

ANÁLISE EXERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE COMBUSTÍVEIS VERDES POR HIDRODESOXIGENAÇÃO

Marco Antonio Ossips Silva (PIBIC/FA/UEM), Carlos Eduardo Korn Senko (Coorientador), Caliane Bastos Borba Costa (Orientadora). E-mail: cbbcosta@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Química /Processos Industriais de Engenharia Química.

Palavras-chave: Eficiência exergética, combustíveis renováveis, simulação.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise exergética do processo de produção de diesel verde e o bioquerosene de aviação (BioQAV) por hidrodesoxigenação com ênfase na identificação das perdas exergéticas e proposição de melhorias que reduzam as irreversibilidades. A metodologia contemplou a simulação do processo no software Aspen Plus e a integração com a linguagem Python para cálculo da exergia e da eficiência exergética de cada equipamento do processo. Os resultados englobaram a construção de um fluxograma de simulação com convergência numérica, a quantificação detalhada das correntes de massa e energia e a aplicação de balanços exergéticos que possibilitaram mapear a destruição de exergia em equipamentos como reatores, trocadores de calor, bombas e colunas de destilação.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios globais, resultantes sobretudo da queima de combustíveis fósseis e do aumento das emissões de gases de efeito estufa. Seus efeitos já são evidenciados no aumento da temperatura média global, no derretimento de calotas polares e na elevação do nível do mar, o que reforça a necessidade de uma transição energética. Nesse contexto, os combustíveis verdes, como o diesel verde e o bioquerosene de aviação (BioQAV), despontam como alternativas estratégicas por possuírem propriedades semelhantes às de seus equivalentes fósseis, mas de origem renovável. No Brasil, a ampla disponibilidade de oleaginosas e o estímulo de políticas públicas consolidam esse potencial, sendo a rota HEFA (*Hydroprocessed Esters and Fatty Acids*), baseada no hidrotreatamento catalítico de ácidos graxos, a mais estabelecida por ser mais vantajosa na produção do diesel verde em larga escala, além da obtenção do BioQAV como subproduto (CAVALCANTI, 2022).

Apesar das vantagens ambientais e da qualidade dos produtos, a rota HEFA apresenta elevado consumo energético, em função das múltiplas etapas de reação e separação que ocorrem sob condições severas. Assim, sua avaliação demanda não

apenas indicadores convencionais de eficiência, mas também análises qualitativas da energia utilizada. A análise exergética, fundamentada na Segunda Lei da Termodinâmica, é essencial nesse contexto, pois permite quantificar irreversibilidades e localizar pontos de maior destruição de exergia (SEVERO, 2021). O presente trabalho adota essa abordagem, por meio de modelagem computacional no simulador Aspen Plus e cálculos complementares em Python, a fim de avaliar a eficiência exergética da rota HEFA. Dessa forma, busca-se propor melhorias operacionais e fornecer subsídios para o avanço de processos mais eficientes e sustentáveis de produção de biocombustíveis.

MATERIAIS E MÉTODOS

A simulação do processo foi realizada no *software* Aspen Plus, utilizando óleo de palma como matéria-prima, cuja composição em ácidos graxos foi definida a partir de dados da literatura (MANCO, 2014). O fluxograma foi baseado no trabalho de Cavalcanti (2022), e foram modelados equipamentos como bombas, trocadores de calor, reatores, separadores flash e coluna de destilação, com modelos termodinâmicos ajustados às características das correntes de processo.

Para os cálculos exergéticos, estabeleceu-se a integração entre o Aspen Plus e a linguagem Python, via biblioteca pywin32, permitindo a extração automatizada de dados da exergia das correntes e propriedades termodinâmicas dos equipamentos utilizados, como calor e trabalho, requeridos para resolução das equações de cálculo de exergia, além da eficiência exergética nos equipamentos. Pacotes como NumPy foram utilizados como suporte para cálculos numéricos. Todas as simulações e cálculos foram conduzidos no Laboratório de Projeto, Simulação e Controle de Processos (LSCP) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), utilizando computadores com licença acadêmica do Aspen Plus e o ambiente Spider 6 para a programação em Python.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação do processo foi desenvolvida com resultados convergentes de balanços de massa e energia. Para a alimentação de ácidos graxos em condições próximas à temperatura ambiente, utilizou-se o pacote termodinâmico CPA (*Cubic-Plus-Association*), adequado para misturas polares devido à sua capacidade de representar interações por ligações de hidrogênio. Já para a conversão em hidrocarbonetos e correntes de hidrogênio empregou-se o Peng-Robinson, mais apropriado para sistemas em altas pressões e temperaturas, típicos de processos de refino. Essa combinação assegurou maior precisão na representação das diferentes etapas do processo. O fluxograma da simulação pode ser observado na Figura 1.

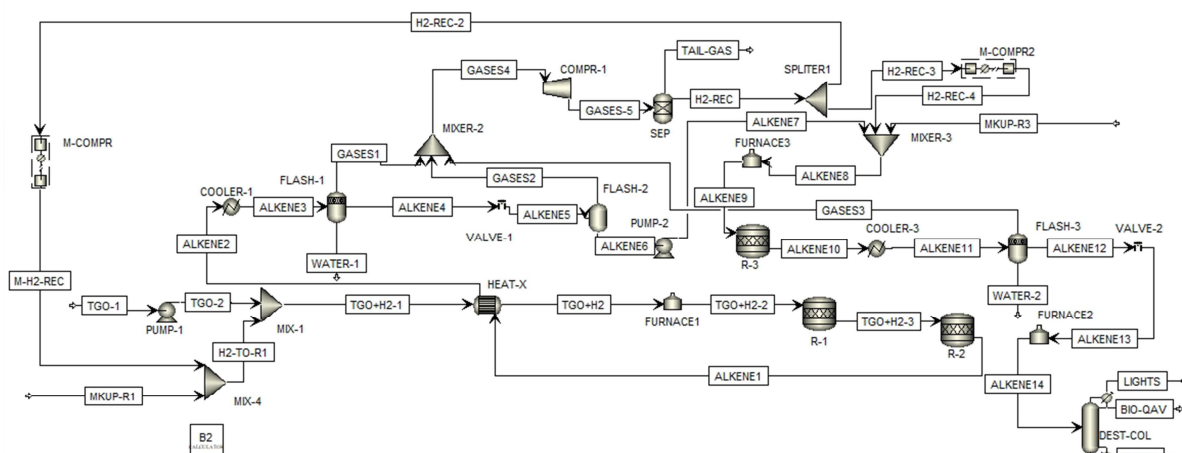


Figura 1 – Fluxograma da simulação da produção de combustíveis verdes pela rota HEFA.

O processo simulado possibilitou a análise exergética por meio da função EXERGYFL, (PS-1) Exergy flow rate, a qual mede a exergia de cada corrente em suas condições termodinâmicas de equilíbrio. A integração com o ambiente Python permitiu a comunicação dos valores de exergia, calor e trabalho requerido, associados às irreversibilidades envolvidas no balanço exergético individual de cada equipamento. Os resultados desses balanços estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Perda de exergia e eficiência exergética por equipamento

Equipamento	Perda de exergia [kW]	Eficiência exergética [%]	Equipamento	Perda de exergia [kW]	Eficiência exergética [%]
SEP	0,01	99,86	VALVE-2	1,42	73,05
MIX-1	0,20	99,66	MIXER-3	5,27	72,52
FLASH-2	0,06	98,66	COOLER-3	13,70	71,63
R-3	0,73	98,53	PUMP-1	41,38	70,25
R-2	2,66	98,26	FURNACE-1	51,11	69,26
FLASH-1	1,40	94,21	M-COMPR2	4,37	63,77
FLASH-3	0,84	93,96	COOLER-1	14,65	63,74
R-1	11,12	93,37	DEST-COL	91,29	60,09
HEAT-X	10,82	92,81	M-COMPR	11,29	55,65
PUMP-2	0,21	86,37	FURNACE-2	60,08	47,92
FURNACE-3	26,55	85,51	MIXER-2	7,74	0,79
COMPR-1	1,79	79,10	VALVE-1	7,28	0,63

A análise exergética evidencia que, embora a maioria dos equipamentos apresente perdas de exergia relativamente baixas e eficiências acima de 90%, como o separador (SEP), os reatores (R-1, R-2 e R-3) e unidades de flash (FLASH-1, FLASH-2 e FLASH-3), alguns equipamentos específicos são responsáveis pelas maiores irreversibilidades do processo, destacando-se o misturador (MIX-1), a

coluna de destilação (DEST-COL), os fornos (FURNACE-1 e FURNACE-2), além do compressor (PUMP-1), que concentram as maiores perdas exergéticas e menores eficiências. Em contrapartida, o desempenho crítico de unidades como o misturador (MIXER-2) e a válvula (VALVE-1), com eficiências próximas de zero devido às quedas bruscas de pressão, indica pontos de ineficiência extrema que devem ser prioritariamente reavaliados para um aperfeiçoamento. Esses resultados sugerem que a melhoria global do processo depende de um reaproveitamento de correntes quentes e frias além da substituição dos dispositivos com desempenho exergético crítico.

CONCLUSÕES

A partir do trabalho realizado, foi possível observar que poucas unidades concentram a maior parte das irreversibilidades, tornando-as prioridade para intervenção. Dessa maneira, vê-se como possibilidade uma integração energética para reorganização da rede de trocadores de calor para diminuição do uso de utilidade e perdas exergéticas. Além disso, a reestruturação do sistema de recuperação de gases surge como alternativa para mitigar essas perdas e aprimorar o desempenho da recompressão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação Araucária (FA), da Universidade Estadual de Maringá (UEM), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código de financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processos nº 307705/2025-0 e 382490/2024-0.

REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, Cláudia Jéssica da Silva. **Simulação e otimização de processos para obtenção de biocombustíveis: etanol, bioquerosene de aviação e diesel verde**. 2022. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

MANCO, Juan Felipe Véles. **Conceptual design of a palm oil hydrotreatment reactor for commercial diesel production**. 2014. Dissertação (Mestrado) - Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, Medellín, Colômbia, 2014.

SEVERO, Felipe. **Análise de eficiência baseada em multicritério aplicada à unidade de processamento de gás natural**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.