

Otimização do volume de biodiesel produzido a partir óleo de soja residual

Matheus de Souza Pereira¹; Izabel Melz Fleck²; Leandro Fleck^{3,*}

¹ Curso de Tecnologia em Gestão Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/UUMN), Mundo Novo, MS

² Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Sustentabilidade Ambiental (PGBSA), Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/UUMN), Mundo Novo, MS

³ Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS/UUMN), Mundo Novo, MS,

* leandro.fleck@uems.br

Resumo: A escassez das fontes tradicionais de energia tem resultado na busca por fontes alternativas, a exemplo do biodiesel. O artigo objetiva otimizar o volume de produção de biodiesel utilizando óleo de soja residual como matéria-prima. O óleo de soja residual utilizado para a produção do biodiesel via reação de transesterificação, foi coletado em estabelecimentos comerciais do ramo de Fast-Food. Ao término da reação de transesterificação ocorreu a separação da glicerina e o biodiesel passou pelo processo de lavagem e secagem. Os efeitos da temperatura e do tempo de reação sobre a quantidade do biodiesel produzido foi avaliada utilizando-se um DCCR. Foi gerado um modelo matemático representativo do processo, cuja significância estatística foi testada pela Análise de Variância, sendo posteriormente validado com base em dados experimentais obtidos em três ensaios de validação conduzidos em condições experimentais dentro dos limites em que foi gerado. Maiores produções de biodiesel podem ser obtidas ao se aplicar condições reduzidas de hidróxido de sódio e de tempo de reação de transesterificação. O hidróxido de sódio (termo *linear*) e a interação entre os fatores (hidróxido de sódio e tempo de reação) apresentaram efeito significativo sobre o volume de biodiesel produzido, uma vez que o p-valor é inferior ao nível de significância adotado. O modelo matemático proposto para simular o volume de biodiesel produzido é estatisticamente significativo, com p-valor de 0,002504. Conclui-se que a concentração de catalisador e tempo de reação de transesterificação são variáveis que devem ser consideradas pelas unidades produtoras de biodiesel.

Palavras-chave: Biocombustíveis; Energia renovável; Reação de Transesterificação.

Optimization of the volume of biodiesel produced from residual soybean oil

Abstract: The scarcity of traditional energy sources has resulted in the search for alternative sources, such as biodiesel. The article aims to optimize the volume of biodiesel production using residual soybean oil as raw material. The residual soybean oil used to produce biodiesel via transesterification reaction was collected in commercial establishments in the Fast-Food sector. At the end of the transesterification reaction, the glycerin was separated and the biodiesel went through the washing and drying process. The effects of temperature and reaction time on the amount of biodiesel produced were evaluated using a CCRD. A mathematical model representative of the process was generated, whose statistical significance was tested by Analysis of Variance, and was subsequently validated based on experimental data obtained in three validation tests conducted under experimental conditions within the limits in which it was generated. Higher biodiesel productions can be obtained by applying reduced sodium hydroxide and transesterification reaction time conditions. Sodium hydroxide (linear term) and the interaction between factors (sodium hydroxide and reaction time) had a significant effect on the volume of biodiesel produced, since the p-value is lower than the adopted level of significance. The mathematical model proposed to simulate the volume of biodiesel produced is statistically significant, with a p-value of 0.002504. It is concluded that the catalyst concentration and transesterification reaction time are variables that must be considered by biodiesel production units.

Keywords: Biofuels; Renewable energy; Transesterification Reaction.

Introdução

As energias de fontes fósseis, caracterizadas por não serem renováveis, atualmente são muito utilizadas e de fundamental importância para o desenvolvimento econômico das nações (LIN e XU, 2020). Entretanto, constantemente tem sido pauta de discussão entre ambientalistas, devido ao seu potencial de aumentar a concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEEs), resultando no aquecimento global (BIZERRA, QUEIROZ e COUTINHO, 2018).

A preocupação mundial em relação as emissões de GEEs, resulta na busca constante por tecnologias que possibilitem a transição para uma economia de baixo carbono (WANG *et al.*, 2022). Como exemplo de setor positivo no âmbito da economia de baixo carbono, se destacam os biocombustíveis provenientes de biomassa, os quais caracterizam uma nova era, responsável pela transição de energia fóssil para a energia limpa e/ou renovável (ZOU *et al.*, 2016). Entretanto, é importante destacar que a elevada demanda energética, aliada ao acelerado desenvolvimento econômico, vem superando o incremento de energias alternativas na matriz energética mundial, o que dificulta a equivalência da utilização das fontes energéticas fósseis e alternativas (YORK e BELL, 2019).

Conforme descrito por Vernersbach *et al.* (2021), a utilização dos biocombustíveis resulta na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂), sendo este um dos principais gases causadores do aquecimento global. Partindo desse cenário, a Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2023 ou Conferência das Partes da CQNUMC (COP 28), dentre outros objetivos, buscou discutir entre diferentes lideranças internacionais a possibilidade de transição dos combustíveis fósseis para os biocombustíveis, com horizonte predefinido para o ano de 2050.

Os biocombustíveis possuem origem biológica ou natural, tendo a biomassa como matéria-prima básica, a qual se caracteriza como um material orgânico, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizado para a produção de energia (DELATORRE *et al.*, 2011). Dentre os inúmeros exemplos de fontes energéticas obtidas a partir de biomassa, podem ser citados: o etanol (álcool), o biogás, o óleo vegetal e o biodiesel (AZEVEDO e LIMA, 2016).

Dentre os diferentes biocombustíveis conhecidos em nível internacional, de acordo com Badadi *et al.* (2022), a aceitação social do biodiesel tem aumentado. Entretanto, segundo Melo, Ferreira e Fregolente (2024), a produção de biodiesel em larga escala deve ser projetada para atender à crescente demanda atual. Para que isso seja possível, é evidente a necessidade de investimentos em ciência e tecnologia, principalmente para o financiamento de pesquisas

científicas que objetivem a produção de biocombustível a partir de fontes alternativas de matéria-prima.

A produção de biodiesel pode ser realizada por distintos processos como, por exemplo, diluição, microemulsificação, pirólise e transesterificação, sendo a transesterificação o método mais utilizado para produção em grande escala (Ramos *et al.*, 2006). A transesterificação consiste em uma atividade química na qual a molécula de um triglicerídeo ou ácido graxo completo, acaba neutralizando os ácidos livres, removendo a glicerina e criando um éster (biodiesel) (FERNANDES *et al.*, 2008).

A viabilidade ambiental do biodiesel, principalmente como agente ativo na transição para uma economia de baixo carbono, é aceita mundialmente. Entretanto, a pesquisa por avanços no desenvolvimento de biocombustíveis para venda em larga escala enfrenta limitações relacionadas a aspectos tecnológicos e ambientais (BADADI *et al.*, 2022). Como grande desvantagem do biodiesel, cita-se o conflito de interesse com o setor alimentício, o que resulta inclusive no aumento do preço de comercialização desta fonte alternativa de energia (SOUSA *et al.*, 2022).

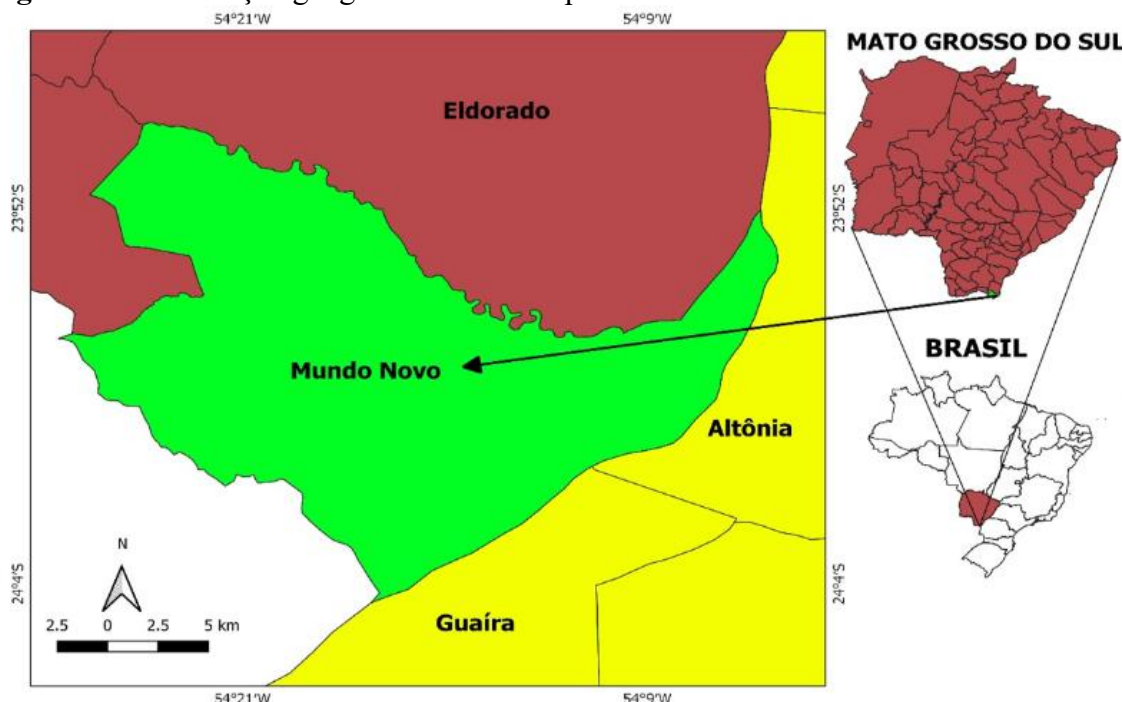
Considerando que a produção de biodiesel necessita de um óleo vegetal ou animal, a otimização da produção a partir do óleo residual de fritura passou a ser objeto de estudo, o que se justifica pela retirada de um poluente do meio ambiente, associado à produção de energia alternativa (SILVA, 2013). Atualmente, milhões de litros de óleo vegetais são utilizados diariamente por diversos estabelecimentos comerciais para o preparo de alimentos, volume que acaba sendo descartado, em sua maioria, de forma inadequada, tornando-se um problema ambiental significativo, devido aos efeitos adversos nos corpos hídricos e no solo (MEDEIROS *et al.*, 2018).

Sendo assim, o objetivo do presente estudo consiste na otimização das condições operacionais da transesterificação do óleo de soja residual, para maximizar o volume de biodiesel produzido durante o processo.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

Os ensaios experimentais para a produção de biodiesel foram conduzidos no Laboratório de Inovações em Biogás, instalado na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Mundo Novo (UEMS/UUMN). O município de Mundo Novo possui uma área total de 478,380 km², com a estimativa de 18.578 habitantes e densidade demográfica em 32,67 habitantes/km² (IBGE, 2021) (Figura 1).

Figura 1 - Localização geográfica do município de Mundo Novo.

Fonte: Ferreira e Fleck (2021).

Coleta e pré-tratamento do óleo residual

O óleo de soja residual utilizado para a produção do biodiesel, foi coletado em diferentes estabelecimentos comerciais, atuantes no ramo de Fast-Food, instalados no município de Mundo Novo/MS. Após a coleta, o óleo residual foi aquecido a 40 °C para tornar a amostra pastosa, utilizando para isso placa de aquecimento, e, termômetro digital para controle da temperatura. Posteriormente, ocorreu a filtragem do óleo, seguindo duas etapas:

- Primeira etapa: filtragem utilizando peneira granulométrica (abertura de 1,18 mm e malha 16), para retirada dos materiais mais grosseiros;
- Segunda etapa: filtragem com filtros de papel para a retirada do material remanescente da primeira etapa.

Produção e quantificação do biodiesel

O planejamento inicial da produção de biodiesel foi realizado com base no estudo desenvolvido por Fantinel (2016), utilizando o óleo de cozinha residual, através do processo de transesterificação, seguindo as seguintes etapas:

Para cada ensaio experimental, foram utilizados óleo de soja residual (100 mL), metanol (35 mL), sob aquecimento a 45 °C. Ao final do processo, a solução obtida foi transferida para um funil de separação, para separar a glicerina do biodiesel, o que durou em média 15 min para cada condição experimental.

Para a remoção de catalisadores presentes no biodiesel, foi realizado o processo de lavagem, adicionando 50 mL de solução aquosa de ácido clorídrico 0,5 % (v/v) ao funil de separação e agitando por 5 min, seguindo de decantação por 5 min e remoção da fase aquosa como resíduo. O mesmo processo de lavagem foi repetido utilizando 50 mL de solução saturada de Cloreto de Sódio (NaCl), e, posteriormente com 50 mL de água destilada. Esta ação foi realizada para garantir que o pH da última lavagem do biodiesel se apresentasse próximo a neutralidade, garantindo a completa remoção do catalisador básico.

Objetivando mensurar apenas o volume de biocombustível produzido, a remoção de umidade do biodiesel foi realizada com a adição de 2 g de sílica (óxido de silício). Por fim, após a produção, separação, lavagem e secagem do biodiesel, o mesmo foi quantificado com o auxílio de uma proveta volumétrica de 100 mL.

Delineamento de Tratamentos

Os efeitos da temperatura e do tempo de reação sobre a quantidade do biodiesel produzido foi avaliada utilizando-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), ou seja, um esquema fatorial de tratamentos 2^2 , incluindo 4 ensaios fatoriais, 4 ensaios axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 ensaios. Na Tabela 1, observa-se a matriz do delineamento de tratamentos com valores codificados e reais dos fatores em estudo, sendo os valores reais definidos a partir de ensaios preliminares.

Tabela 1 - Matriz do delineamento de tratamentos.

Ensaio	Concentração de Hidróxido de Sódio		Tempo de Reação	
	Codificado	Real (g)	Codificado	Real (min)
1	-1	1,0	-1	18
2	-1	1,0	+1	32
3	+1	2,0	-1	18
4	+1	2,0	+1	32
5	-1,41	0,80	0	25
6	+1,41	2,20	0	25
7	0	1,5	-1,41	15
8	0	1,5	+1,41	35
9	0	1,5	0	25
10	0	1,5	0	25
11	0	1,5	0	25

O modelo matemático codificado ajustado a partir dos dados experimentais é apresentado na Equação 1:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + e \quad \text{Eq. (1)}$$

Em que:

y - variável resposta (qualidade do biodiesel);

β - coeficientes de regressão;

x_1 - valor codificado de tempo;

x_2 - valor codificado (variável que iremos definir);

e – erro experimental.

Pela aplicação da Equação 2 é possível realizar a codificação dos valores de concentração de hidróxido de sódio e tempo de reação de transesterificação aplicados nos modelos matemáticos.

$$x_i + \frac{z_i - z_m}{\frac{\Delta z}{2}} \quad \text{Eq. (2)}$$

Em que:

x_i - valor codificado da variável independente;

z_i - valor real da variável independente;

z_m - valor médio entre os níveis +1 e -1;

Δz - diferença entre os níveis +1 e -1.

A significância estatística do modelo matemático foi testada pela Análise de Variância (ANOVA) com um intervalo de confiança de 95 %, sendo posteriormente validado com base em dados experimentais obtidos em três ensaios de validação conduzidos em condições experimentais dentro dos limites em que foi gerado.

Resultados e Discussão

Volume de biodiesel produzido nas diferentes condições experimentais

A maior produção de biodiesel foi observada no ensaio experimental número 1 (1,0 g de NaOH e 18 min), com um volume total de 77 mL. Comparativamente, Díaz *et al.* (2019), ao

utilizarem 1 % de catalizador (hidróxido de sódio), observaram que está é a condição experimental que garantiu a melhor qualidade do biodiesel produzido.

É importante destacar que o presente estudo objetivou avaliar exclusivamente a quantidade de biodiesel produzido em diferentes condições operacionais do processo de transesterificação, uma vez que a qualidade do biodiesel originado de óleo de soja residual, incluindo a observação aos critérios estipulados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP), já foi comprovada cientificamente por inúmeros estudos disponíveis na literatura, a exemplo dos trabalhos desenvolvidos por Charpe e Rathod (2011), Rossi *et al.* (2018), Coelho *et al.* (2020), Kedir e Asere (2022) e Brito *et al.* (2023).

Em contrapartida, a menor produção de biodiesel foi observada no ensaio experimental número 6, o qual foi conduzido com a maior concentração de hidróxido de sódio (2,20 g) e valores médios de tempo de reação (25 min). Estes resultados constituem um forte indício de que o efeito da concentração de hidróxido de sódio sobre o volume de biodiesel produzido é negativo. Outro ponto de relevância é a baixa variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios experimentais conduzidos nas condições do ponto central do delineamento de tratamentos (números 9, 10 e 11), o que era esperado e justifica a confiabilidade do experimento conduzido (RODRIGUES e IEMMA, 2014), uma vez que as condições experimentais impostas foram as mesmas para estes três ensaios realizados (Tabela 2).

Tabela 2 - Volume de biodiesel produzido em cada condição experimental.

Ensaio	Hidróxido de Sódio		Tempo de Reação		Volume produzido (mL)
	Codificado	Real (g)	Codificado	Real (min)	
1	-1	1,0	-1	18	77
2	-1	1,0	+1	32	34
3	+1	2,0	-1	18	17
4	+1	2,0	+1	32	34
5	-1,41	0,80	0	25	63
6	+1,41	2,20	0	25	7
7	0	1,5	-1,41	15	23
8	0	1,5	+1,41	35	52
9	0	1,5	0	25	42
10	0	1,5	0	25	37
11	0	1,5	0	25	34

Análise de efeitos para a produção de biodiesel

O efeito de um fator pode ser entendido como a variação causada na resposta, quando percorremos todos os níveis desse fator, independentemente dos demais fatores (RODRIGUES e IEMMA, 2014). Conforme as informações apresentadas na Tabela 3, é possível identificar

que o hidróxido de sódio (termo linear) e a interação entre os fatores (hidróxido de sódio e tempo de reação de transesterificação) apresentaram efeito significativo sobre o volume de biodiesel produzido, uma vez que o p-valor é inferior ao nível de significância adotado, de 5 %.

Corroborando com as informações discutidas previamente (Tabela 2), destaca-se também na Tabela 3 que o efeito do hidróxido de sódio é negativo, isto é, em maiores concentrações de hidróxido de sódio ocorre uma tendência de redução do volume de biodiesel produzido e, por consequência, redução no rendimento do processo de transesterificação. Resultados semelhantes foram encontrados por Borges *et al.* (2015), os quais concluíram que o rendimento da produção de biodiesel diminuirá em maiores concentração do catalisador utilizado no processo produtivo do biocombustível.

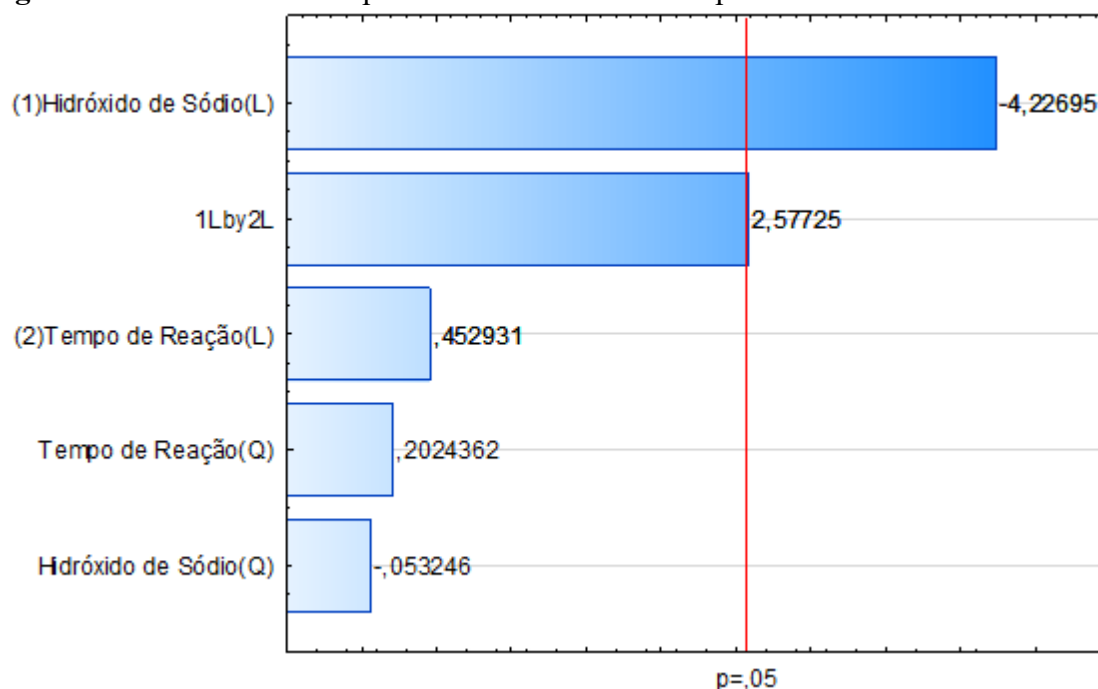
Tabela 3 - Análise de efeitos para o volume de biodiesel produzido.

Fator	Efeito	Erro Padrão	t(5)	p-valor
Média	37,6498	6,72046	5,60226	0,002504
Hidróxido de Sódio (L)	-34,8437	8,24322	-4,22695	0,008272*
Hidróxido de Sódio (Q)	-0,5237	9,83630	-0,05325	0,959598
Tempo de Reação (L)	3,7336	8,24322	0,45293	0,669575
Tempo de Reação (Q)	1,9912	9,83630	0,20244	0,847555
Hidróxido de Sódio X Tempo de Reação	30,0000	11,64031	2,57725	0,049597*

*Estatisticamente significativo em um intervalo de confiança de 95 %.

O Gráfico de Pareto (Figura 2) corrobora com as informações apresentadas na Tabela 3, no qual, são estabelecidos os efeitos estimados que cada variável independente (concentração de hidróxido de sódio e tempo de reação de transesterificação) exerce sobre a variável resposta (volume de biodiesel produzido), com nível de significância de 95 % ($p < 0,05$). Nesse contexto, observa-se que a interação entre as variáveis independentes e a concentração de hidróxido de sódio (termo linear) exercem efeito significativo sobre a produção de biodiesel a partir óleo de soja residual. Estas informações são importantes, pois ressaltam que para a produção de biodiesel em grande escala, estas variáveis deverão ser consideradas para que ocorra eficiência do processo de transesterificação, sem comprometer o volume de biocombustível gerado na planta industrial.

Resultados semelhantes foram obtidos por Martins *et al.* (2015), que ao apresentarem o Diagrama de Pareto, evidenciaram que a interação entre o tempo de reação e a quantidade de catalisador, influencia diretamente no rendimento do processo de obtenção do biodiesel, apresentando uma relação positiva, ou seja, quanto maior for essa interação melhor será o rendimento do processo.

Figura 2 - Gráfico de Pareto para o volume de biodiesel produzido.

Modelo matemático para simulação do volume de biodiesel produzido

O modelo matemático representativo do processo de produção de biodiesel é apresentado na Equação 3. Os coeficientes foram estimados com base nos resultados da Análise de Regressão Linear Múltipla, utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). É importante destacar que o modelo matemático, caso seja utilizado para a especulação de cenários, deverá ser aplicado dentro da faixa das variáveis independentes controladas no presente estudo e, além disso, deverão ser utilizados valores codificados de concentração de hidróxido de sódio e tempo de reação de transesterificação, observando para isso as orientações apresentadas pela Equação 2.

$$\text{Produção de biodiesel (mL)} = 37,65 - 17,42 \text{ NaOH} - 0,26 \text{ NaOH}^2 + 1,87 \text{ TR} + 0,99 \text{ TR}^2 + 15,00 \text{ NaOH} \times \text{TR} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que:

NaOH: valor codificado da concentração de hidróxido de sódio.

TR: valor codificado do tempo de reação de transesterificação.

A importância da geração de modelos matemáticos que possibilitem simular a eficiência do processo de transesterificação é evidenciada por diferentes motivos, dentre os quais: possibilidade de otimizar o volume de ésteres produzidos em relação ao material residual, a

exemplo da glicerina; possibilidade de projetar o sistema produtivo com base em dados confiáveis obtidos pelo processo de simulação de cenários; possibilidade de reduzir os custos de produção, evitando desperdício de catalisador e tempo de reação empregados no processo e maior possibilidade de contribuir positivamente o objetivamente para uma economia de baixo carbono.

Análise de variância para a produção de biodiesel

Os resultados de volume de biodiesel produzido, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), com nível de significância de 95%. Na Tabela 4, é observado que o termo linear da concentração de hidróxido de sódio e a interação deste elemento com o tempo de reação de transesterificação, indicou influência significativa sobre o volume de biodiesel produzido a partir do óleo de soja já utilizado previamente para fins culinários.

A transesterificação, utilizando catálise alcalina (a exemplo do hidróxido de sódio) é a rota predominante para a produção do biodiesel em grande escala, o que viabiliza os resultados encontrados no presente estudo. A ampla utilização se deve a fatores como a maior rapidez de reação e simplicidade, o que torna a utilização deste catalisador um atrativo pela viabilidade econômica associada a transesterificação do óleo de soja residual (VILAR *et al.*, 2020).

Tabela 4 - Análise de variância para a produção de biodiesel.

Fator	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	F	p-valor
Hidróxido de Sódio (L)	1	2420,937	2420,937	17,8671	0,0082*
Hidróxido de Sódio (Q)	1	0,384	0,384	0,0028	0,9595
Tempo de Reação (L)	1	27,797	27,797	0,2051	0,6695
Tempo de Reação (Q)	1	5,553	5,553	0,0409	0,8475
Hidróxido de Sódio x Tempo de Reação	1	900,000	900,000	6,6422	0,0495*
Resíduo	5	677,484	135,497		
Total	10	4033,636			

*Estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95 %; Coeficiente de determinação= 83,02 %.

Validação estatística do modelo matemático proposto

Na Tabela 5 é apresentada a Análise de Variância (ANOVA) para a validação estatística do modelo matemático proposto. Observa-se que o p-valor, de 0,002504, é inferior ao nível de significância adotado, de 95 %. Em termos práticos, é possível inferir que o modelo matemático gerado poderá ser utilizado para a simulação de cenários, quando o objetivo for a produção de biodiesel utilizando como matéria-prima o óleo de soja previamente utilizado para fins culinários, em que os fatores controlados sejam a concentração de hidróxido de

sódio (catalisador) e o tempo de reação de transesterificação utilizado na produção do biocombustível.

Tabela 5 - Validação estatística do modelo matemático proposto.

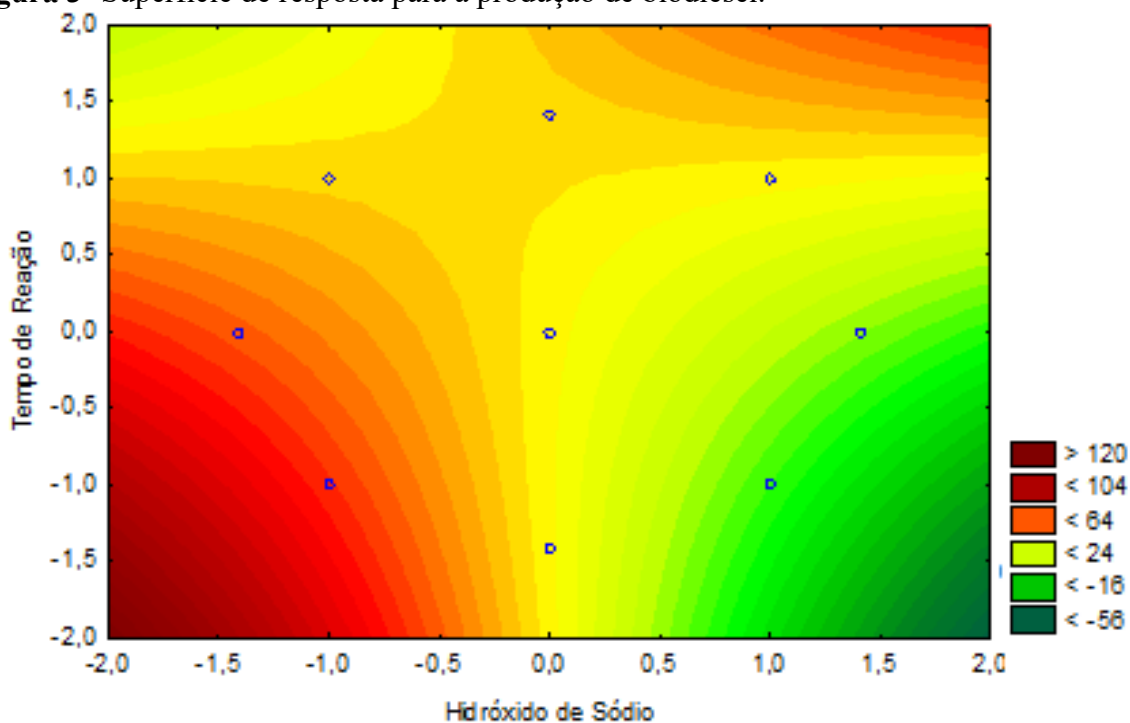
Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	p-valor
Regressão	3356,152	5	670,9342	0,002504*
Resíduos	677,484	5	135,497	
Total	4033,636	10		

*Estatisticamente significativo com um intervalo de confiança de 95 %.

Gráfico de superfície de resposta

Considerando que o modelo matemático proposto é estatisticamente significativo, é importante evidenciar a dinâmica do processo com base nas faixas máxima e mínima do estudo, as quais poderão ser utilizadas como limites norteadores de estudos futuros e/ou aplicação em escala real. Com base nessas informações, observa-se na Figura 3 o gráfico de superfície de resposta do modelo matemático proposto para a produção de biodiesel. O gráfico de superfície indica que maiores produções de biodiesel podem ser obtidas ao se aplicar condições reduzidas de hidróxido de sódio e de tempo de reação de transesterificação, o que pode ser um fator encorajador da aplicação da técnica, devido a eminente redução de custos associados ao processo produtivo do biocombustível.

Figura 3 -Superfície de resposta para a produção de biodiesel.



No estudo conduzido por Martins *et al.* (2015) foram obtidos resultados semelhantes, em que os maiores rendimentos de produção de biodiesel foram obtidos com temperatura, quantidade de catalisador e tempo de reação medianos, com tendência a melhorar a produção quando reduzidos os valores dessas variáveis independentes.

Validação experimental do modelo matemático proposto

Na Tabela 6 são apresentadas as informações obtidas a partir da validação experimental do modelo matemático proposto. Evidencia-se um erro de 15,66 % entre o volume de biodiesel produzido em condições experimentais dentro da faixa em que o modelo matemático foi gerado, e os valores de produção obtidos pela aplicação do modelo matemático originado no estudo. Embora o erro seja considerável, é importante destacar que o volume de produção de biodiesel foi superior ao previsto pelo modelo matemático, o que evitará problemas de simulação de volumes de produção de biocombustível não condizentes com a realidade do processo operacional.

Tabela 6 - Validação experimental.

Variável	Eficiência Prevista (mL)	Eficiência Observada (mL)	Erro (%)**
Produção de biodiesel (mL)	67,47	*R 1- 75	15,66
		R 2- 80	
		R 3- 86	
		Média- 80	

*réplicas; ** calculado com base no valor médio.

Um dos principais objetivos comuns em nível mundial para as próximas décadas é a transição para uma economia de baixo carbono, o que é de fundamental importância para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEEs). Como alternativa a essa questão, tem sido discutido de forma abrangente em eventos internacionais a produção e utilização de biocombustíveis, a exemplo do biodiesel, elemento central das discussões apresentadas no presente estudo.

Conclusões

É possível concluir que a concentração de catalisador (hidróxido de sódio) e tempo de reação de transesterificação são variáveis que devem obrigatoriamente serem consideradas pelas unidades produtoras de biodiesel, uma vez que a interação destas, possui influência significativa sobre o volume do biodiesel produzido.

Se recomenda fortemente que o modelo matemático gerado no presente estudo seja utilizado para a simulação de cenários, evitando gastos desnecessários com o processo produtivo, e, garantindo que o volume de biodiesel produzido seja o máximo possível diante das condições operacionais empregadas.

Recomenda-se também que seja utilizado o óleo de soja residual como alternativa de destinação final deste resíduo, o que além de se caracterizar como uma ação de saneamento ambiental, se mostra como uma alternativa economicamente viável para agregar valor a um passivo ambiental, capaz de gerar impactos significativos, caso não seja adequadamente gerenciado.

Referências

- AZEVEDO, A. N. G.; LIMA, B. G. A. Biocombustíveis: desenvolvimento e inserção internacional. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 6, n. 1, p. 77-100, 2016.
- BADADI, A. A.; RAHMATI, S.; FAKHLAEI, R.; BARATI, B.; WANG, S.; DOHERTY, W.; OSTRIKOW, K. K. Emerging technologies for biodiesel production: processes, challenges, and opportunities. **Biomass and Bioenergy**, v. 163, n. 1, p. 106521, 2022.
- BIZERRA, A. M. C.; QUEIROZ, J. L. A. de; COUTINHO, D. A. M. O impacto ambiental dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis: as concepções de estudantes do ensino médio sobre o tema. **Revbea**, v. 13, n. 3, p. 299-315, 2018.
- BORGES, K. A.; PORTELA, F. M.; SANTOS, D. Q.; NETO, W. B.; FABRIS, J. D.; HERNÁNDEZ-TERRONES, M. G. Performance das variáveis operacionais na transesterificação etílica do óleo de soja. **Eclética Química**, v. 40, p. 126-132, 2015.
- BRITO, V. L.; GONÇALVES, M. A.; SANTOS, H. C. L.; ROCHA FILHO, G. N.; CONCEIÇÃO, L. R. V. Biodiesel production from waste frying oil using molybdenum over niobia as heterogeneous acid catalyst: Process optimization and kinetics study. **Renewable Energy**, v. 215, p. 1-12, 2023.
- CHARPE, T. W.; RATHOD, V. K. Biodiesel production using waste frying oil. **Waste Management**, v. 31, n. 1, p. 85-90, 2011.
- COELHO, F. L. L.; SANTOS, I. O.; PAIXÃO, D. C.; LHAMAS, D. E. L.; RODRIGUES, G.; SUFFREDINI, D. F. P.; MEDEIROS, A. C. G. Produção de biodiesel de óleo de fritura residual em um módulo didático de biodiesel. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n.5, p. 28844-28854, 2020.
- DELATORRE, A. B.; RODRIGUES, P. A.; AGUIAR, C. de J.; ANDRADE, V. V. V.; ARÊDES, A.; PEREZ, V. H. Produção de biodiesel: considerações sobre as diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas de processos. **Perspectivas online Ciências Biológicas e da Saúde**, v. 1, n. 1, p. 21-47, 2011.

DÍAZ, G. C.; CRUZ, Y. R.; ROSSA, V.; CARVALHO, L. G.; VIÊGAS, C. V. (Org.) **Tecnologias para produção de biodiesel a partir do óleo de cozinha usado**. Maringá (PR): Uniedusul, 2019, 114p.

DUARTE, V. H.; VALENTINI, M. H. K.; SANTOS, G. B. dos; NADALETTI, W. C.; VIEIRA, B. Biocombustíveis: uma revisão sobre o panorama histórico, produção e aplicações do biodiesel. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 4, n. 2, p. 50-68, 2022.

FANTINEL, A. L. **Análise da produção de Biodiesel em pequenas unidades de processamento empregando óleos residuais como matéria-prima**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

FERREIRA, E. S.; FLECK, L. Avaliação da geração e descarte de filtros de cigarros pelos acadêmicos da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS, Mundo Novo). **Revista Eixo**, v. 10, n. 1, p. 65-74, 2021.

FERNANDES, R. K. M.; PINTO, J. M. B.; MEDEIROS, O. M. D.; PEREIRA, C. D. A. Biodiesel a partir de óleo residual de fritura: alternativa energética e desenvolvimento sócio-ambiental. **XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, v. 13, 2008.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades 2010**: Informações sobre os municípios brasileiros. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ms/mundo-novo/panorama>. Acesso em: 02 set. 2023.

KEDIR, W. M.; ASERE, T. G. Biodiesel production from waste frying oil using catalysts derived from waste materials. **Journal of the Turkish chemical society section A: Chemistry**, v. 9, n. 3, p. 939-952, 2022.

LIN, B.; XU, B. How does fossil energy abundance affect China's economic growth and CO₂ emissions? **Science Of The Total Environment**, v. 719, p. 1-11, 2020.

MARTINS, G. A. S.; PELUZIO, J. M.; ALMEIDA, L. J.; ADORNO, W. T.; MOURA, B. A. Otimização da transesterificação de óleo de soja produzido no estado do Tocantins. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 21, p. 1452-1459, 2015.

MEDEIROS, B. T.; SANTOS, S. C. da C; FAUSTINO, R. P.; FORMIGONI, M. R. de A. A aplicabilidade da logística reversa na reciclagem do óleo vegetal usado. **Revista Fatec Sebrae**, v. 5, n. 8, p. 52-63, 2018.

MELO, V. M.; FERREIRA, G. F.; FREGOLENTE, L. V. Sustainable catalysts for biodiesel production: the potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 189, part B, p. 114042, 2024.

NASCIMENTO, M. R; NÓBREGA, V. O; SOUZA, A. O. Purificação e caracterização de óleos residuais de frituras domésticas visando reaproveitamento. **Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido**. v. 1, 2018.

RODRIGUES, M. R.; IEMMA, A. F. **Experimental design and process optimization**. 2^a. ed. São Paulo: 2014.

ROSSI, Z. G.; BORGES, I. R.; PEREGO, T. F.; TOLEDO, V. D. M.; FERREIRA, L. F. P. technical analysis of biodiesel production from residual fry oil. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v. 4, n. 1, p. 101-108, 2018.

SILVA, T. A. R. Reciclagem de óleo de fritura para produção de biodiesel: caracterização físico-química e análise termogravimétrica. **Revista SODEBRAS**, v. 8, n. 85, p. 58-62, 2013.

SOMERVILLE, C.; YOUNGS, H.; TAYLOR, C.; DAVIS, S. C.; LONG, S. P. Feedstock for lignocellulosic biofuels. **Science**, v. 329, n. 5993, p. 790-792, 2010.

SOUSA, D. B. de; YOTSUDA, E. R.; MENDES, F. B.; AKISUE, R. A. Estudos comparativos das culturas de soja e dendê com foco na produção de biodiesel. **Scientia vitae**, v. 14, n. 38, p. 32-45, 2022.

VERNERSBACH, A.; SANTOS, A. dos; PORTO, F.; CHAMBRIARD, M.; EVANGELISTA, M. **A visão dos especialistas sobre a importância do biodiesel no cenário energético global**. FGV Energia, 2021.

VILAR, N. A.; BRITO, F. J. A.; NASCIMENTO, J. V. S.; SOUSA, R. C.; BARBOSA, S. A. Transesterificação homogênea alcalina do óleo de fritura viabilizando o uso do etanol. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 92283-92297, 2020.

YORK, R.; BELL, S. E. Energy transitions or addition?: Why a transition from fossil fuels requires more than the growth of renewable energy. **Energy Research & Social Science**, v. 51, p. 40-43, 2019.

WANG, J.; ZHOU, Y.; COOKE, F. L. Low-carbon economy and policy implications: a systematic review and bibliometric analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 65432-65451, 2022.

ZOU, C.; ZHAO, Q.; ZHANG, G.; XIONG, B. Energy revolution: from a fossil energy era to a new energy era. **Natural Gas Industry B**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.