor dentro da coluna e o trabalho de compressão exigido pelo sistema de bomba de calor (Siqueira et al., 2025). Apesar desses avanços, ainda existe compreensão limitada sobre as faixas operacionais capazes de assegurar a viabilidade econômica e benefícios ambientais em processos intensificados eletrificados.

Portanto, este estudo investiga o impacto da razão de *boil-up* sobre o desempenho ambiental e econômico de processos de produção de biodiesel baseados em RD e HPRD. A análise abrange diferentes cenários de matriz energética, avaliando sua influência nas emissões de carbono. Adicionalmente, examina-se a variação da razão de *boil-up* em indicadores econômicos chave, como valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR). Os resultados visam identificar regiões operacionais que assegurem viabilidade econômica e ambiental, especialmente em comparação com o processo intensificado convencional (RD).

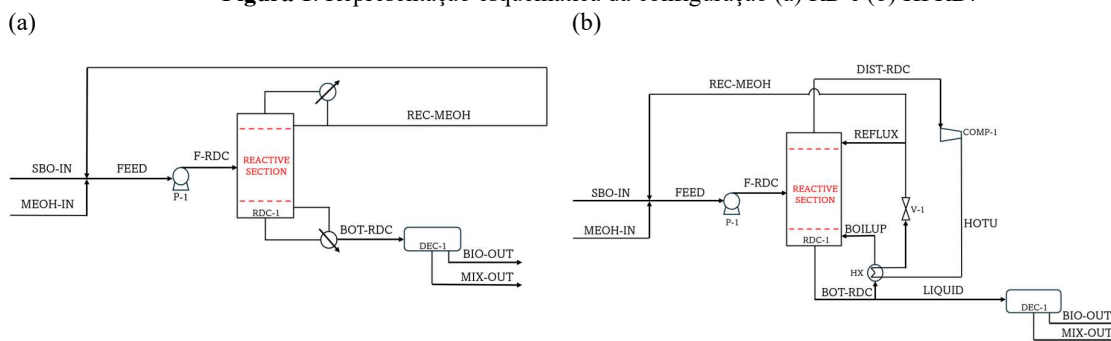
2. Metodologia

Neste trabalho, adotou-se como processo base a RD, reconhecida na literatura como uma estratégia de intensificação amplamente empregada na produção de biodiesel. Avaliações preliminares do processo RD indicam um coeficiente de desempenho (*coefficient of performance*, COP) próximo a 5. O COP é definido como a razão entre a energia térmica fornecida ao sistema e o trabalho requerido para sua operação, sendo uma variável amplamente utilizada na análise de sistemas de bomba de calor. Segundo critérios termodinâmicos, este valor aponta para a viabilidade da integração com VR. Assim, torna-se fundamental analisar os impactos econômicos e ambientais decorrentes da implementação de estratégia de eletrificação na configuração HPRD.

2.1. Modelagem dos processos

A Figura 1 apresenta os fluxogramas das configurações de RD e HPRD consideradas neste estudo. A modelagem dos processos RD e HPRD foi fundamentada em trabalho prévio (Siqueira & Pavão, 2025), adotando uma capacidade de produção de aproximadamente 6300 L/h de biodiesel. As simulações foram realizadas no software Aspen Plus, versão 15.0.

Figura 1. Representação esquemática da configuração (a) RD e (b) HPRD.



Para representar o comportamento termodinâmico do sistema, optou-se pelo modelo *Non-Random Two Liquids* (NRTL), selecionado devido à polaridade dos componentes e à melhor concordância com dados experimentais disponíveis na literatura (Sun et al., 2023). Em ambas as configurações, óleo de soja (representado por trioleína) e metanol são alimentados em uma coluna de destilação reativa (RDC-1) composta por 13 estágios teóricos, operando à pressão atmosférica. Nesse equipamento, ocorrem simultaneamente a reação de transesterificação, conforme o modelo cinético proposto por Pasupulety et al. (2013), e a separação do metanol a ser recirculado. Na configuração RD, a corrente de fundo da coluna (BOT-RDC) é direcionada a um decantador (DEC-1), onde ocorre a separação entre o biodiesel e a fase rica em glicerol e metanol não reagido. Na configuração HPRD, a coluna de destilação reativa é integrada a um sistema de VR, no qual o vapor do topo é comprimido até 10 atm e empregado como fonte térmica no refeedor, reduzindo a necessidade de utilidades quentes externas. Uma fração de vapor da corrente de fundo da coluna RD retorna à coluna como *boil-up*, enquanto a fase líquida é encaminhada ao decantador (DEC-1).

2.2. Desempenho Ambiental

A avaliação ambiental consistiu na estimativa das emissões de dióxido de carbono associadas à geração de utilidades energéticas do processo. Foram consideradas as emissões provenientes da combustão de gás natural para geração de vapor, utilizando a metodologia proposta por Gadalla et al. (2005), bem como as emissões indiretas relacionadas à matriz elétrica utilizada no sistema de VR. Dois cenários de geração de energia elétrica foram analisados: matriz renovável (MR) e matriz fóssil (MF). Os fatores de emissão adotados em cada cenário são expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores de emissão para cada cenário.

Cenário	Fator de emissão adotado (kg CO ₂ /GJ)	Referência
MR	8,34	Silva & Raadal (2019)
MF	120,06	Chiu & Yu (2024)

2.3. Desempenho Econômico

A viabilidade econômica dos processos foi avaliada por meio do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR), adotando uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 12%. As demais premissas econômicas adotadas no estudo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Premissas econômicas adotadas.

Variável	Valor adotado
Tempo de avaliação	25 anos
Tempo de construção	2 anos
Tempo de depreciação	2 anos
Taxa de depreciação	10%, linear
Impostos	34%

Os preços de matérias-primas, produtos e catalisador foram obtidos a partir de dados de mercado reportados (Siqueira & Pavão, 2025). Os custos dos equipamentos foram estimados utilizando correlações propostas por Douglas (1988), atualizados com o índice CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) para 2024 (793,1) e 2022 (802,9) (Chemical Engineering Online, 2024). O custo total de capital e operação foram calculados utilizando faixas percentuais típicas de investimento em plantas do tipo *greenfield* (Peters et al., 2002). Para representar diferenças regionais de investimento, foi aplicado um fator de localidade de 1,14 para o cenário MR, permitindo ajustar os custos de equipamento à realidade brasileira (Towler & Sinnott, 2022). Além disso, foram considerados diferentes preços de eletricidade para refletir contextos energéticos distintos. No cenário MF, foi adotado um preço de US\$16,90/GJ, representativo de mercados internacionais de energia (Turton et al., 2018), enquanto no cenário MR, foi utilizado um valor de US\$37,39/GJ, correspondente ao contexto brasileiro (Brasil, 2024).

A fim de avaliar o impacto de diferentes níveis de descarbonização na viabilidade econômica do processo, dois cenários foram definidos baseados nas projeções da Agência Internacional de Energia: Novas Políticas (NP) e Desenvolvimento Sustentável (DS) (International Energy Agency, 2023). O cenário NP representa uma trajetória baseada nas políticas energéticas atualmente implementadas ou anunciadas, refletindo um nível moderado de mitigação de emissões. Já o cenário DS corresponde a uma trajetória mais ambiciosa de descarbonização, alinhada aos objetivos do Acordo de Paris. Para quantificar economicamente esses cenários, foram adotados preços de crédito de carbono de US\$ 33,67/tonelada de CO₂ para o cenário NP e US\$ 146,67/tonelada de CO₂ para o cenário DS (Wiertzema et al., 2020).

2.4. Análise de Sensibilidade

Em trabalho anterior, foram aplicadas técnicas de amostragem *Latin Hypercube* e análise de correlação de *Spearman* para identificar as variáveis de processo com maior relevância sobre os indicadores econômicos e ambientais (Siqueira et al., 2025). Como resultado, identificou-se que razão de *boil-up* exerce influência significativa sobre o desempenho econômico do sistema, pois determina a circulação de vapor na coluna e as demandas de compressão do sistema VR. Com base nessa análise, foi realizada uma avaliação da razão de *boil-up* no intervalo entre 0,5 e 4,0, faixa correspondente a frações de vapor geradas no refeedor da coluna HPRD entre 0,30 e 0,85, variando em incrementos de 0,05. Para cada condição analisada, a razão de refluxo foi ajustada de forma a garantir excesso de metanol em relação ao óleo superior a 5:1 na alimentação da coluna reativa,

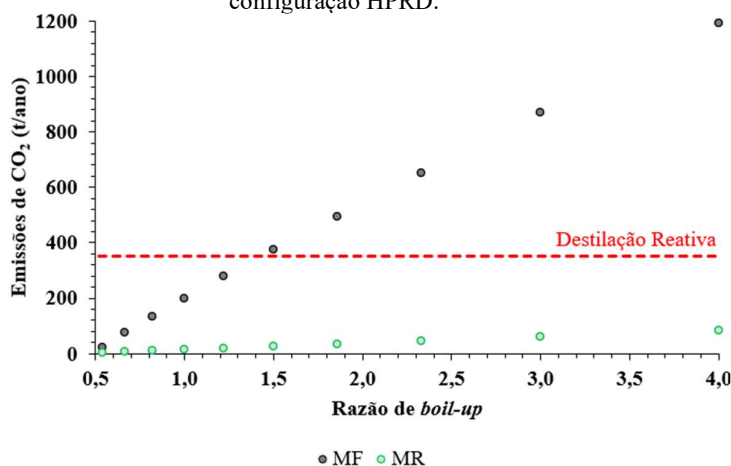
assegurando condições adequadas para a cinética de pseudo-primeira ordem adotada. As demais condições operacionais do processo foram mantidas constantes.

3. Resultados

Os valores do processo RD utilizados como referência, representados pela linha tracejada nas Figuras 2 e 4, foram obtidos a partir da simulação do caso base de RD descritos na Seção 2.1. Esses valores são utilizados para avaliar o impacto da integração do sistema VR na configuração HPRD para diferentes razões de *boil-up*.

Através da análise de sensibilidade realizada sobre o impacto ambiental (Figura 2), identifica-se que o aumento da razão de *boil-up* resulta em maior consumo energético (demanda por eletricidade no compressor) no sistema VR e, consequentemente, aumento das emissões de CO₂. Este efeito é mais pronunciado no cenário MF, no qual as emissões crescem rapidamente e ultrapassam as do processo RD para razões de *boil-up* superiores a aproximadamente 1,5 (350,11 t/ano). Em contraste, no cenário MR, as emissões permanecem significativamente inferiores ao convencional em toda a faixa analisada (1,53 – 82,71 t/ano), evidenciando o papel da matriz energética no desempenho ambiental da eletrificação.

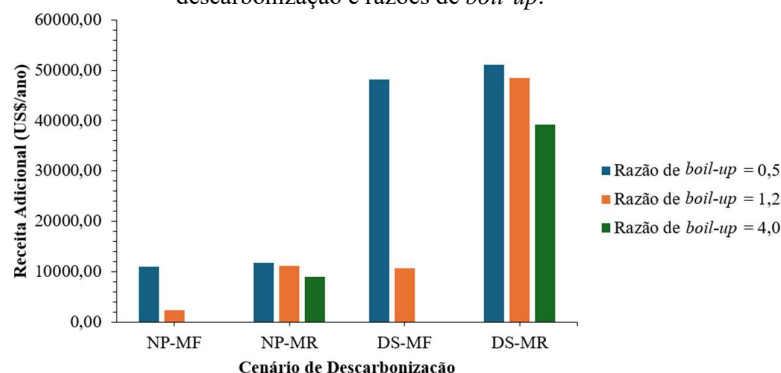
Figura 2. Efeito da razão de *boil-up* sobre as emissões de CO₂ para diferentes matrizes energéticas na configuração HPRD.



A partir da Figura 2, foram determinadas três razões de *boil-up* representativas para realizar a análise da comercialização de créditos de carbono (Figura 3): o menor valor avaliado (0,5), o ponto de transição (dentro os simulados) em que o cenário MF passa a apresentar emissões inferiores ao processo RD (1,2) e o maior valor analisado (4,0). O valor intermediário foi identificado pela interseção entre a linha de referência do processo RD e a curva do cenário MF, caracterizando uma condição em que a eletrificação passa a apresentar vantagem ambiental em ambos os cenários (MF e MR). Para o valor mais elevado de *boil-up* (4,0), não há geração de receita nos cenários NP-MF e DS-MF, uma vez que, nessa condição, as emissões do processo eletrificado tornam-se superiores às da referência (RD), inviabilizando a obtenção de créditos de carbono.

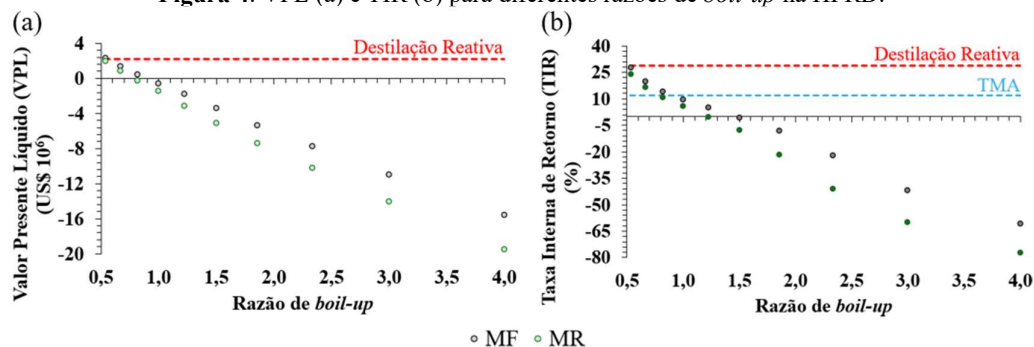
De modo geral, observa-se que os maiores valores de receita ocorrem no cenário DS, resultado direto do preço significativamente mais elevado do carbono nesse cenário. O impacto da política de precificação de carbono depende fortemente do cenário de descarbonização considerado. No cenário NP, as receitas adicionais permanecem relativamente modestas, variando entre US\$ 2 mil e US\$ 12 mil por ano. Em contraste, no cenário DS, o aumento do preço de carbono resulta em receitas significativamente elevadas, atingindo valores próximos a US\$ 50 mil por ano. Além disso, nota-se que o efeito da razão de *boil-up* é particularmente pronunciado no cenário MF. No caso DS-MF, por exemplo, a receita adicional cresce de aproximadamente US\$ 10 mil para cerca de US\$ 48 mil por ano quando a razão de *boil-up* é reduzida de 1,2 a 0,5, evidenciando a sensibilidade do sistema eletrificado em matrizes mais intensivas em emissões. Esse comportamento ocorre porque, no cenário MF, variações no consumo energético da VR resultam em diferenças mais expressivas nas emissões totais do processo, conforme constatado na Figura 2. No cenário MR, embora as receitas adicionais sejam superiores em geral ao cenário MF, a variação com o *boil-up* é menos acentuada, uma vez que o baixo fator de emissão da eletricidade limita o impacto das mudanças no consumo energético sobre as emissões totais.

Figura 3. Receita adicional anual proveniente de créditos de carbono para diferentes cenários de descarbonização e razões de *boil-up*.



Ao analisar economicamente o processo HPRD (Figura 4), observa-se que o aumento da razão de *boil-up* resulta em deterioração progressiva do desempenho econômico do processo, evidenciada pela redução do VPL e da TIR. Assim como no desempenho ambiental, esse comportamento está associado ao aumento do consumo energético e, consequentemente, dos custos operacionais do sistema de VR e de capital para a aquisição do compressor. Para valores baixos de *boil-up*, próximos de 0,5, o processo apresenta os melhores resultados econômicos. Nessa condição, a configuração HPRD torna-se economicamente competitiva em relação à destilação reativa convencional, uma vez que apresenta valores de VPL (US\$ 2,27 milhões) e TIR (27,6%) próximos aos do processo RD (VPL = US\$ 2,16 milhões e TIR = 28,9%). Considerando o critério de viabilidade econômica baseado em na TMA de 12%, observa-se que apenas a região com razão de *boil-up* abaixo de 1,0 atende ou se aproxima desse limite, mostrando a faixa restrita de operação quando realizada uma análise econômica mais completa.

Figura 4. VPL (a) e TIR (b) para diferentes razões de *boil-up* na HPRD.



4. Conclusão

A integração da VR à RD tem potencial para reduzir as emissões de CO₂, dependendo da matriz energética e das condições operacionais. A configuração HPRD pode gerar emissões menores que a RD convencional, se usada com matriz elétrica de baixo carbono. No caso do uso de matriz fóssil de eletricidade, o aumento da razão de *boil-up* pode elevar as emissões. Em termos econômicos, a eletrificação é viável em faixas de menor razão de *boil-up*, especialmente próxima de 0,5, apresentando VPL e TIR similares ao processo intensificado convencional. Mecanismos de precificação de carbono aumentam a atratividade econômica, principalmente em cenários de descarbonização. Assim, a eletrificação de sistemas intensificados se mostra promissora para reduzir emissões na produção de biodiesel, desde que associada a matrizes energéticas limpas e condições operacionais adequadas.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio prestado pela Universidade Estadual de Maringá, bem como o acesso à literatura científica por meio do Portal de Periódicos da CAPES. Além disso, os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES - Código Financeiro 001 e

Processos 88887.210351/2025-00 e 88887.147796/2025-00, bem como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq – processos: 141891/2023-8, 307705/2025-0, 309026/2022-9 e 406544/2023-9.

Referências

- Brasil. Ministério de Minas e Energia: Boletim Mensal de Energia – Edição de Abril de 2024, MME: 2024.
- Chemical Engineering Online: Plant Cost Index, Chemical Engineering Online: 2024.
- H.-H. Chiu e B.-Y. Yu: Synthesis of Green Light Olefins from Direct Hydrogenation of CO₂. Part I: Techno-Economic, Decarbonization, and Sustainability Analyses Based on Rigorous Simulation, J. Taiwan Inst. Chem. Eng. (156), 105340, 2024.
- J. M. Douglas: Conceptual Design of Chemical Processes, McGraw-Hill: 1988.
- A. L. C. Ferrer e A. M. T. Thomé: Carbon Emissions in Transportation: A Synthesis Framework, Sustainability (15), 8475, 2023.
- M. A. Gadalla, Z. Olujic, P. J. Jansens, M. Jobson e R. Smith: Reducing CO₂ Emissions and Energy Consumption of Heat-Integrated Distillation Systems, Environ. Sci. Technol. (39), 6860–6870, 2005.
- International Energy Agency: World Energy Outlook 2023, IEA: 2023.
- N. Pasupulety, K. Gunda, Y. Liu, G. L. Rempel e F. T. T. Ng: Production of Biodiesel from Soybean Oil on CaO/Al₂O₃ Solid Base Catalysts, Appl. Catal. A (452), 189–202, 2013.
- M. Peters, K. Timmerhaus e R. West: Plant Design and Economics for Chemical Engineers (5a. Ed.), McGraw-Hill: 2002.
- C. F. Rodriguez-Robles, S. Hernandez-Castro, H. Hernandez-Escoto, J. Cabrera-Ruiz, F. O. Barroso-Muñoz e J. E. Terrazas-Rodriguez: Control Analysis of Batch Reactive Distillation Column with Intermittent Fed em Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier: 2019.
- W. D. P. Siqueira, D. R. M. Elihimas, C. B. B. Costa, M. A. S. S. Ravagnani e L. V. Pavão: Mapping the Influence of Process Variables on Environmental and Economic Performance in Intensified Biodiesel Production em Sustainability and Energy Resources in Engineering Applications – DYCAELS 2025: 2025.
- W. D. P. Siqueira e L. V. Pavão: Análise Econômica e Ambiental da Produção de Biodiesel via Destilação Reativa com Bomba de Calor no Contexto Brasileiro em Anais do I Congresso Nacional de Engenharia (I CONENG): 2025.
- M. Silva e H. L. Raadal: Life Cycle GHG Emissions of Renewable and Non-Renewable Electricity Generation Technologies, Ostfold Research: 2019.
- V. Steffen, M. Schmidt de Oliveira e E. Antonio da Silva: A Systematic Review of the Literature on Steady-State Reactive Distillation Modeling and Simulation: Challenges and Opportunities em Solvents – Dilute, Dissolve, and Disperse – Insights on Green Solvents and Distillation, IntechOpen: 2024.
- D. Sun, L. Gao, R. Wei, X. Pan e G. Xiao: Mechanical Vapor Recompression Coupling Organic Rankine Cycle Process for Purification of Crude Biodiesel Obtained by Solid Base-Catalyzed Transesterification, Energy (266), 126499, 2023.
- G. Towler e R. Sinnott: Introduction to Design em Chemical Engineering Design, Elsevier: 2022.
- R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya e W. B. Whiting: Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes (5a. Ed.), Prentice Hall: 2018.
- H. Wiertzema, E. Svensson e S. Harvey: Bottom-Up Assessment Framework for Electrification Options in Energy-Intensive Process Industries, Front. Energy Res. (8), 2020.
- F. Zheng e H. M. Cho: Study on Biodiesel Production: Feedstock Evolution, Catalyst Selection, and Influencing Factors Analysis, Energies (18), 2533, 2025.