

**Análise da influência da temperatura e do tempo na transesterificação direta da
Nannochloropsis Oculata para produção de biodiesel**

**Analysis of the influence of temperature and time on direct transesterification of
Nannochloropsis Oculata for biodiesel production**

**Análisis de la influencia de la temperatura y el tiempo en la transesterificación directa
de *Nannochloropsis Oculata* para la producción de biodiesel**

Recebido: 18/05/2020 | Revisado: 20/05/2020 | Aceito: 23/05/2020 | Publicado: 30/05/2020

Daiana Galina

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7332-2655>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: daiana_galina@hotmail.com

Vinícius Molini Benedito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5337-0898>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: vinicius.mb@hotmail.com

Rodrigo Randow de Freitas

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0170-6892>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: digorandow@gmail.com

Paulo Sérgio da Silva Porto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6486-7813>

Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

E-mail: pssporto@gmail.com

Resumo

O biodiesel possui um grande potencial para substituir o diesel de petróleo. Apesar de sua produção a partir de microalgas gerar várias vantagens ambientais (consumo de dióxido de carbono atmosférico e efluentes podem ser usados como fonte de nutrientes), ele apresenta dificuldades para ser implementado na matriz energética de diversos países devido ao seu

elevado custo associado às muitas etapas do processo de produção. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo principal analisar a influência das variáveis temperatura e tempo na produção do biodiesel via transesterificação direta de biomassa de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata*, identificando as condições que proporcionam rendimento máximo do extrato rico em biodiesel. Por meio do método experimental realizado foi possível cultivar microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata* e, a partir da biomassa obtida, produzir biodiesel através da reação de transesterificação direta. A formação de biodiesel foi verificada por meio da análise de FTIR que apontou a presença de ésteres no produto final, com os pontos de rendimento máximo sendo obtidos nas condições 70 °C e 60 min e a 110 °C e 60 min.

Palavras-chave: Cultivo; Bio-óleo; Microalgas.

Abstract

Biodiesel has great potential to replace petroleum diesel. Although its production from microalgae generates several environmental advantages (consumption of atmospheric carbon dioxide and effluents can be used as a source of nutrients), it presents difficulties to be implemented in the energy matrix of several countries due to its high cost associated with many stages of the production process. Thus, the present work has as main aim to analyze the influence of the temperature and time variables in the production of biodiesel via direct transesterification of microalgae biomass of the species *Nannochloropsis oculata*, identifying the conditions that provide maximum yield of the extract rich in biodiesel. Through the experimental method, it was possible to grow microalgae of the species *Nannochloropsis oculata* and, from the biomass obtained, produce biodiesel through the direct transesterification reaction. The formation of biodiesel was verified by means of FTIR analysis that showed the presence of esters in the final product, with the maximum yield points being obtained in the conditions 70 °C and 60 min and at 110 °C and 60 min.

Keywords: Cultivation; Bio oil; Microalgae.

Resumen

El biodiesel tiene un gran potencial para reemplazar el diesel de petróleo. Si bien su producción a partir de microalgas genera varias ventajas ambientales (el consumo de dióxido de carbono atmosférico y los efluentes pueden usarse como fuente de nutrientes), presenta dificultades para implementarse en la matriz energética de varios países debido a su alto costo asociado con muchos etapas del proceso de producción. Así, el presente trabajo tiene como

meta principal analizar la influencia de las variables de temperatura y tiempo en la producción de biodiesel a través de la transesterificación directa de la biomasa de microalgas de la especie *Nannochloropsis oculata*, identificando las condiciones que proporcionan el máximo rendimiento del extracto rico en biodiesel. Mediante el método experimental, fue posible cultivar microalgas de la especie *Nannochloropsis oculata* y, a partir de la biomasa obtenida, producir biodiesel a través de la reacción de transesterificación directa. La formación de biodiesel se verificó mediante análisis FTIR que mostró la presencia de ésteres en el producto final, obteniéndose los puntos de máximo rendimiento en las condiciones de 70 °C y 60 min y a 110 °C y 60 min.

Palabras clave: Cultivo; Bio aceite; Microalgas.

1. Introdução

O uso massivo de combustíveis fósseis tem ocasionado diversos problemas ambientais e energéticos ao longo dos anos, justificando assim as pesquisas na área de combustíveis alternativos. Vários fatores são responsáveis por aumentar os níveis de produção dos biocombustíveis, como a busca pela redução da dependência do petróleo e dos preços elevados do mesmo, e a diminuição dos problemas climáticos e ambientais (Mendes, 2008).

Os biocombustíveis são produzidos a partir de biomassa renovável, sendo empregados diretamente, ou mediante alterações em motores a combustão interna, ou para outro tipo de geração de energia. Desta forma, os biocombustíveis podem substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil. Exemplos de biocombustíveis são o biodiesel, o etanol e outras substâncias estabelecidas em regulamento pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e, Biocombustíveis (ANP) (ANP, 2016).

Quando comparado aos combustíveis fósseis, os biocombustíveis emitem menos poluentes durante o processo de combustão e sua síntese consiste em um processo mais limpo. Assim, configura-se o biodiesel como um biocombustível bastante promissor, pois se trata de uma alternativa para substituição do óleo diesel, sendo que sua queima pode emitir em média 48% menos monóxido de carbono, 47% menos material particulado e 67% menos hidrocarbonetos, quando comparada a queima do diesel de petróleo (ANP, 2015).

Considerando as fontes de matérias-primas utilizadas, o biodiesel pode ser classificado em primeira, segunda e terceira geração. Quando de primeira geração, utiliza-se uma fonte comestível como, por exemplo, o óleo de soja. Já os de segunda e terceira geração são obtidos a partir de plantas não comestíveis e resíduos (Silva, 2014).

A fim de eliminar possíveis conflitos entre produção de biomassa e o setor alimentício, pesquisas estão em desenvolvimento e incluem modelos que evitam o uso massivo de terras para o cultivo da matéria-prima, um exemplo que se enquadra neste contexto é o aproveitamento da biomassa proveniente das microalgas (Arceo, 2012).

As microalgas apresentam um enorme potencial para suprir a crescente demanda de energia prevista para as próximas décadas, pois possuem várias vantagens quando comparadas com as culturas terrestres tradicionais na produção de biocombustíveis. O cultivo de microalgas não demanda de terras e água de qualidade e apresenta consumo de água menor do que o das plantas terrestres, podendo também reutilizar água residual em seu crescimento (Azeredo, 2012). Além disso, as microalgas fotossintetizantes apresentam uma alta eficiência na conversão da luz solar em biomassa, fazendo com que a produtividade seja muito maior do que as obtidas pelas principais culturas terrestres (Ortenzio, Amaral, Almeida & Oliveira, 2015).

A maioria das espécies de microalgas apresenta crescimento mais rápido que as plantas terrestres, possibilitando maior rendimento de biomassa. A capacidade de remoção do CO₂ do meio ambiente por esses organismos durante a fotossíntese consiste em um processo bastante eficaz de remoção deste gás da atmosfera (Procópio, 2014). As microalgas do gênero *Nannochloropsis* atraem cada vez mais o interesse de pesquisadores devido sua alta taxa de acumulação de biomassa e alto teor de lipídios (Mal, Wang, Yu, Yin & Zhou, 2014).

O biodiesel produzido a partir de microalgas ainda não apresenta valores competitivos no mercado. Isto se deve ao custo elevado de algumas etapas da produção, comprovando a necessidade de aperfeiçoar cada operação unitária inerente ao processo, na tentativa de tornar a produção de biodiesel a partir de microalgas economicamente viável. Uma das etapas que apresenta elevado custo é a extração do óleo que antecede a produção de biodiesel a partir de microalgas (Arceo, 2012).

Um método que tem se tornado promissor na redução do custo final do biodiesel é a transesterificação direta das microalgas, que elimina a etapa de extração do óleo. Este método simplifica a produção e reduz as unidades de processamento e, conseqüentemente, custo global do processo (Li et al., 2011). Assim, o presente estudo se justifica pela necessidade de investigar a possibilidade da remoção da etapa de extração do óleo na produção do biodiesel de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata*.

Com o exposto, o presente estudo tem como objetivo principal analisar a influência das variáveis temperatura e tempo na produção do biodiesel via transesterificação direta de

biomassa de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata*, identificando as condições que proporcionam rendimento máximo do extrato rico em biodiesel.

2. Metodologia

2.1. Cultivo das microalgas

Nessa etapa utilizaram-se parâmetros de cultivo adaptados da metodologia de Guillard (1975) e Lourenço (2006). O cultivo foi realizado em um fotobiorreator contendo água salgada e nutrientes, com lâmpadas de LED de cor branca (fonte de luz) com potência de 18 W e com bombas de aeração de ar (fonte de CO₂) de 3,5 W com vazão de 6 L min⁻¹.

Importante mencionar que, a fim de eliminar os microrganismos existentes, foi realizado um pré-tratamento da água utilizando cloro. Entretanto, antes da água ser adicionada ao meio de cultivo, o cloro foi completamente removido com a adição de 1 g de tiosulfato de sódio para cada 1 L de água salgada. Esse procedimento foi realizado, pois a presença de cloro causaria danos às microalgas (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentração dos componentes das soluções de fosfato, nitrato e silicato utilizadas no cultivo.

Solução	Composição	Concentração
Solução de Nitrato	Nitrato de Sódio	150 g L ⁻¹
	Cloreto de Ferro	13 g L ⁻¹
	EDTA	10 g L ⁻¹
Solução de Fosfato	Fosfato de Sódio	16 g L ⁻¹
	Vitamina B12	2 mL L ⁻¹
Solução de Sílica	Silicato de Sódio	60 g L ⁻¹

Fonte: Adaptado de Guillard (1975) e Lourenço (2006).

O início de cada cultivo ocorreu a partir de uma cepa de 1 L. Para tal, empregou-se duplicações do volume de solução com água salgada a cada 3 dias, seguido da adição dos nutrientes (nitrato, fosfato e silicato) na proporção 1 mL para 1 L de cultivo. Este processo

possibilitou alcançar um volume final de 128 L, à base de um ambiente ideal de luz e aeração (fonte de CO₂) para proporcionar às microalgas a realização da fotossíntese.

2.2. Extração da biomassa

No fim do cultivo, a biomassa foi separada por meio de adição de TANFLOC, um floculante natural, na proporção 0,375 g para 1 L de cultivo. Após adição do floculante, a biomassa passa por um processo de decantação e, aos poucos, tende a se concentrar no fundo do fotobiorreator. O processo de decantação ocorreu durante um período de 12 h, tempo permitido para deixar em repouso as microalgas em contato com TANFLOC. Finalizado esse prazo, a biomassa úmida concentrada foi filtrada utilizando-se uma bomba a vácuo. Na sequência, a biomassa foi submetida à secagem em estufa, exposta à temperatura de 60°C durante 48 h para obtenção da biomassa seca.

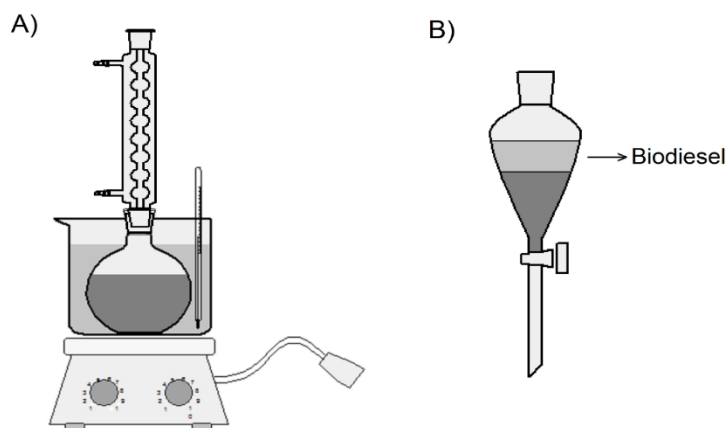
2.3. Produção do biodiesel

Para produção de biodiesel, por meio da transesterificação direta da biomassa seca, foram utilizados 5 g de biomassa, 17 mL de metanol, 20 mL de hexano (solvente) e 3 mL de ácido sulfúrico (catalisador). A proporção dos reagentes foi adaptada de Johnson e Wen (2009).

Na Figura 1 - A, observa-se o desenho esquemático do aparato experimental. Esse sistema consiste de um balão de fundo chato (reator) imerso em um recipiente com óleo de soja (banho de óleo), aquecido por uma chapa de aquecimento com agitação magnética. O recipiente contendo óleo de soja foi posicionado em cima da chapa a 100°C. O aquecimento foi monitorado por termômetro para avaliar a estabilização da temperatura do óleo, a qual foi estabelecida como temperatura de reação. Essa metodologia foi utilizada em cada experimento. Foi escolhido banho de óleo ao invés do banho de água devido ao fato do óleo proporcionar maior faixa de temperatura de operação. A temperatura máxima que a água pode atingir antes da ebulição é de 100°C, enquanto o óleo pode atingir 350°C. Os reagentes (biomassa, ácido sulfúrico, metanol e hexano) foram colocados no balão de fundo chato de 250 mL e, em seguida, adicionou-se um agitador magnético para proporcionar constante agitação à mistura dos reagentes no interior do reator. O balão foi inserido no banho de óleo para que, desta forma, a reação ocorresse em condições de agitação e aquecimento em

condições de temperatura controlada. Para evitar a perda dos reagentes voláteis, foi acoplado um condensador.

Figura 1 - A) Desenho esquemático do reator. B) Desenho esquemático do funil de separação contendo as duas fases da reação de transesterificação.



Fonte: Autores, 2020.

Ao final de cada reação, o produto obtido foi filtrado para remoção dos resíduos sólidos de biomassa. O filtrado foi colocado em um funil de separação (Figura 1 - B), durante 24 h, para que ocorresse a separação de fases de forma completa. A fase superior (biodiesel) foi separada e a massa determinada para o cálculo do rendimento mássico do extrato rico em biodiesel.

As condições operacionais foram empregadas em temperatura (90°C) e tempo (40 min), adaptado de Johnson & Wen (2009). Esses parâmetros foram adotados como ponto central. Os experimentos foram realizados seguindo um planejamento fatorial 3^2 , no qual as variáveis temperatura e tempo foram avaliadas em três níveis com duas repetições no ponto central (Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 - Variáveis e níveis estudados no planejamento fatorial 3^2 .

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Temperatura (°C)	70	90	110
Tempo (min)	20	40	60

Fonte: Autores, 2020.

Tabela 3 - Matriz do planejamento fatorial 3².

Experimentos	Variáveis	
	Temperatura (°C)	Tempo (min)
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	1
4	0	-1
5	0	0
6	0	1
7	1	-1
8	1	0
9	1	1
10	0	0
11	0	0

Fonte: Autores, 2020.

A variável resposta do planejamento fatorial consiste no rendimento mássico do extrato rico em biodiesel, que foi calculado seguindo a Equação 1.

$$\text{Rendimento mássico} = \frac{\text{massa do biodiesel}}{\text{massa da biomassa}} \times 100 \quad (1)$$

O resultado do planejamento experimental que apresentou maior rendimento mássico do extrato rico em biodiesel foi analisado quantitativamente quanto ao índice de acidez, e qualitativamente por espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Já a metodologia utilizada para calcular o índice de acidez foi adaptada de Gonçalves, Soares, Brasil e Nunes (2009), no qual em cada amostra de 2 g de biodiesel foi adicionada à 255 mL de solução 2:1 (volume: volume) de éter e etanol, e 3 gotas de fenolftaleína. Após a homogeneização da solução, esta foi titulada com uma solução 0,1 mol.L⁻¹ de NaOH com fator de correção (F) correspondente a 0,9421. O volume de NaOH gasto para neutralizar a amostra foi de 0,45 mL. O cálculo do índice de acidez foi determinado pela Equação 2.

$$Ac = \frac{V \times F \times 5,61}{P} \quad (2)$$

Em que: Ac = índice de acidez; V = volume (em mL) de NaOH utilizado para titular a amostra; F = fator de correção da solução de NaOH; 5,61 = equivalente em gramas de KOH; P = massa da amostra em gramas.

O método experimental foi realizado em triplicata, sendo o valor final correspondente à média.

A espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), foi realizada por meio de um espectrofotômetro no infravermelho com transformada de Fourier, Cary 630 FTIR, Agilent Technologies, operando na faixa espectral de 400 a 4000 cm^{-1} com 100 scans 2 cm^{-1} de precisão. A análise dos picos foi feita através da comparação com os valores de bandas absorção citadas por Barbosa (2007).

Por fim, o resultado do planejamento fatorial foi analisado estatisticamente seguindo o teste de hipótese utilizando a distribuição t-student com nível de significância de 5% para determinação dos parâmetros significativos do modelo de regressão.

3. Resultados e Discussão

Após cultivo com volume de 8 L, exposição de luz constante com a temperatura mantendo-se em cerca de 22°C, filtrou-se a vácuo, sendo a biomassa transferida para uma estufa de convecção natural, a 60°C por 48 h, para remover significativamente a presença de umidade. Ressalta-se que a filtração a vácuo permite não só remover a água para obtenção da biomassa, mas também consiste em uma possível forma de minimizar os custos. Isto pode ser feito por meio da reutilização da água filtrada em outro cultivo na sequência, pois esta, aparentemente, se encontra livre de impurezas.

Foi realizada a produção de biodiesel seguindo o planejamento de experimentos utilizando o metanol como agente transesterificante para facilitar o processo de separação de fases. Ao final de cada reação, o produto obtido foi filtrado para remover os resíduos sólidos da biomassa e, em seguida, o líquido passante foi colocado em um funil de separação onde foi possível observar a separação das duas fases, uma rica em biodiesel e outra em glicerol. O biodiesel obtido a partir da biomassa de microalga seca apresentou aspecto parcialmente límpido e coloração amarela.

Após a recuperação da fase superior (biodiesel) realizou-se a determinação da massa em balança digital para estimar o rendimento mássico do extrato rico em biodiesel de cada experimento (Tabela 4). De acordo com os dados obtidos, a condição de temperatura e tempo que proporcionou maior rendimento mássico do extrato rico em biodiesel foi 70°C e 60 min.

Tabela 4 - Resultado do rendimento mássico do extrato rico em biodiesel seguindo o planejamento fatorial 3^2 .

Experimento	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendimento (%)
1	70	20	132,4
2	70	40	130,0
3	70	60	151,0
4	90	20	135,6
5	90	40	127,3
6	90	60	112,8
7	110	20	137,0
8	110	40	146,2
9	110	60	147,8
10	90	40	131,4
11	90	40	131,6

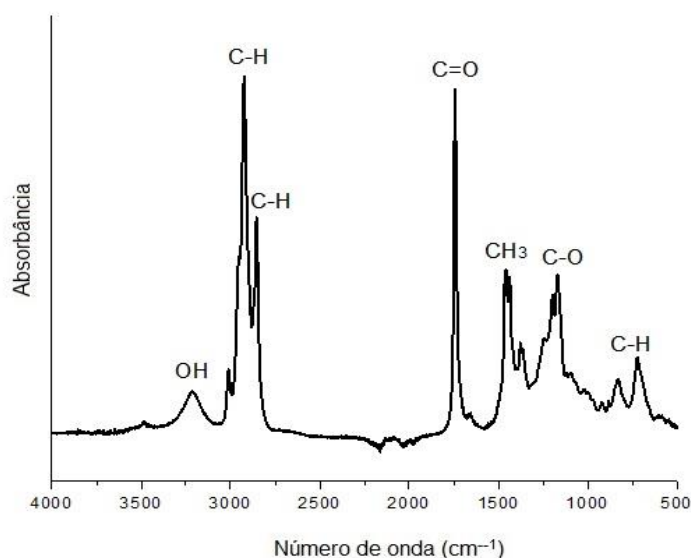
Fonte: Autores, 2020.

O resultado do planejamento experimental de maior rendimento (70°C e 60 min) foi analisado quantitativamente quanto ao índice de acidez e qualitativamente por FTIR. Quanto ao índice de acidez encontrado para o biodiesel produzido a 70°C e 60 min, esse foi de 1,1979 mg de KOH por grama de biodiesel com desvio padrão de 0,0975.

O Regulamento Técnico da Resolução ANP nº 45, de 25 de agosto de 2014, estabelece valor máximo de 0,50 (ANP, 2017), logo, o biodiesel produzido apresenta índice de acidez acima dos padrões. O alto teor de acidez da amostra pode ser justificado pela escolha do catalizador ácido para acelerar a formação de éster. Portanto, antes de ser utilizado como combustível o produto final necessita passar por um processo de neutralização a fim de diminuir a acidez. A acidez do biodiesel pode ser reduzida através da lavagem com solução alcalina de hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio, seguido de secagem ou desumidificação (Silva Filho, 2009).

Já para a espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), Figura 2, é possível observar o espectro da amostra de biodiesel produzido a 70°C e 60 min, onde a identificação da composição dos picos foi feita através da comparação com os valores das bandas absorção citadas por Barbosa (2007).

Figura 2 - Espectro no infravermelho da amostra de biodiesel.



Fonte: Autores, 2020.

Observa-se a presença do grupo funcional OH na banda de absorção 3300–3100 cm^{-1} , indicando a presença de metanol, o qual foi colocado em excesso para garantir a conversão em éster. Os grupos funcionais C-H (3000–2700 e 750–600 cm^{-1}), C=O (1750–1700 cm^{-1}), CH₃ (1500–1400 cm^{-1}) e C-O (1200–1150 cm^{-1}) são característicos dos ésteres e indicam a conversão dos reagentes em biodiesel.

Segundo Almeida (2009), a intensidade de uma banda de absorção é proporcional à concentração do componente que originou esta banda. Como observado, a maioria dos picos indicam a presença de ésteres, sendo também esses picos os de maiores intensidades. Logo, conclui-se que a mostra é rica em biodiesel.

Para a resposta rendimento, verificou-se que o termo quadrático da temperatura (X_1^2) é significativo para o modelo, visto que apresenta p-valor (0,01) inferior a 0,05. O efeito linear para a temperatura não é estatisticamente significativo, mas o efeito quadrático sim. É possível concluir que essa variável está associada à variável de resposta, mas a associação não é linear (Tabela 5).

Tabela 5 - Efeitos da temperatura (X1) e do tempo (X2) sobre o rendimento do extrato rico em biodiesel. Os valores em vermelho indicam os termos significativos.

Variável Resposta	Fator	Efeito	Desvio-padrão	t(5)	P-valor
Rendimento (%) R²= 0,99	Média	135,8778	0,7784	174,5516	< 0,0001
	X1	5,8667	1,9816	2,9606	0,0977
	X1²	-14,5667	1,5839	-9,1968	0,0116
	X2	2,2000	1,9816	1,1102	0,3825
	X2 ²	-0,6667	1,5839	-0,4209	0,7147
	X1X2	-3,9000	2,4269	-1,6070	0,2493
	X1X2 ²	7,7500	2,1018	3,6873	0,0663
	X1²X2	-18,7500	2,1018	-8,9210	0,0123
	X1 ² X2 ²	4,9250	1,5269	3,2255	0,0842

Fonte: Autores, 2020.

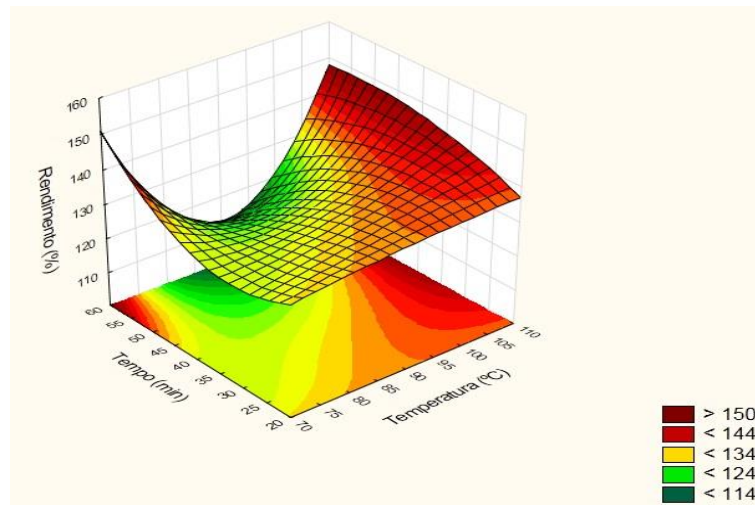
A interação entre o termo quadrático da temperatura com o termo linear do tempo (X1²X2) também se mostrou significativa para o modelo, pois apresenta p-valor (0,01) inferior a 0,05. O efeito linear para o tempo não é estatisticamente significativo, mas o efeito da interação do tempo com o quadrado da temperatura sim.

Os procedimentos de inferência estatística demandam o estabelecimento de um modelo para representar os dados experimentais e fornecer a relação entre a variável resposta e as variáveis independentes. A Equação 3 relaciona a variável resposta (rendimento) com a temperatura (X1) e o tempo (X2), considerando os termos estatisticamente significativos. A equação é válida para os intervalos $70 \leq X1 \leq 110$ e $20 \leq X2 \leq 60$.

$$\text{Rendimento (\%)} = 415,2750 + 0,0247 * X1^2 - 0,0026 * X1^2 * X2 \quad (3)$$

A análise estatística apontou termos quadráticos significativos, desta forma é possível concluir que a superfície de resposta contém curvatura (Figura 3).

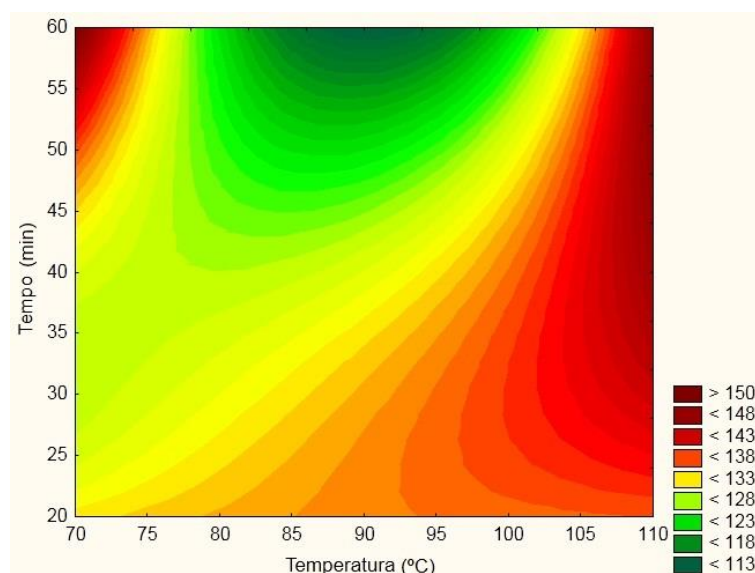
Figura 3 - Superfície de resposta para o rendimento do extrato rico em biodiesel em função da temperatura e do tempo.



Fonte: Autores, 2020.

Observa-se a presença de dois pontos de máximo no gráfico, ambos no tempo de 60 min, sendo um na temperatura de 70°C e outro na de 110°C. Para melhor visualização, é apresentado na Figura 4 o gráfico da superfície de contorno.

Figura 4 - Superfície de contorno da variável resposta rendimento do extrato rico em biodiesel em função da temperatura e do tempo.



Fonte: Autores, 2020.

Analisando a superfície de contorno, observa-se que a região em vermelho escuro mostra as condições experimentais que proporcionam um rendimento mais elevado. Desta

forma, aponta-se 70°C e 60 min e 110°C e 60 min, como condições de rendimento máximo do extrato rico em biodiesel.

4. Considerações Finais

Seguindo o método experimental proposto foi possível realizar o cultivo de microalgas da espécie *Nannochloropsis oculata* e, a partir da biomassa obtida, produzir biodiesel através da reação de transesterificação direta eliminando a etapa de extração do óleo. A formação de biodiesel foi verificada por meio da análise de espectroscopia na região do infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) que apontou a presença de ésteres no produto final.

O índice de acidez encontrado está acima do permitido pela ANP, portanto, recomenda-se a neutralização do biodiesel produzido para garantir que o índice de acidez desse combustível esteja de acordo com o permitido para comercialização.

Por meio da análise estatística foi possível identificar os parâmetros significativos para esse modelo. Os pontos de rendimento máximo do extrato rico em biodiesel foram obtidos nas condições de 70°C e 60 min, e de 110°C e 60 min.

Após observar que a água proveniente da filtração a vácuo da biomassa apresenta aspecto limpo, sugere-se a reutilização dessa água nos próximos cultivos a fim de reduzir o custo do processo.

É comum utilizar metanol em excesso na reação de transesterificação do triglicerídeo para garantir a conversão em éster. Entretanto, uma quantidade muito elevada de metanol faz com que este reagente se agregue ao produto final (biodiesel) como forma de impureza. Sugere-se que seja realizado um planejamento de experimentos tendo como variável a quantidade de metanol, mantendo fixa a dos outros reagentes, a fim de encontrar uma proporção que garanta a conversão em éster e minimize gastos com excesso de álcool que não reage.

Como um dos pontos de maior rendimento do extrato rico em biodiesel foi encontrado no menor nível de temperatura estudado (70°C), sugere-se que seja realizado um planejamento de experimento de modo a averiguar se em níveis de temperaturas inferiores a esta é possível gerar pontos de máximo.

Agradecimentos

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

Almeida, F. (2009). *Espectroscopia de infravermelho próximo com transformada de fourier (ft-nir) na caracterização de farinhas para alimentação pueril*. 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biológica) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2014). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2015). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2016). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2017). *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis*.

Arceo, A. A. (2012). *Produção de biodiesel mediante o processo de Hidroesterificação da biomassa das microalgas Scenedesmus dimorphus e Nannochloropsis oculata*. 2012. 205 f. Tese (Doutorado em Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Azeredo, V. B. S. (2012). *Produção de Biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil*. 2012. 188 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

- Barbosa, L. C. D. A. (2007). Espectroscopia no Infravermelho na Caracterização de Compostos Orgânicos. Viçosa. *Universidade Federal de Viçosa*. ISBN 978-8572692809.
- Gonçalves, A.; Soares, J.; Brasil, A. N. & Nunes, D. L. (2009). Determinação do índice de acidez de óleos e gorduras residuais para produção de biodiesel. *Congresso da rede brasileira de tecnologia de biodiesel*. Brasília, 2009, p. 187-188.
- Guillard, R. R. L. (1975). Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. *New York. Plenum Press*.
- Johnson, M. B. & Wen, Z. (2009). Production of biodiesel fuel from the microalga *Schizochytrium limacinum* by direct transesterification of algal biomass. *Energy Fuels*, v. 23, p. 5179-5183.
- Li, Y.; Lian, S.; Tong, D.; Song, R.; Yang, W.; Fan, Y.; Qing, R.; & Hu, C. (2011). Onestep production of biodiesel from *Nannochloropsis* sp. on solid base Mg–Zr catalyst. *Applied Energy*, v. 88, p. 3313-3317.
- Lourenço, S. O. (2006). Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações. São Carlos. *RiMa*. ISBN 8576561131.
- Mal, Y.; Wang, Z.; Yu, C.; Yin, Y. & Zhou, G. (2014). Evaluation of the potential of 9 *Nannochloropsis* strains for biodiesel production. *Bioresource Technology*, v. 167, p. 503-509.
- Mendes, C. d'U. S. (2008). Mapeamento tecnológico do biodiesel e tecnologias correlatas sob o enfoque dos pedidos de patentes. 2008. 78 f. *Instituto Nacional da Propriedade Industrial*.
- Ortenzio, Y. T.; Amaral, G. G; Almeida, S. S. & Oliveira, E. C. A. M. (2015). Cultivo de microalgas utilizando resíduos agroindustriais para a produção de bicombustíveis: perspectivas e desafios. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, v. 5, n. 1, p. 20-25.

Procópio, Z. S. D. (2014). *Avaliação da produção de biodiesel de microalga Isochrysis galbana via transesterificação in situ*. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Silva, D. A. (2014). *Produção de biomassa de microalgas cultivadas em esgoto sanitário biodigerido visando a produção de biodiesel*. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Silva Filho, A. A. (2009). *Produção de biodiesel pela transesterificação alcalina homogênea do óleo de soja com metanol utilizando irradiação de microondas*. 2009. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciência em Engenharia Química) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Daiana Galina – 25%

Vinícius Molini Benedito – 25%

Rodrigo Randow de Freitas – 25%

Paulo Sérgio da Silva Porto – 25%