

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE CÁRTAMO (CARTHAMUS TINCTORIUS L.): ANÁLISE DAS CONDIÇÕES IDEAIS

Optimization of the biodiesel production process from safflower oil (carthamus tinctorius L.): analysis of ideal conditions

Optimización del proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de cártamo (carthamus tinctorius L.): análisis de condiciones ideales

DOI: 10.23900/artefactum.v25i2.2794

Submitted on: 4.14. 2026

Accepted on: 5.12. 2026

Published on: 5.19.2026

Adriana Carla de Oliveira Lopes

Doutora em Materiais

E-mail: carla.oliveira.lopes@gmail.com

Alexandre Muniz Siqueira de Souza

Mestre em Ciências Agrárias

E-mail: alexandre.souza@belojardim.ifpe.edu.br

Simone da Silva Ramos

Graduanda em Engenharia de Produção

E-mail: simone.ramos@arapiraca.ufal.br

Giancarlo Lima Torres

Mestre em Informática

E-mail: giancarlo.engenheiro@gmail.com

Luanda Regina Reis Lima

Doutora em Engenharia de Produção

E-mail: luandar.lima@gmail.com

Mirian Batista de Oliveira Bortoluzzi

Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional

E-mail: mirian_bortoluzzi@ufms.br

Maycon Teixeira Minucelli

Mestre em Engenharia de Produção

E-mail: maycon@univag.edu.br

Fernanda Raquel Roberto Pereira

Mestre em Engenharia de Produção

E-mail: fernandaraquel_@hotmail.com.br

José Eduardo Milton de Santana

Doutor em Matemática

E-mail: eduardo.santana@penedo.ufal.br

Matheus Barbosa Moreira Cedrim

Doutor em Engenharia Civil

E-mail: matheuscedrim@hotmail.com

Fernando Silva de Carvalho

Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento

E-mail: fernandoscavvalho80@gmail.com

Carlos Alberto Inácio da Silva

Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento

E-mail: calberto.eng07@gmail.com

Antônio Venâncio de Moura Lacerda Filho

Doutor Engenharia Eletrica

E-mail: antoniovmlf@gmail.com

André Almeida Silva

Doutor em Ciência da Propriedade Intelectual

E-mail: andre.almeida@arapiraca.ufal.br

Rayane Mayara Tenório Malaquias

Graduada em Engenharia de Produção

E-mail: rayane.malaquias2016ft@gmail.com

RESUMO

O consumo de energia e petróleo aumenta a cada dia no mundo. Por essa razão, a poluição do ar cresce paralelamente ao consumo de energia, afetando negativamente o padrão de vida das pessoas. O esgotamento dos combustíveis fósseis, o aumento da demanda energética e as rigorosas normas de emissão tornam necessários combustíveis alternativos, como o biodiesel, para aplicações em motores, que possam reduzir a diferença entre a fonte de energia e a demanda. O biodiesel é transportável, renovável e biodegradável. É obtido a partir de diversas fontes de matérias-primas naturais, como gordura animal e os óleos de sementes oleaginosas. Neste estudo, utilizou-se óleo de cártamo para a produção de biodiesel e obtenção das condições ideais deste processo. O biodiesel foi produzido, neste trabalho, através da transesterificação do óleo de cártamo com etanol e hidróxido de potássio (KOH) como catalisador. A caracterização deste óleo foi feita via cromatografia gasosa, assim como para a obtenção das conversões em biodiesel. A influência de parâmetros-chave como temperatura de reação e razão molar etanol/óleo foi analisada utilizando a técnica do planejamento fatorial completo. Esses parâmetros do processo foram otimizados usando a metodologia de superfície de resposta (RSM). Os resultados obtidos estão em boa concordância com dados publicados para outros biodieséis de óleo vegetal. Um rendimento ótimo de 90,7% foi alcançado com condições ótimas de razão molar etanol/óleo, 10:1; e temperatura de reação de 70 °C. Esta

investigação demonstrou que o óleo de cártamo pode ser usado para produzir biodiesel com rendimentos consideráveis.

Palavras-chave: biodiesel, óleo de cártamo, rendimento de reação, variáveis de processo.

ABSTRACT

Energy and oil consumption increases daily worldwide. For this reason, air pollution grows in parallel with energy consumption, negatively impacting people's living standards. The depletion of fossil fuels, increased energy demand, and stringent emission standards necessitate alternative fuels, such as biodiesel, for engine applications, which can reduce the gap between energy source and demand. Biodiesel is transportable, renewable, and biodegradable. It is obtained from various natural raw material sources, such as animal fat and oilseed oils. In this study, safflower oil was used for biodiesel production and to obtain the ideal conditions for this process. In this work, biodiesel was produced through the transesterification of safflower oil with ethanol and potassium hydroxide (KOH) as a catalyst. The characterization of this oil was performed via gas chromatography, as was the process for obtaining the biodiesel conversions. The influence of key parameters such as reaction temperature and ethanol/oil molar ratio was analyzed using the full factorial design technique. These process parameters were optimized using response surface methodology (RSM). The results obtained are in good agreement with published data for other vegetable oil biodiesels. An optimum yield of 90.7% was achieved under optimum conditions of ethanol/oil molar ratio, 10:1; and reaction temperature of 70 °C. This investigation demonstrated that safflower oil can be used to produce biodiesel with considerable yields.

Keywords: biodiesel, safflower oil, reaction yield, process variables.

RESUMEN

El consumo de energía y petróleo aumenta diariamente en todo el mundo. Por esta razón, la contaminación del aire crece paralelamente al consumo energético, impactando negativamente en el nivel de vida de las personas. El agotamiento de los combustibles fósiles, el aumento de la demanda energética y las estrictas normas de emisiones hacen necesarios combustibles alternativos, como el biodiésel, para aplicaciones en motores, lo que puede reducir la brecha entre la fuente de energía y la demanda. El biodiésel es transportable, renovable y biodegradable. Se obtiene a partir de diversas materias primas naturales, como grasas animales y aceites de semillas oleaginosas. En este estudio, se utilizó aceite de cártamo para la producción de biodiésel y para obtener las condiciones ideales para este proceso. En este trabajo, el biodiésel se produjo mediante la transesterificación de aceite de cártamo con etanol e hidróxido de potasio (KOH) como catalizador. La caracterización de este aceite se realizó mediante cromatografía de gases, al igual que el proceso para obtener las conversiones de biodiésel. La influencia de parámetros clave como la temperatura de reacción y la relación molar etanol/aceite se analizó utilizando la técnica de diseño factorial completo. Estos parámetros del proceso se optimizaron utilizando la metodología de superficie de respuesta (RSM). Los resultados obtenidos concuerdan con los datos publicados para otros biodiesels de aceites vegetales. Se alcanzó un rendimiento óptimo del 90,7 % en condiciones óptimas de relación molar etanol/aceite de 10:1 y temperatura de reacción de 70 °C. Esta investigación demostró que

el aceite de cártamo puede utilizarse para producir biodiesel con rendimientos considerables.

Palabras clave: biodiesel, aceite de cártamo, rendimiento de la reacción, variables del proceso.

1 INTRODUÇÃO

O consumo total de energia em todo o mundo tem aumentado significativamente a cada dia devido ao crescimento da população mundial, ao aumento do comércio e da produção como resultado da industrialização e dos desenvolvimentos tecnológicos. O principal problema é que grande parte da energia consumida no mundo é proveniente de fontes de energia fósseis, como petróleo, carvão e gás natural. Os combustíveis fósseis desempenham um papel muito importante no mercado mundial de energia. Um dos maiores consumidores de combustíveis fósseis tem sido o setor de transportes. O diesel tem uma participação de mercado maior do que a gasolina em termos de perspectiva energética, especialmente em países em desenvolvimento (Fukuda *et al.*, 2001; Chandrasekhar *et al.*, 2023; Sá *et al.*, 2024). Além disso, a participação da demanda por diesel no setor de transportes deverá aumentar em diferentes proporções em muitos países. Também se prevê que o combustível diesel represente 70% da procura de combustíveis para transportes até 2040 a nível mundial (Paramesh, *et al.*, 2018; Sá *et al.*, 2024).

As emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis afetam negativamente tanto o meio ambiente quanto a saúde humana (Lopes, 2008; Miriam *et al.*, 2024). Além disso, as preocupações com o aquecimento global e as mudanças climáticas têm aumentado em todo o mundo. Os países têm se esforçado mais para enfrentar esses problemas. Reduzir as emissões de dióxido de carbono (CO₂), um gás nocivo, é o passo mais importante na luta contra o aquecimento global. O CO₂ é causado principalmente pela queima de combustíveis fósseis. Além disso, os motores de ignição por compressão (IC) emitem níveis mais elevados de CO₂ e outros poluentes atmosféricos nocivos, como óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP) e dióxido de enxofre (SO₂), etc. A redução das emissões nocivas pode ser alcançada por meio de novos desenvolvimentos na tecnologia de motores e até mesmo pela aplicação de combustíveis alternativos. Além

disso, a diversidade de fontes de energia precisa ser aumentada para atingir baixos níveis de emissão de CO₂. Por outro lado, o mundo enfrenta há muito tempo o risco de esgotamento dos combustíveis fósseis devido ao uso indiscriminado. Além disso, o esgotamento das reservas de petróleo em um futuro próximo e o aumento da preocupação ambiental em dimensões socioeconômicas têm impulsionado pesquisas para o desenvolvimento de combustíveis alternativos e sustentáveis a partir de fontes renováveis, baratas e ambientalmente amigáveis. O declínio das reservas de petróleo e o aumento do preço têm forçado as pessoas a buscar fontes alternativas de energia. Por todos esses motivos, combustíveis renováveis, sustentáveis e economicamente viáveis precisam ser considerados com urgência pelos países. Portanto, tem havido um crescente interesse em combustíveis alternativos, como o biodiesel, para aplicações em motores a diesel em todo o mundo (Sá *et al.*, 2024; Ülgen *et al.*, 2025).

O biodiesel pode ser descrito como uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos de cadeia longa que atendem aos padrões especificados (Fukuda *et al.*, 2001, Lopes, 2008). Ele pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas, como óleos vegetais comestíveis ou não comestíveis, gorduras animais, óleos de algas e óleos residuais (Fukuda *et al.*, 2001; Paramesh, *et al.*, 2018). Por outro lado, mais de 95% da produção mundial de biodiesel é feita a partir de óleos vegetais comestíveis. Embora os óleos não comestíveis sejam matérias-primas consideráveis para a indústria de biodiesel, visando reduzir custos e evitar a controvérsia entre alimentos e combustíveis, a maioria dos países utiliza óleos comestíveis devido à sua produção agrícola. Os óleos de canola, soja, girassol e palma são considerados matérias-primas comestíveis cruciais quando se avaliam as potenciais matérias-primas para a produção de biodiesel em todo o mundo (Lopes, 2008; Brahma *et al.*, 2022). O óleo de semente de cártamo (*Carthamus tinctorius L.*) é uma matéria-prima comestível promissora para a indústria de biodiesel, é obtido a partir das sementes da planta *Carthamus tinctorius L.*, que possui espinhos e é originária de áreas secas da Índia e do Oriente Médio, adaptando-se bem a climas áridos. Com uma história de cultivo que remonta a mais de 4.000 anos, esse óleo é uma fonte abundante de ácidos graxos essenciais, como ômega-6 e ômega-9, sendo amplamente empregado como um suplemento nutricional. Oguz *et al.* (Sá *et al.*, 2024; Ülgen *et al.*, 2025) indicaram que o cártamo pode se destacar em termos de sustentabilidade e propriedades combustível. Portanto, o óleo de *C. tinctorius* é uma matéria-prima importante e econômica para a

produção de biodiesel. É provável que o interesse das autoridades por essas oleaginosas aumente nos próximos anos e que elas sejam apresentadas como uma nova matéria-prima tanto para o setor alimentício quanto para a indústria de biodiesel, com a promoção dessa cultura. É evidente a necessidade de um estudo detalhado da literatura sobre a planta *C. tinctorius* e seu biodiesel, considerando esse contexto.

2 OBJETIVO

O presente estudo teve por objetivo desenvolver e otimizar o processo de produção de biodiesel a partir do óleo de cártamo (*carthamus tinctorius* L.) e estabelecer as condições ideais desse processo.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Devido ao impacto ambiental e às consequências relacionadas ao uso de combustíveis fósseis (especialmente devido à sua contribuição para os gases de efeito estufa), o uso de alternativas como as energias renováveis é necessário. De fato, existe uma preocupação real com a conservação ambiental, e muitos países e agências internacionais estão promovendo energias renováveis, como os biocombustíveis (Ramadhas *et al.*, 2004; Paramesh *et al.*, 2018).

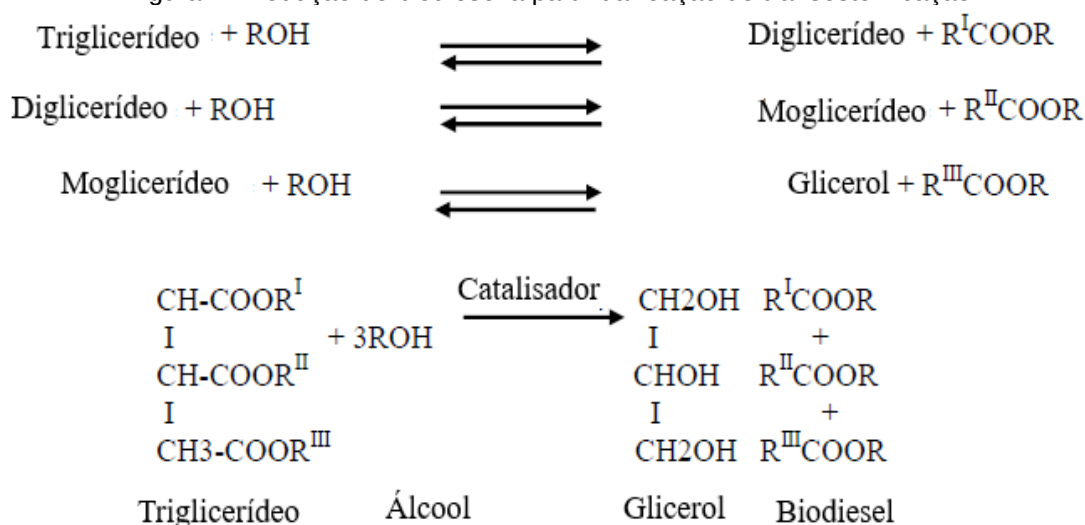
As principais vantagens relacionadas ao uso do biodiesel são as baixas emissões de CO₂ e CO, a biodegradabilidade, a segurança no armazenamento, a combustão eficiente, o baixo teor de enxofre, a lubricidade e o bom desempenho em motores a diesel, entre outras (Lopes, 2008; Farokhi *et al.*, 2023). No que diz respeito à contribuição para os países em desenvolvimento ou economias emergentes, o uso do biodiesel poderia contribuir para a independência energética desses países, uma vez que muitas matérias-primas disponíveis nessas áreas podem ser adequadas para a produção de biodiesel, tornando o desenvolvimento econômico mais sustentável (Dincer, 2000; Lopes, 2008; Sá *et al.*, 2024).

Para a produção de biodiesel, o uso de plantas oleaginosas é comum, juntamente com outras, como gorduras animais e óleos de fritura.

O processo de transesterificação consiste em uma sequência de três reações reversíveis consecutivas (Figura 1). Isto é, a conversão de triglicerídeos em diglicerídeos,

seguida pela conversão de diglicerídeos em monoglicerídeos (Fukuda *et al.*, 2001; Lopes, 2008). Os glicerídeos são convertidos em glicerol, produzindo uma molécula de éster em cada etapa. As propriedades desses ésteres são comparáveis às do diesel (Lopes, 2008; Avhad *et al.*, 2015). A reação geral de transesterificação pode ser representada pelo seguinte esquema de reação.

Figura 1. Produção de biodiesel a partir da reação de transesterificação.



Onde: RI, RII e RIII são hidrocarbonetos de cadeia longa.

Fonte: Elaborada pelos autores

O óleo de cártamo é obtido a partir das sementes da planta *Carthamus tinctorius*, (Figura 2) cujas flores e sementes são amplamente utilizadas para propósitos terapêuticos em várias nações asiáticas. Este óleo é predominantemente formado por ácidos graxos, sendo o ácido linoleico (ômega-6) o principal componente, e em menores proporções, o ácido oleico (ômega-9). Essas gorduras são consideradas benéficas, pois estão ligadas à diminuição do risco de problemas cardiovasculares (Sá *et al.*, 2024; Ülgen *et al.*, 2025).

Figura 2. planta *Carthamus tinctorius*



Fonte: Sá *et al.*, 2024

Entretanto, ainda não existem provas científicas que comprovem os efeitos do óleo de cártamo, bem como sua eficácia e segurança em relação à suplementação. Pesquisas realizadas em animais não demonstraram vantagens para a saúde.

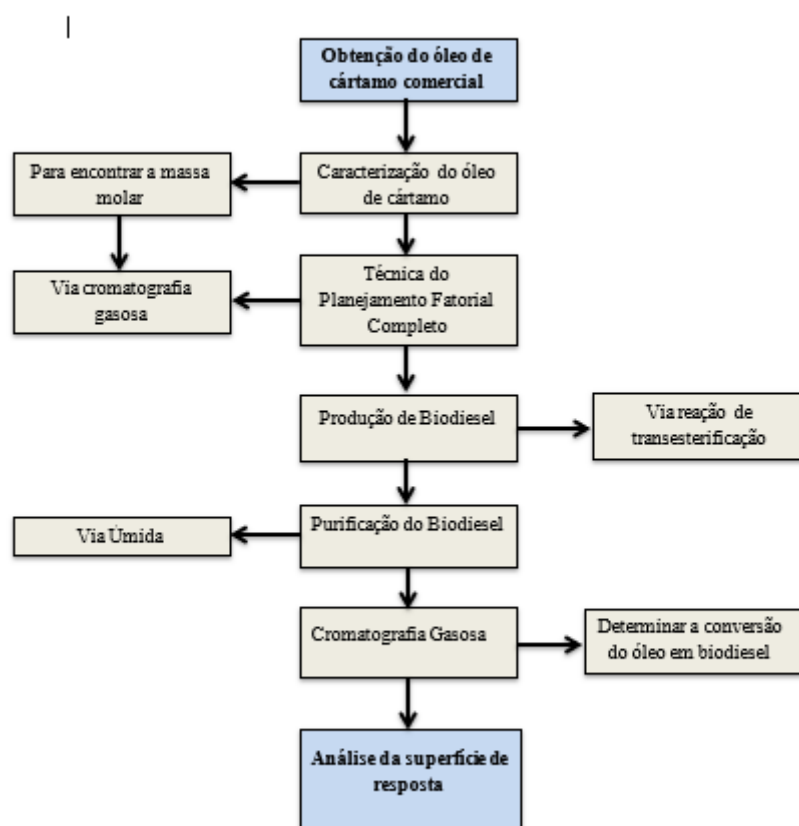
Considerando o cártamo, uma cultura com muitas aplicações (para produção de óleo e corante natural, entre outras) e amplamente utilizada em muitos países (a maioria com climas secos), como Índia, Etiópia, Estados Unidos, México, Austrália, Argentina, Brasil, Romênia, etc. (Deviren e Aydın, 2023; Sá *et al.*, 2024; Ülgen *et al.*, 2025), ele poderia ser um biodiesel adequado, pois atende às condições e vantagens mencionadas anteriormente. Além disso, o rendimento de sementes é de cerca de 800–900 kg ha⁻¹, o que representa uma produção interessante (Deviren e Aydın, 2023; Sá *et al.*, 2024). Dessa forma, pode ser uma cultura alternativa em alguns países desenvolvidos e em áreas com chuvas sazonais. Em geral, o biodiesel de cártamo tem sido amplamente estudado na literatura, com atenção ao seu desempenho em motores a diesel (Deviren e Aydın, 2023; Ülgen *et al.*, 2025), produção e estabilidade oxidativa.

No Brasil, o cártamo tem se destacado como uma oleaginosa com potencial para desenvolvimento e crescimento no semiárido nordestino. Embora o semiárido seja inadequado para muitas culturas, o cultivo do cártamo pode trazer benefícios econômicos para os agricultores locais e contribuir para a recuperação de áreas em processo de desertificação.

4 METODOLOGIA

Para a produção do biodiesel de cártamo, via reação de transesterificação foram executadas as seguintes etapas, conforme Figura 3:

Figura 3. Fluxograma do procedimento experimental para a produção do biodiesel de cártamo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

4.1 REAGENTES UTILIZADOS

Como reagentes foram utilizados: O óleo de cártamo, o álcool etanol anidro P.A. e o catalisador hidróxido de potássio (KOH) P.A., todos obtidos comercialmente.

4.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Utilizando a técnica do planejamento experimental fatorial completo descrita por Neto *et al.* (2001), foi executado um planejamento fatorial completo com dois níveis e duas variáveis, correspondendo a quatro experimentos, que realizados em duplicata resulta no total de oito experimentos, para os quais as variáveis selecionadas bem como os níveis inferior (-1) e superior (+1) foram:

- A temperatura de reação, utilizando os limites 30 °C para o limite inferior, sendo atribuído o valor -1 pela técnica do planejamento experimental fatorial completo e 70°C para o limite superior, sendo atribuído o valor +1 pela técnica do planejamento experimental fatorial completo.
- A razão molar óleo/álcool etanol, utilizando os limites 1:4 para o limite inferior, sendo atribuído o valor -1 pela técnica do planejamento experimental fatorial completo e 1:10 para o limite superior, sendo atribuído o valor +1 pela técnica do planejamento experimental fatorial completo.

A resposta de interesse foi a conversão do óleo de cártamo em biodiesel. As conversões dos experimentos foram obtidas via cromatografia gasosa (CG). A Tabela 1, apresenta as variáveis de processo analisadas, bem como os intervalos analisados.

Tabela 1. Intervalo de estudo das variáveis – Processo de eletrofiação	
Variável	Intervalo
Temperatura de reação (°C)	30-70
Razão molar óleo/álcool etanol	1:4-1:10

Fonte: Elaborada pelos autores

A ferramenta utilizada para efetuar os cálculos e obter estes efeitos principais das variáveis selecionadas, foi o programa SMATH Studio, versão free, este programa permitiu a realização dos cálculos algébricos, tais como produtos matriciais, presentes nos modelos matemáticos da técnica estatística aqui mencionada. E para a obtenção da superfície de resposta foi utilizado o programa MATLAB versão free.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As reações de transesterificação, bem como os processos de purificação do

biodiesel serão realizadas segundo a metodologia de Lopes (2008).

O óleo de cártamo foi caracterizado via cromatografia gasosa (CG) para a obtenção da sua massa molecular, uma vez que esta é fundamental para os cálculos estequiométricos, cálculos estes usados para a obtenção das massas do etanol e do catalisador KOH, utilizados na reação de transesterificação. A massa molecular do óleo de cártamo obtida via cromatografia gasosa (CG) foi de 875,2 g/mol.

A quantidade deste óleo foi fixada em 60 g (gramas) e adicionada a um balão de fundo redondo, bem como a quantidade do catalisador básico hidróxido de potássio (KOH), utilizado para aumentar a velocidade de reação, o mesmo foi utilizado na quantidade de 1% em peso com relação a massa do óleo de cártamo utilizada, já quantidades de etanol anidro (álcool utilizado nas reações) seguiram os valores do planejamento de experimentos, de acordo com o intervalo de estudo das variáveis óleo/álcool etanol (1:4-1:10). O catalisador foi adicionado ao álcool gerando uma mistura homogênea, a qual foi adicionada ao óleo iniciando a reação de transesterificação, conforme Figura 4.

Figura 4. Reação de transesterificação para a produção do biodiesel de cártamo



Fonte: Elaborada pelos autores

Após cada ensaio de produção do biodiesel, o mesmo foi submetido ao processo de purificação, a mistura reacional foi introduzida a um funil de separação, onde foram adicionados, primeiramente, 50 mL de uma solução de ácido sulfúrico 1% para neutralizar o catalisador básico KOH, e após esta etapa o biodiesel foi purificado através da lavagem com água destilada. No fim de cada operação de lavagem, o pH (potencial hidrogeniônico) da água utilizada foi medido e comparado com o da água destilada pura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As conversões (% massa) do óleo de cártamo em biodiesel foram determinadas por cromatografia gasosa (CG) e estão exibidas na Tabela 2. Além disso, as condições experimentais necessárias para cada conversão estão descritas na mesma. Na abordagem do planejamento fatorial completo, emprega-se -1 para indicar o limite inferior e +1 para denotar o limite superior do intervalo das variáveis analisadas.

Tabela 2. Matriz de experimentos do planejamento fatorial completo contendo os resultados referentes as conversões do óleo de cártamo em biodiesel

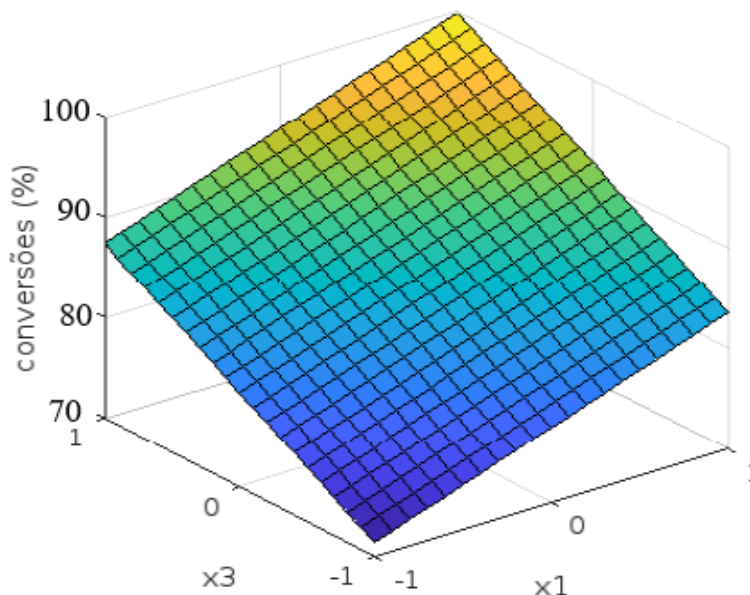
Experimento	Temperatura de reação (°C)	Razão molar óleo/álcool	Média da conversão do óleo de cártamo em biodiesel (%)
1	30/-1	1:4/-1	57,95
2	70/+1	1:4/-1	90,52
3	30/-1	1:10/+1	81,05
4	70/+1	1:10/+1	93,54

Fonte: Elaborada pelos autores

O termo média da conversão se deve ao fato de que cada experimento foi realizado em duplicata, e, em seguida, calculou-se uma média aritmética das duas conversões obtidas.

Depois de realizar todas as reações e obter os valores numéricos da conversão (%massa) do óleo de cártamo em biodiesel, foi obtida a superfície de resposta, conforme Figura 5.

Figura 5. Superfície de respostas



Fonte: Elaborada pelos autores

Ao examinar a superfície de respostas, nota-se que, nos intervalos analisados, as maiores conversões do óleo de cártamo em biodiesel ocorreram em temperaturas elevadas e altas razões molares óleo/álcool.

A teoria do equilíbrio químico, que se aplica a reações reversíveis como a transesterificação do biodiesel, pode explicar esses resultados. Essa teoria afirma que, à medida que a temperatura aumenta, em uma reação endotérmica (que absorve energia), o equilíbrio tende a se deslocar em direção à formação dos produtos da reação.

A teoria do equilíbrio químico também afirma que, quando há um aumento na concentração do reagente — como ocorreu com o etanol, cuja quantidade em mols passou de 4 para 10 —, o equilíbrio é deslocado para o lado da formação dos produtos, o que eleva a conversão do reagente em produto.

6 CONCLUSÃO

Ao término deste estudo, foram obtidas amostras de biodiesel com conversões superiores a 50%. Esses resultados tornam viáveis os investimentos para a produção de biodiesel a partir do óleo de cártamo. Além de suas várias aplicações atuais, o biodiesel pode ser utilizado como um combustível menos prejudicial ao meio ambiente em contraste

com o diesel de petróleo, ao mesmo tempo em que proporciona uma fonte de renda para famílias envolvidas na produção do biodiesel. Foi verificado, também, que os fatores que afetam a produção de biodiesel de cártamo correspondem a temperatura de reação e a razão molar óleo/álcool etanol.

A teoria do equilíbrio químico pôde justificar os resultados obtidos em relação ao efeito das variáveis. Este estudo mostrou que o óleo de cártamo pode ser usado para produzir biodiesel com rendimentos bastante satisfatórios. Além disso, foram apresentadas as condições operacionais ideais para a produção desse biocombustível.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal de Alagoas-UFAL, a Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP do Campus de Ilha Solteira, a Universidade de Pernambuco-UPE, e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas-IFAL.

REFERÊNCIAS

BRAHMA, Sujata *et al.* Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. **Chemical Engineering Journal Advances**, v. 10, p. 100284, maio, 2022.

CAMPOS-CARRIEDO, F.; BARGIACCHI, E.; DUFOUR, J.; IRIBARREN, D. How can the European Ecodesign Directive guide the deployment of hydrogen-related products for mobility? **Sustainable Energy and Fuels**, v. 7, n. 6, p. 1382–1394, 2023.

CAMPOS-CARRIEDO, F.; PÉREZ-LÓPEZ, P.; DUFOUR, J.; IRIBARREN, D. A parametric life cycle framework to promote sustainable-by-design product development: Application to a hydrogen production technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 469, n. June, 2024.

CHANDRASEKHAR, Thummala *et al.* Algae: the reservoir of bioethanol. **Fermentation**, v. 9, n. 8, p. 712, 2023.

DEVIREN, H.; AYDIN, H. Production and physicochemical properties of safflower seed oil extracted using different methods and its conversion to biodiesel. **Fuel**, 343, 128001, 2023.

DINCER, Ibrahim. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 4, n. 2, p. 157-175, 2000.

FAROKHI, Ghazaleh; SAIDI, Majid; NAJAFABADI, Ali Taheri. Application of spinel Type $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_2\text{O}_4$ magnetic nanocatalysts for biodiesel production from neem seed oil: Catalytic performance evaluation and optimization. **Industrial Crops and Products**, v. 192, p. 116035, 2023.

FUKUDA, Hideki; KONDO, Akihiko; NODA, Hideo. Biodiesel fuel production by transesterification of oils. **Journal of bioscience and bioengineering**, v. 92, n. 5, p. 405-416, 2001.

KARMAKA, R.; KUMAR, N.; MANDAL, A.; CHA, D. MITRA, D.; Ragit, S. Emissions and performance analysis of a variable compression ratio engine fueled with safflower oil methyl ester-diesel blends. *Bioresource Technology Reports*. v. 33, 102568, 2026.

KUMAR, Venugopalan Santhosh; NAVARATNAM, Visweswaran. Neem (*Azadirachta indica*): Prehistory to contemporary medicinal uses to humankind. **Asian Pacific journal of tropical biomedicine**, v. 3, n. 7, p. 505-514, 2013.

LOPES, Adriana Carla de Oliveira. **Estudo das Variáveis de Processo na Produção e na Purificação do Biodiesel de Soja via Rota Etílica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Unidade Acadêmica do Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

MENEGHETTI, Simoni P.; MENEGHETTI, Mario Roberto; BRITO, Yariadner C. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 63-73, 2013.

MIRIAM, L. R Monisha *et al.* Enhanced FAME production using green catalyst with superior profile from the isolated halophilic *Aphanothece halophytica* grown in raceway ponds. **Energy Conversion and Management**, v. 151, p. 63-72, 2017.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. Como Fazer Experimentos: Pesquisa E Desenvolvimento Na Ciência E Na Indústria. Grupo A-Bookman, 2000.

PARAMESH, K. *et al.* Enhancement of biological hydrogen production using green alga *Chlorococcum minutum*. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 43, n. 8, p. 3957-3966, 2018.

RAMADHAS, A.S. *et al.* Muraleedharan, Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—a review, **Renewable Energy** 29, pp. 727–742, 2004.

SÁ, M. H. DE. Electrochemical Devices to Power a Sustainable Energy Transition—An Overview of Green Hydrogen Contribution. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 14, n. 5, 2024.

SÁ, M. H. DE; COSTA, R.; PEREIRA, C. M. Boosted carbon electrocatalytic effect towards sensing and green energy applications by tailoring the catalyst-support interface on a nature-inspired solution. **Electrochimica Acta**, v. 482, n. February, 2024.

SAKTHIVEL, G. *et al.* Comparative analysis of performance, emission and combustion parameters of diesel engine fuelled with ethyl ester of fish oil and its diesel blends. **Fuel**, v. 132, p. 116-124, 2014.

ÜLGEN, A. I. *et al.* High proportion of biofuel replacement for conventional diesel using safflower biodiesel and diethyl ether blends in a CNG-powered RCCI operation of a diesel engine. **Renewable Energy**, V. 246, 122919, 15, 2025.