

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS REALEZA
CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

GABRIEL FELIPE ROHLING

**PRÓTOTIPO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA PRODUÇÃO DE
BODIESEL VIA ENERGIA FOTOVOLTAICA**

REALEZA
2025

GABRIEL FELIPE ROHLING

**PRÓTOTIPO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA PRODUÇÃO DE
BODIESEL VIA ENERGIA FOTOVOLTAICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Química da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Licenciado em química

Orientador: Prof. Dr. Letiére Cabreira Soares

REALEZA

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Rohling, Gabriel Felipe
PRÓTOTIPO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA PRODUÇÃO DE
BIODIESEL VIA ENERGIA FOTOVOLTAICA / Gabriel Felipe
Rohling. -- 2025.
f.

Orientador: Prof. Dr. Letiére Cabreira Soares

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Licenciatura em Química, Realeza, PR, 2025.

1. Biocombustíveis. 2. Energia renováveis. 3.
Eletrólise. 4. Aço inoxidável. 5. Energia fotovoltaica.
I. Soares, Letiére Cabreira, orient. II. Universidade
Federal da Fronteira Sul. III. Título.

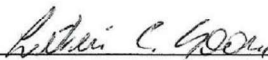
GABRIEL FELIPE ROHLING

PRÓTOTIPO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL
VIA ENERGIA FOTOVOLTAICA

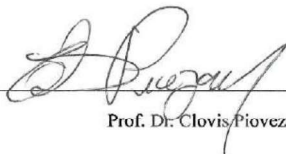
Trabalho de conclusão de curso (TCC)
apresentado ao Curso de Licenciatura em
Química e a Universidade Federal da
Fronteira Sul, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Licenciado em Química.

Realeza, 21 de novembro de 2025.

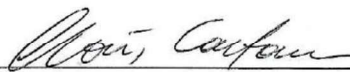
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Letiére Cabreira Soares (Orientador)



Prof. Dr. Clovis Piovezan



Prof. Dr. Clóvis Caetano

1
2 **PROTÓTIPO DE REATOR ELETROQUÍMICO PARA PRODUÇÃO DE**
3 **BIODIESEL VIA ENERGIA FOTOVOLTAICA**
4

5 Gabriel Felipe Rohling^a, Josiane de Almeida Freire^a, Katharine Margaritha Satiro Braz^b,
6 Fernanda Oliveira Lima^a, André Lazarin Gallina^c, Thiago dos Anjos Ribeiro^d, Ricardo
7 Frederico Schumacher^d, Letiére Cabreira Soares^{a*1}
8

9 ^aUniversidade Federal da Fronteira Sul, Campus Realeza, Paraná, Brazil

10 ^bUniversidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

11 ^cUniversidade Estadual do Centro Oeste, Campus Guarapuava, Paraná, Brazil

12 ^dUniversidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil

13 Palavras-chave: biocombustível; eletrólise; energia fotovoltaica; eletrodos de aço inoxidável.
14 energia renovável

15 *Resumo:*

16 O aumento contínuo da demanda global por energia tem impulsionado a busca por alternativas
17 renováveis capazes de substituir os combustíveis fósseis. Neste estudo, foi desenvolvido um
18 protótipo de reator eletroquímico alimentado por energia fotovoltaica para a produção de
19 biodiesel a partir de óleo de girassol, utilizando eletrodos de aço inoxidável 304. O sistema foi
20 projetado para operar em condições brandas, com tensão ajustável (10–30 V) e diferentes
21 razões molares metanol/óleo (1:3–1:9). Avaliou-se a influência desses parâmetros sobre as
22 propriedades físico-químicas do biodiesel, como o índice de acidez, teor de ésteres, rendimento
23 e densidade. O processo eletroquímico apresentou rendimentos superiores a 90% e teores de
24 ésteres superiores a 96,5%, atendendo aos padrões da ANP e da norma EN 14214. O índice de

1

E-mail adress: letiere.soares@uffs.edu.br

25 acidez reduziu-se de 1,85 mg KOH·g⁻¹ no óleo de partida para 0,18–0,54 mg KOH·g⁻¹ no
26 biodiesel, evidenciando a conversão eficiente dos ácidos graxos livres. A densidade das
27 amostras (881–889 kg·m⁻³) manteve-se dentro dos limites recomendados pelas agências
28 reguladoras. A análise estatística (ANOVA de Welch) confirmou efeitos significativos da razão
29 molar e da diferença de potencial sobre a acidez final do biodiesel. Os resultados demonstram
30 a viabilidade técnica da integração entre energia fotovoltaica e eletrólise para a síntese
31 sustentável de biodiesel, destacando o potencial do uso de materiais de baixo custo e de fontes
32 renováveis de energia para a produção de biocombustíveis

33 **1. Introdução**

34 O consumo energético global e, conseqüentemente, a demanda por produção de energia, vêm
35 crescendo de forma contínua nas últimas décadas [1]. Desde então, esse crescimento tem sido
36 predominantemente suprido por fontes não renováveis de energia, como os combustíveis
37 fósseis, que ainda constituem a base da matriz energética mundial, representando cerca de 80%
38 do consumo global de energia [2]. No entanto, essa dependência traz consigo desafios
39 significativos, incluindo a emissão de gases do efeito estufa, a insegurança energética e
40 impactos ambientais, tornando urgente a busca por fontes de energia alternativas e renováveis
41 [3].

42 Neste contexto, o biodiesel destaca-se como uma alternativa promissora, apresentando
43 vantagens como alta biodegradabilidade, menor emissão de poluentes e um ciclo de carbono
44 mais equilibrado [4]. Quimicamente, o biodiesel consiste em uma mistura de ésteres alquílicos
45 de ácidos graxos, produzida principalmente via transesterificação de óleos ou gorduras com
46 um álcool, geralmente catalisada por catalisadores homogêneos [5]. Entretanto, a catálise
47 homogênea enfrenta obstáculos, como a exigência de matérias-primas com baixa acidez e teor
48 de umidade, a formação de sabões, dificuldades na separação do biocombustível e geração de
49 efluentes aquosos, o que eleva os custos de produção [6].

50 Como alternativa, métodos eletroquímicos vêm sendo investigados, oferecendo vantagens
51 como maior tolerância a ácidos graxos livres e água, permitindo o uso de óleos residuais de
52 baixa qualidade. Além disso, esse método pode operar em condições brandas, com redução no
53 tempo de reação e consumo energético em comparação com as rotas convencionais [7].

54 O primeiro estudo a demonstrar a viabilidade da rota eletroquímica foi realizado por Guan e
55 Kusakabe (2009), que produziram biodiesel a partir de óleo de milho e óleo residual com
56 rendimentos superiores a 97%, mesmo na presença de 2% de água [8]. Estudos recentes
57 continuam a avançar nessa linha, Liu e colaboradores (2024) utilizaram um catalisador
58 magnético ($\text{CeO}_2/\text{ZSM-5}@\text{Fe}_3\text{O}_4$) em conjunto com eletrodos de platina, alcançando 95% de
59 rendimento em temperatura ambiente [9]. Putra et al. (2016) empregaram quitosana na forma
60 de gel (hidrogel e xerogel) como catalisador heterogêneo em eletrólise com eletrodos de grafite,
61 obtendo 99,4% de rendimento em apenas 30 minutos [10].

62 Nessa mesma perspectiva, Asl et al. (2020) produziram biodiesel a partir de óleo de fritura
63 residual utilizando eletrodos de grafite e catalisador homogêneo (NaOH), atingindo 98% de
64 rendimento em 2 horas, com a vantagem de não apresentar queda de tensão ou mudanças de
65 temperatura durante o processo [11]. De modo complementar, Karimi e Saidi (2022)
66 otimizaram a produção a partir de óleo de neem (*Azadiractha indica*) via eletrólise com H_2SO_4
67 como catalisador ácido, utilizando a metodologia de superfície de resposta (MSR), e
68 alcançaram rendimento de 80% em condições ambientes, demonstrando a viabilidade do uso
69 de matéria-primas não comestíveis com este método [12].

70 Apesar dos avanços representados pelos estudos, a viabilidade energética e econômica do
71 processo ainda é um desafio. A maioria dos trabalhos ainda depende da energia elétrica
72 convencional para o processo de eletrólise, muitas vezes originada de fontes não renováveis.
73 Ademais, o uso de materiais como eletrodos de platina, reagentes e catalisadores especializados
74 encarece o processo, dificultando sua escalabilidade industrial.

75 Diante disso, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um reator eletroquímico para
76 produção de biodiesel alimentado por energia fotovoltaica, utilizando materiais acessíveis e
77 duráveis como eletrodos de aço inoxidável 304. Além disso, foram avaliados parâmetros
78 reacionais que influenciam a qualidade do biodiesel em relação a acidez, densidade, teor de
79 ésteres e rendimento final.

80 **2. Metodologia**

81 *2.1. Material*

82 A matéria prima utilizada foi o óleo de girassol obtido através de uma doação da Receita
83 Federal Brasileira e, posteriormente, uma análise prévia dos parâmetros físico-químicos foi
84 realizada. Os reagentes analíticos utilizados para a análise das amostras e preparo das misturas
85 reacionais neste estudo foram: hidróxido de sódio (NaOH), hidróxido de potássio (KOH),
86 álcool etílico (99,8% de pureza), éter etílico (98% de pureza), álcool metílico (99,9% de
87 pureza), clorofórmio deuterado (99,8% de pureza) e tetrametilsilano (TMS).

88 *2.2. Montagem do protótipo do reator eletroquímico*

89 A confecção do protótipo de reator foi realizada utilizando um recipiente no formato cilíndrico-
90 cônico, com capacidade total de 1L. O sistema foi alimentado por energia fotovoltaica,
91 composta por uma placa solar de 80 W, inversor, fonte com controle de tensão e corrente,
92 bateria de 12V e bomba elétrica de 12V responsável pela homogeneização da mistura reacional.
93 Além disso, foi implementado um chaveamento que permite a utilização da rede elétrica
94 convencional, assegurando a operação contínua mesmo na ausência de radiação solar.

95 O reator foi equipado com um par de eletrodos de aço inoxidável 304, cada um com área
96 superficial de 50 cm² e uma distância de 1 cm. Esse material, constituído por uma liga
97 austenítica de 18-20% de cromo e 8-10% de níquel e o restante de ferro [13], apresenta elevada
98 resistência à corrosão e menor custo, características que o tornam adequado para o processo de
99 eletrólise. A ilustração esquemática do sistema do reator é apresentada na figura 1.

100 2.3. Síntese do biodiesel por eletrólise

101 Para a síntese do biodiesel, o reator foi preenchido com 700 mL de uma mistura reacional,
102 contendo metanol, óleo de girassol, hidróxido de potássio e água destilada. As diferentes razões
103 molares entre o óleo/metanol investigadas foram de 1:3; 1:3,5; 1,4; 1:6, 1:7 e 1:9, enquanto a
104 concentração de hidróxido de sódio foi de 1% (m/m) e com base no peso total da mistura
105 reacional adicionou-se 2% (m/m) de água destilada.

106 A reação de eletrólise foi realizada por um período de 60 minutos em temperatura ambiente e
107 aplicando-se uma diferença de potencial constante, sendo a voltagem ajustada entre 10, 20 e
108 30 V conforme o ensaio realizado, e sob agitação constante.

109 Após o término da reação, a mistura reacional foi transferida para um funil de separação para
110 decantação da glicerina. O biodiesel foi dividido em duas amostras, a primeira foi lavada com
111 água destilada em uma quantidade de 30% do volume do biodiesel e posteriormente, secado
112 em estufa a 105 °C por 2 horas; na segunda amostra, o biodiesel foi encaminhado diretamente
113 para o processo de secagem, sob as mesmas condições da primeira amostra. Esta metodologia
114 foi adaptada de Asl et al. 2020 [11]

115 2.4. Caracterização físico-química do biodiesel

116 A etapa de caracterização físico-química constituiu-se na determinação da acidez inicial, teor
117 de ácidos graxos livres e densidade do óleo de girassol, visto que são parâmetros essenciais
118 para análise inicial da qualidade da matéria prima e posterior comparação com o biodiesel
119 produzido. A densidade do óleo foi determinada em kg/m^3 utilizando um densímetro digital da
120 marca Anton Paar, modelo DMA 35. Para a determinação do índice de acidez (IA) e ácidos
121 graxos livres (AGL), adotou-se o método titulométrico descrito por Lüneburger et al. (2022)
122 [14]. Neste procedimento, utilizou-se como titulante uma solução de NaOH $0,01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,
123 enquanto o titulado consistiu em 2 g de amostra dissolvida em 25 mL de uma mistura de éter
124 etílico e etanol na proporção 2:1 (v/v), utilizando fenolftaleína como indicador ácido-base. O

125 IA (mg de KOH·g⁻¹) e o teor de ácidos graxos livres expresso em percentual de ácido oleico
126 foram calculados através da equação 1 e 2, respectivamente, onde v representa o volume de
127 NaOH utilizado, f é o fator de correção da solução titulante e p é a massa da amostra em gramas.

$$128 \quad IA = [(v \cdot f \cdot 5,61) / p] \quad \text{Eq. (1)}$$

$$129 \quad AGL = [(v \cdot f \cdot 28,2) / p] \quad \text{Eq. (2)}$$

130 *2.5. Determinação do teor de éster do biodiesel*

131 A análise do teor de ésteres comprova e quantifica a conversão dos triglicerídeos em biodiesel.
132 Portanto, o teor de ésteres das amostras de biodiesel foi determinado por ressonância magnética
133 nuclear de hidrogênio (¹H NMR) em um aparelho da marca Bruker, modelo DPX 400,
134 operando a 400 MHz para ¹H. As amostras foram dissolvidas em clorofórmio deuterado
135 (CDCl₃) utilizando TMS como padrão interno. O teor de ésteres foi calculado com base nos
136 valores de integral do grupo metoxila (OMe) e dos hidrogênios metilênicos (CH₂) α-carbônico
137 [14], de acordo com a equação 3.

$$138 \quad \text{Teor de éster (\%)} = [(Int. OMe/3) / (int. CH_2/2)] \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

139 *2.6. Análise estatística dos dados*

140 A análise estatística dos dados foi realizada no software JASP (2025) versão 0.19.3.0. O teste
141 de homogeneidade de variâncias de Levene indicou violação do pressuposto de
142 homocedasticidade (p < 0,05). Dessa forma, optou-se pela utilização da análise de variância
143 (ANOVA) com correção de Welch para avaliar o efeito das variáveis independentes (razão
144 molar e diferença de potencial) sobre o índice de acidez, seguida por testes post-hoc com
145 correção de Holm, considerando um nível de significância de 95%.

146 **3. Resultados e discussão**

147 *3.1. Caracterização físico-química do óleo*

148 O uso de óleo de girassol como matéria prima para síntese de biodiesel por eletrólise foi
149 investigado, analisando os impactos da razão molar e a voltagem aplicada no processo de
150 eletrólise.

151 A caracterização físico-química do óleo de girassol, empregado como matéria prima, foi
152 realizada e suas propriedades são apresentadas na tabela 1.

153 De acordo com a tabela 1, observa-se que o óleo de girassol utilizado apresentou um IA, AGL
154 e densidade de $1,85 \text{ mg de KOH}\cdot\text{g}^{-1}$, $0,93\%$ e $911,0 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente. Esses resultados
155 indicam que o óleo é mais ácido quando comparado à literatura, como o estudo de Ebrahimian
156 et al (2022) [15], no qual foi reportado um IA de $0,9 \text{ mg de KOH}\cdot\text{g}^{-1}$ para a mesma matriz
157 lipídica. Diversos autores mencionam que, para se obter alto rendimento na produção de
158 biodiesel via catálise alcalina homogênea, é necessário empregar óleos com acidez inferior a 1
159 $\text{mg de KOH}\cdot\text{g}^{-1}$ e teor de AGL abaixo de $0,5\%$, a fim de evitar o consumo do catalisador e a
160 formação de sabões [16-17]. Nesse contexto, o uso do método eletroquímico de
161 transesterificação pode contribuir significativamente para melhorar o desempenho da reação,
162 favorecendo a conversão de triglicerídeos em ésteres e reduzindo produtos indesejados. Quanto
163 à densidade, o valor encontrado é semelhante ao reportado por Mora e colaboradores (2024)
164 [18], que obtiveram densidade de $924,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ para o óleo de girassol.

165 3.2. *Rendimento e teor de ésteres do biodiesel produzido*

166 No processo de transesterificação via eletrólise, íons hidroxila (OH^-) são gerados no cátodo e
167 reagem com o metanol, formando íons metóxido ($\text{CH}_3\text{-O}^-$), que atuam como nucleófilos
168 atacando o carbono carbonílico dos triglicerídeos, iniciando a formação de ésteres metílicos
169 [11]. Portanto, os resultados obtidos do presente estudo evidenciaram que o uso da eletrólise
170 favoreceu o rendimento e a conversão do óleo em biodiesel. Na figura 2, é possível observar
171 nos itens: (a) os rendimentos obtidos nas diferentes condições reacionais e (b) o teor de ésteres
172 determinado por RMN.

173 O rendimento de reação (Fig. 2a) foi superior a 90% em todas as condições testadas, exceto na
174 razão molar 1:9 sob 30 V, em que o sistema tornou-se excessivamente condutor, ocasionando
175 falha elétrica e inviabilizando o ensaio. Tais resultados indicam desempenho comparável aos
176 relatados por Guan e Kusakabe (2009) [8] e Irawan et al (2019) [19], que obtiveram eficiências
177 de reação acima de 90% em sistemas eletroquímicos semelhantes.

178 Na figura 2b, observa-se que, apesar dos altos rendimentos, a conversão em ésteres alquílicos
179 (material suplementar 1) não atingiu o limite mínimo estabelecido pela Agência Nacional de
180 Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela norma EN 14214 ($\geq 96,5\%$) em algumas
181 condições, especialmente para razões molares menores (1:3, 1:3,5 e 1:4), independentemente
182 da tensão aplicada. Essa limitação pode estar associada ao equilíbrio químico da reação de
183 transesterificação, que é reversível e tende a se deslocar para os reagentes quando há menor
184 proporção de álcool.

185 De acordo com Al-Haimi et al (2025) [20], o aumento da concentração de metanol desloca o
186 equilíbrio químico no sentido dos produtos, conforme o princípio de Le Chatelier, promovendo
187 maior conversão dos triglicerídeos em biodiesel. Assim, em razões molares reduzidas, a reação
188 não atinge conversão completa, resultando em teores mais baixos de ésteres e presença de
189 mono-, di- ou triglicerídeos residuais. Por outro lado, o aumento da razão molar para 1:6, 1:7
190 e 1:9 desloca o equilíbrio no sentido dos produtos, elevando o teor de ésteres para valores
191 superiores a 96,5%, exceto nas condições de 1:6 sob 10 V e 20 V (93,02% e 92,16%,
192 respectivamente). Nessas situações, o menor potencial aplicado pode não ter fornecido energia
193 suficiente para promover a quebra da água eficientemente e, conseqüentemente, a geração de
194 íons hidroxila, conforme as reações da fig. 3.

195 Como esses íons participam da reação de transferência de prótons com o metanol, formando os
196 íons metóxido que catalisam a transesterificação, a menor produção de OH^- limita a

197 disponibilidade dessas espécies reativas no meio e, também, pode permitir a ocorrência de
198 reações indesejadas, reduzindo a eficiência global da conversão.

199 3.3. *Teor de ácidos graxos livres do biodiesel*

200 Os resultados do presente estudo revelaram que o uso da eletrólise para síntese do biodiesel
201 pode reduzir significativamente o teor de ácidos graxos livres do produto final. Isto pode ser
202 observado na figura 4, que apresenta os resultados obtidos para o biodiesel (a) não submetido
203 e (b) submetido ao processo de lavagem.

204 De acordo com a figura 4, os valores de AGL variaram entre 0,09% à 0,27% para o biodiesel
205 não lavado e entre 0,09% à 0,30% para o biodiesel lavado, evidenciando uma redução
206 expressiva em comparação com o teor inicial do óleo de girassol (0,93%). Esses resultados
207 indicam que o processo eletroquímico contribui para conversão dos ácidos graxos livres em
208 ésteres, reduzindo a acidez do biodiesel produzido. Resultados semelhantes foram relatados
209 por Darwin et al. (2023) [7], que também observaram uma redução significativa de AGL em
210 sistemas de transesterificação via eletrólise.

211 De modo geral, observou-se que as maiores razões molares resultaram em teores mais elevados
212 de AGL quando empregadas tensões de 10 V e 30 V. Por outro lado, verificou-se os maiores
213 valores de AGL em razões molares menores (1:3, 1:3,5 e 1:4) quando utilizado 20 V (Figura
214 4a e 4b). Esse comportamento pode estar relacionado ao equilíbrio entre as reações de
215 transesterificação e hidrólise dos triglicerídeos, influenciado pela tensão aplicada e pela razão
216 molar de metanol. No trabalho de Liu et al. (2024) [9], que utilizaram o catalisador heterogêneo
217 de $\text{CeO}_2/\text{ZSM-5}@Fe_3O_4$, foi demonstrado que a tensão aplicada é crucial para gerar íons
218 hidroxila (OH^-), essenciais para a transesterificação. Os autores observaram que condições fora
219 do ideal, como o excesso de metanol ou tensão inadequada, reduziram o rendimento do
220 biodiesel, sugerindo o favorecimento de reações laterais, como a hidrólise, que resultam na
221 formação de AGL.

222 3.4. *Índice de acidez do biodiesel produzido*

223 Os resultados do presente estudo revelaram que o IA do biodiesel não submetido ao processo
224 de lavagem (0,18-0,54 mg de $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$) foram inferiores ao do biodiesel submetido ao processo
225 de lavagem (0,18-0,60 mg de $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$) entre as variáveis testadas. A lavagem do biodiesel é
226 uma etapa essencial para remoção de impurezas residuais, como traços de catalisador, sabões,
227 glicerol e metanol, os quais podem afetar a qualidade do produto final. Portanto, o aumento da
228 acidez do biodiesel após o processo de lavagem deve-se a eliminação de resquícios do
229 catalisador básico (KOH), o qual pode estar influenciando o resultado da acidez final do
230 biodiesel, tornando o processo de lavagem essencial para minimizar as impurezas e
231 contaminações.

232 Além disso, os resultados do presente estudo também demonstraram que o processo de
233 transesterificação via eletrólise pode reduzir significativamente o IA do óleo inicial (1,85 mg
234 de $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$) quando comparado ao biodiesel final (Fig. 5a e 5b). Esses resultados são
235 semelhantes ao estudo de Annal et al (2024) [21] que reportaram uma redução de 14,25 mg de
236 $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$ para 0,5 mg de $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$ no biodiesel final produzido por eletrólise.

237 Conforme apresentado na Figura 5b, observa-se que, quando aplicadas diferenças de potencial
238 de 10 V e 30 V, o aumento da razão molar levou a um incremento progressivo do índice de
239 acidez, variando entre 0,22 à 0,49 mg $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$ e entre 0,18 à 0,50 mg $\text{KOH}\cdot\text{g}^{-1}$,
240 respectivamente. Esse comportamento sugere que o aumento da acidez não depende apenas da
241 intensidade da tensão aplicada, mas do equilíbrio entre a geração de íons hidroxila, a formação
242 de íons metóxido e as reações competitivas que ocorrem no meio reacional. Em tensões mais
243 baixas (10 V), a menor densidade de corrente reduz a taxa de formação de OH^- e, por
244 consequência, a geração de CH_3O^- , o que pode limitar a conversão dos triglicerídeos em
245 biodiesel e favorecer a ocorrência de hidrólise parcial dos ésteres. Por outro lado, em tensões
246 mais elevadas (30 V), há intensificação da eletrólise da água, resultando em maior produção

247 de OH⁻ e, conseqüentemente, de moléculas de H₂O no sistema pela reação com o metanol, o
248 que também pode conduzir o aumento do índice de acidez em função da formação de ácidos
249 graxos livres [11-22]

250 Por outro lado, a condição de 20 V apresentou um comportamento distinto, onde a acidez
251 diminuiu com o aumento da razão molar. Esse resultado sugere que, nessa faixa intermediária
252 de potencial, há geração suficiente de íons hidroxila para promover a reação de
253 transesterificação, sem provocar o excesso de hidrólise. O aumento da razão molar de metanol
254 desloca o equilíbrio químico em direção à formação dos ésteres metílicos [23], o que contribui
255 para a redução dos ácidos graxos livres observada em maiores razões molares, em concordância
256 com os resultados experimentais de Ranchman et al. (2018) [24] e também com a fig. 2b, onde
257 as maiores quantidades de metanol resultaram nas maiores conversões em ésteres.

258 3.5. *Densidade do biodiesel*

259 A densidade do biodiesel é um importante parâmetro de qualidade, pois tem influência no
260 desempenho do motor, na atomização do combustível e eficiência da combustão [25]. Os
261 resultados do presente estudo encontrados variaram entre 881,0 à 889,9 kg·m⁻³ (Fig. 6), e não
262 demonstram diferença significativa entre as variáveis testadas na densidade do biodiesel
263 produzido, indicando que independente da diferença de potencial ou razão molar utilizada a
264 densidade se manteve a mesma. Além disso, outros estudos reportaram densidades similares
265 para o biodiesel produzido por eletrocatalise, como Xia et al. 2022 [26], que encontraram um
266 valor de 871 kg·m⁻³ e também de [11] que encontraram um valor de densidade de 880 kg·m⁻³
267 para o biodiesel produzido via eletrólise.

268 3.6. *Conformidade com as normas de qualidade do biodiesel*

269 A qualidade do biodiesel produzido foi avaliada com base nos parâmetros estabelecidos pela
270 Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela norma europeia
271 EN 14214, que definem limites específicos para propriedades como índice de acidez, densidade

272 e teor de ésteres metílicos. De acordo com as especificações da ANP e da EN 14214, o biodiesel
273 deve apresentar índice de acidez $\leq 0,50 \text{ mg KOH}\cdot\text{g}^{-1}$, densidade entre $850\text{--}900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e teor
274 de ésteres $\geq 96,5\%$.

275 No presente estudo, todas as amostras apresentaram densidade dentro da faixa especificada,
276 variando entre 881 e $889,9 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. O índice de acidez foi significativamente reduzido em
277 relação ao óleo de partida ($1,85 \text{ mg KOH}\cdot\text{g}^{-1}$), atingindo valores entre $0,18$ e $0,54 \text{ mg KOH}\cdot\text{g}^{-1}$,
278 o que confirma a eficiência da rota eletroquímica na conversão dos ácidos graxos livres. O teor
279 de ésteres superou $96,5\%$ em diversas condições experimentais, especialmente para razões
280 molares mais elevadas (1:6 à 1:9).

281 Esses resultados demonstram que o biodiesel obtido pelo processo de eletrólise atendeu aos
282 requisitos normativos de qualidade, apresentando propriedades comparáveis às de
283 biocombustíveis produzidos por transesterificação catalítica convencional. Assim, a rota
284 eletroquímica proposta mostra-se tecnicamente viável e compatível com as exigências para
285 aplicação em motores de combustão interna, reforçando seu potencial como alternativa
286 sustentável aos métodos tradicionais.

287 3.7. *Condição otimizada*

288 Com base nos resultados experimentais e na análise estatística, a condição otimizada
289 identificada foi razão molar metanol:óleo de 1:7 aplicada com diferença de potencial de 20 V .
290 Nesta condição observou-se combinação favorável entre elevado teor de ésteres ($\geq 96,5\%$),
291 índice de acidez dentro dos limites normativos ($\leq 0,50 \text{ mg KOH}\cdot\text{g}^{-1}$) e densidade compatível
292 com a ANP e EN 14214 ($850\text{--}900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Além disso, a operação em 20 V minimiza o risco
293 de excesso de condutividade e eventos de falha elétrica registrados em condições de 30 V com
294 elevada razão molar.

295 4. Conclusão

296 O presente estudo comprovou a viabilidade técnica da produção de biodiesel por meio de um
297 reator eletroquímico alimentado por energia fotovoltaica, utilizando óleo de girassol como
298 matéria-prima e eletrodos de aço inoxidável 304 como material de trabalho. O sistema
299 apresentou estabilidade operacional e não apresentou corrosão visível dos eletrodos,
300 alcançando rendimentos acima de 90% e teores de ésteres superiores a 96,5% nas condições
301 otimizadas. Observou-se uma expressiva redução do índice de acidez e do teor de ácidos graxos
302 livres em relação ao óleo inicial, resultando em um produto compatível com as especificações
303 das normas da ANP e EN 14214. A faixa intermediária de 20 V associada às maiores razões
304 molares (1:6–1:9) mostrou-se mais favorável à conversão dos triglicerídeos em ésteres
305 metílicos, minimizando reações secundárias de hidrólise. Esses resultados indicam que a
306 integração entre eletrólise e energia solar fotovoltaica representa uma alternativa promissora e
307 ambientalmente sustentável para a produção de biodiesel, especialmente em sistemas
308 descentralizados e de pequena escala. Pesquisas futuras podem abordar a eficiência energética
309 global do processo, a durabilidade dos eletrodos e a aplicação do sistema com diferentes tipos
310 de óleos residuais.

311 **References**

- 312 [1] K.V. Pradeep, K.P. Ravi Kumar, K. Santhosh, B. Kuldeep, C.S. Kavitha, R.B. Manju, B.N.
313 Srinivas, Production and evaluation of engine performance and emission characteristics of
314 composite biodiesel from Michelia Champaca and Amoora Rohituka oils in a CRDI VCR
315 diesel engine, Results in Engineering, Volume 26, 2025, 105172, ISSN 2590-1230,
316 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105172>.
- 317 [2] Muhammad Ali Ijaz Malik, Sadaf Zeeshan, Muhammad Khubaib, Adeel Ikram, Fayaz
318 Hussain, Hayati Yassin, Atika Qazi, A review of major trends, opportunities, and technical
319 challenges in biodiesel production from waste sources, Energy Conversion and Management:
320 X, Volume 23, 2024, 100675, ISSN 2590-1745, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100675>.

- 321 [3] Praveen Kumar, Aman Kumar Pal, Study on the performance and emissions characteristics
322 of reformulated engine blended with producer gas, biogas, and pongamia pinnata biodiesel,
323 Next Sustainability, Volume 5, 2025, 100138, ISSN 2949-
324 8236, <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100138>.
- 325 [4] Balaji Panchal, Chia-Hung Su, Chun-Chong Fu, Shao-Jung Wu, Horng-Yi Juan,
326 Ecofriendly and cost-effective biodiesel production from water containing feedstocks through
327 electrolysis- a review, Fuel Processing Technology, Volume 276, 2025, 108277, ISSN 0378-
328 3820, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108277>.
- 329 [5] Jassinnee Milano, Mei Yin Ong, Sieh Kiong Tiong, F. Ideris, A.S. Silitonga, A.H.
330 Sebayang, Chung Hong Tan, I.M.R. Fattah, Zahra Fona, Nazia Hossain, A comparative study
331 of the production of methyl esters from non-edible oils as potential feedstocks: Process
332 optimization and two-step biodiesel characterization, Results in Engineering, Volume 25,
333 2025, 104285, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104285>.
- 334 [6] V.S. Shanthini, D. Chitra, Ganesh Moorthy, Biodiesel: A comprehensive review of
335 properties, catalyst types, and feedstock sources, Results in Chemistry, Volume 18, 2025,
336 102678, ISSN 2211-7156, <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2025.102678>.
- 337 [7] Darwin, Muhammad Thifal, Muhammad Alwi, Zhairi Murizal, Atmadian Pratama,
338 Muhammad Rizal, The synthesis of biodiesel from palm oil and waste cooking oil via
339 electrolysis by various electrodes, Case Studies in Chemical and Environmental Engineering,
340 Volume 8, 2023, 100512, ISSN 2666-0164, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100512>.
- 341 [8] Guoqing Guan, Katsuki Kusakabe, Synthesis of biodiesel fuel using an electrolysis method,
342 Chemical Engineering Journal, Volume 153, Issues 1–3, 2009, Pages 159-163, ISSN 1385-
343 8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.005>.
- 344 [9] Sitong Liu, Shengli Niu, Hewei Yu, Kuihua Han, Sunwen Xia, Zihao Yang, Yue Zheng,
345 Yujiao Zhang, Yanan Hao, Abulikemu Abulizi, Electrolysis combined with magnetic

346 CeO₂/ZSM-5@Fe₃O₄ catalyst to boost transesterification for biodiesel production, Fuel,
347 Volume 378, 2024, 132862, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132862>.

348 [10] Rudy Syah Putra, Kharis Pratama, Yudi Antono, Muhammad Idris, Jumardin Rua, Hikmat
349 Ramadhani, Enhanced Electrocatalytic Biodiesel Production with Chitosan Gel (Hydrogel and
350 Xerogel), Procedia Engineering, Volume 148, 2016, Pages 609-614, ISSN 1877-7058,
351 <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.522>.

352 [11] Mohammad Abdollahi Asl, Kambiz Tahvildari, Tania Bigdeli, Eco-friendly synthesis of
353 biodiesel from WCO by using electrolysis technique with graphite electrodes, Fuel, Volume
354 270, 2020, 117582, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117582>.

355 [12] Shadi Karimi, Majid Saidi, Biodiesel production from Azadirachta India-derived oil by
356 electrolysis technique: Process optimization using response surface methodology (RSM), Fuel
357 Processing Technology, Volume 234, 2022, 107337, ISSN 0378-3820,
358 <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107337>.

359 [13] Sean Wu, Chin-Hsiang Cheng, Yu-Jen Hsiao, Rei-Cheng Juang, Wen-Fu Wen, Fe₂O₃
360 films on stainless steel for solar absorbers Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume
361 58, 2016, Pages 574-580, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.263>.

362 [14] Sara Lüneburger, André Lazarin Gallina, Letiére Cabreira Soares, Dalila Moter Benvegnú,
363 Biodiesel production from Hevea Brasiliensis seed oil, Fuel, Volume 324, Part B, 2022,
364 124639, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124639>.

365 [15] Elham Ebrahimian, Joeri F.M. Denayer, Mortaza Aghbashlo, Meisam Tabatabaei,
366 Keikhosro Karimi, Biomethane and biodiesel production from sunflower crop: A biorefinery
367 perspective, Renewable Energy, Volume 200, 2022, Pages 1352-1361, ISSN 0960-
368 1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.069>.

369 [16] RAQEEB, Mohammed Abdul et al. Biodiesel production from waste cooking oil. **Journal**
370 **of chemical and pharmaceutical research**, v. 7, n. 12, p. 670-681, 2015.

- 371 [17] Gabriel O. Ferrero, Manuel F. Almeida, Maria C.M. Alvim-Ferraz, Joana M.
372 Dias, Glycerol-enriched heterogeneous catalyst for biodiesel production from soybean oil and
373 waste frying oil, *Energy Conversion and Management*, Volume 89, 2015, Pages 665-671, ISSN
374 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.032>.
- 375 [18] Joy Marie R. Mora, Carl Francis Z. Lacson, Angelo Earvin Sy Choi, Tsair-Wang Chung,
376 Joseph D. Retumban, Ralf Ruffel M. Abarca, Nurak Grisdanurak, Mark Daniel G. de Luna,
377 Biodiesel production from soybean oil via LiOH-pumice catalytic transesterification and
378 BBD-RSM optimization, *Energy Reports*, Volume 11, 2024, Pages 4032-4043,
379 DOI 10.1016/j.egy.2024.03.050.
- 380 [19] Dedy Irawan, Zainal Arifin, Fitriyana, Celine Olivia, Muhamad Nopal,
381 *Synthesis Of Biodiesel From Palm Oil Through Electrolysis Process By Means Of Silver (Ag)*
382 *Electrode, International Journal of Scientific & Technology Research*, Volume 8, Issue 09,
383 September 2019, ISSN 2277-8616.
- 384 [20] Akram Ali Nasser Mansoor Al-Haimi, Fatma Yehia, Fen Liu, Xiang Zhen, Shunni Zhu,
385 Zhongming Wang, Recyclable methanesulfonic acid-based deep eutectic solvents for efficient
386 biodiesel production via transesterification, *Fuel Processing Technology*, Volume 277, 2025,
387 108310, ISSN 0378-3820, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108310>.
- 388 [21] Umaiymbika Neduvel Annal, Vaithiyanathan. R, Arunodhaya Natarajan, Vijayalakshmi
389 Rajadurai, Paskalis Sahaya Murphin Kumar, Yuan-Yao Li, Electrolytic biodiesel production
390 from spent coffee grounds: Optimization through response surface methodology and artificial
391 neural network, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Volume 165, 2024,
392 105697, ISSN 1876-1070, <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2024.105697>.
- 393 [22] I.M. Atadashi, M.K. Aroua, A.R. Abdul Aziz, N.M.N. Sulaiman, The effects of water on
394 biodiesel production and refining technologies: A review, *Renewable and Sustainable Energy*

395 Reviews, Volume 16, Issue 5, 2012, Pages 3456-3470, ISSN 1364-0321,
396 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.004>.

397 [23] Dennis Y.C. Leung, Xuan Wu, M.K.H. Leung, A review on biodiesel production using
398 catalyzed transesterification, *Applied Energy*, Volume 87, Issue 4, 2010, Pages 1083-1095,
399 ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>.

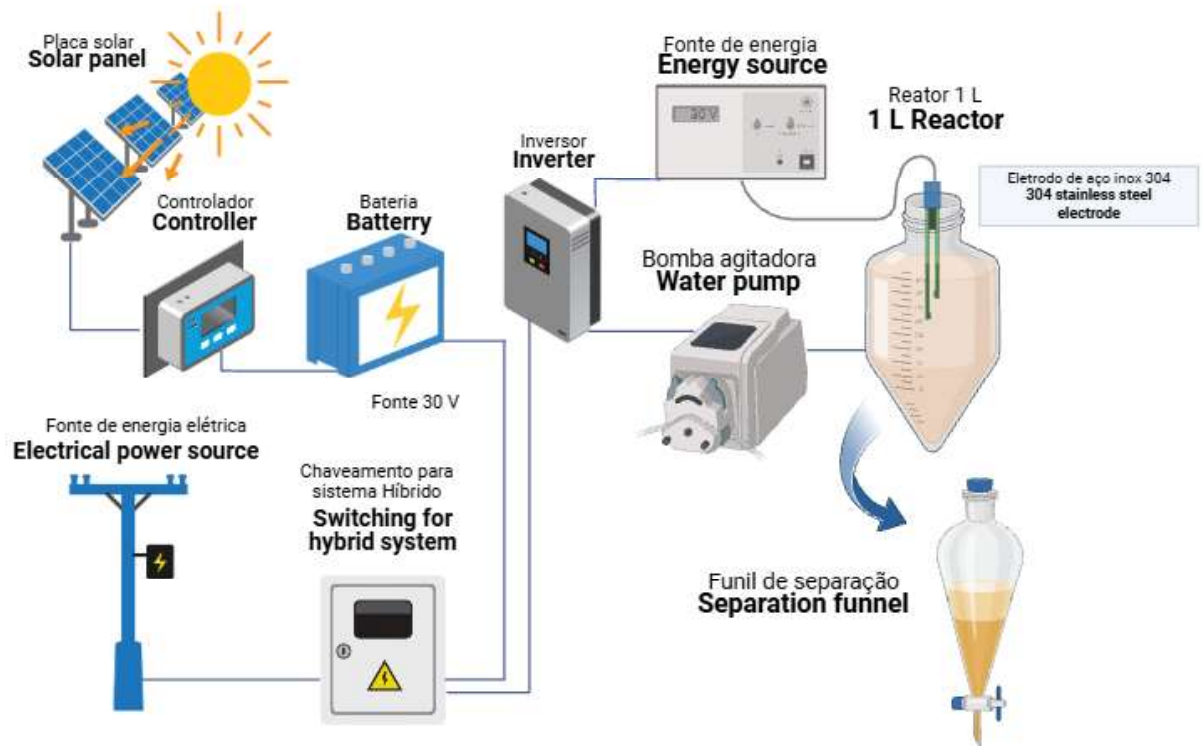
400 [24] S. A. Rachman, L. N. Komariah, A. I. Andwikaputra, N. B. Umbara, High conversion and
401 yield of biodiesel using electrolysis method, *Journal of Physics: Conference Series*,
402 Volume 1095, 2018, Article 012040, DOI 10.1088/1742-6596/1095/1/012040.

403 [25] Hoang, A. T. (2018). Prediction of the density and viscosity of biodiesel and the influence
404 of biodiesel properties on a diesel engine fuel supply system. *Journal of Marine Engineering*
405 *& Technology*, 20(5), 299–311. <https://doi.org/10.1080/20464177.2018.1532734>

406 [26]Shaige Xia, Yongjie Hu, Chao Chen, Junyu Tao, Beibei Yan, Wanqing Li, Guangbin Zhu,
407 Zhanjun Cheng, Guanyi Chen, Electrolytic transesterification of waste cooking oil using
408 magnetic Co/Fe–Ca based catalyst derived from waste shells: A promising approach towards
409 sustainable biodiesel production, *Renewable Energy*, Volume 200, 2022, Pages 1286-1299,
410 ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.071>.

411

412 Figuras:



413

Fig 1. Desenho esquemático do reator.

414

415

416

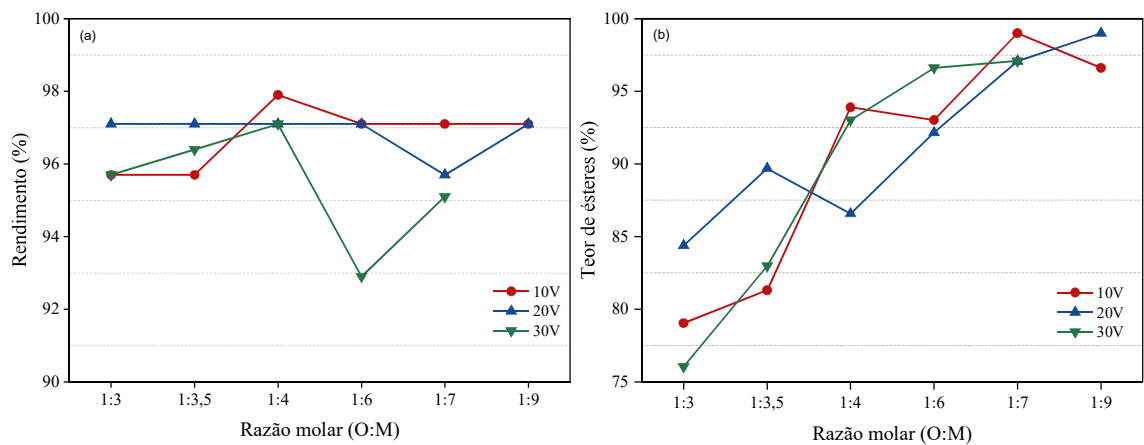
417

418

419

420

421



422

423

Fig 2. Rendimento da reação de transesterificação e teor de ésteres do biodiesel.

424

425

426

427
 428
 429
 430
 431
 432
 433
 434
 435
 436
 437
 438
 439
 440
 441
 442
 443
 444
 445
 446
 447
 448
 449
 450
 451
 452

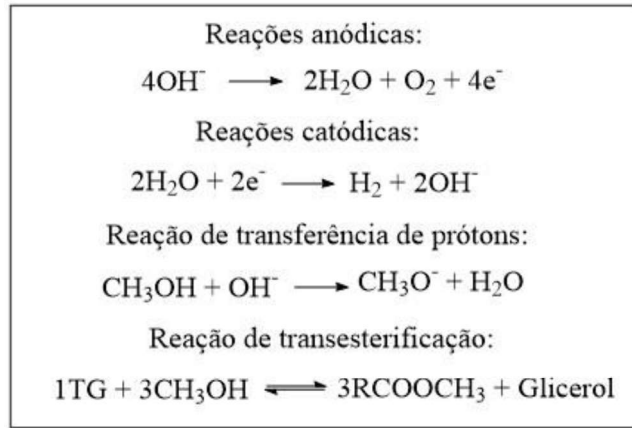


Fig.3 Reações eletroquímicas e transesterificação (Asl et al., 2020)

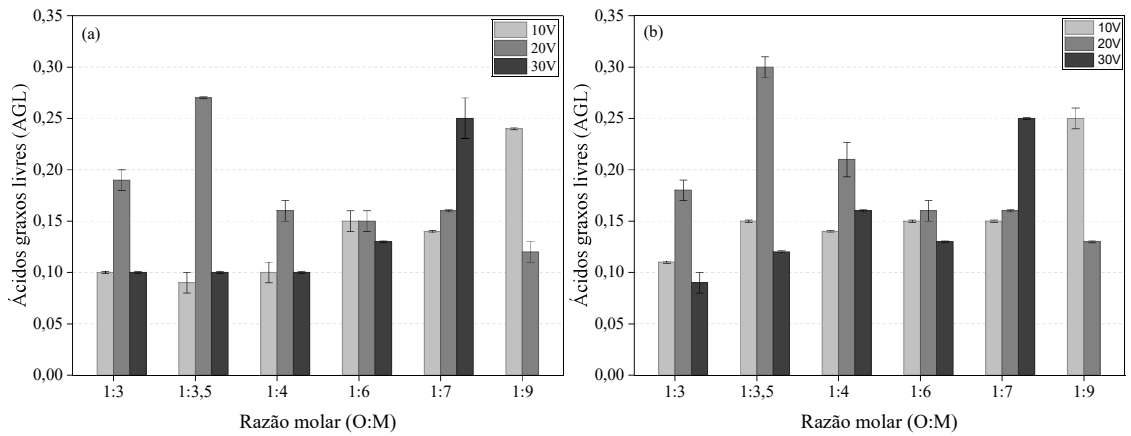


Fig 4. Influência da razão molar e da tensão aplicada no teor de ácidos graxos livres.

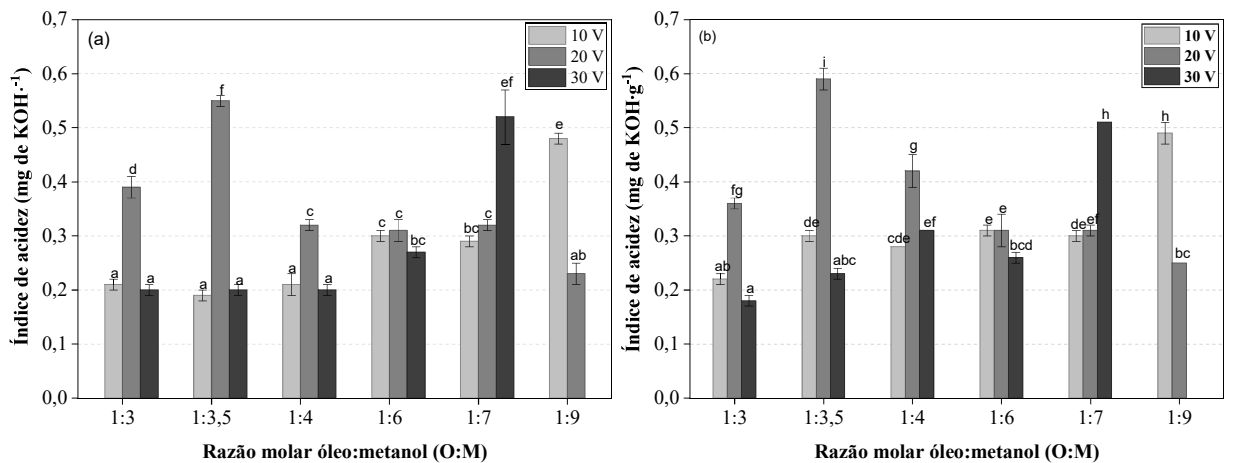
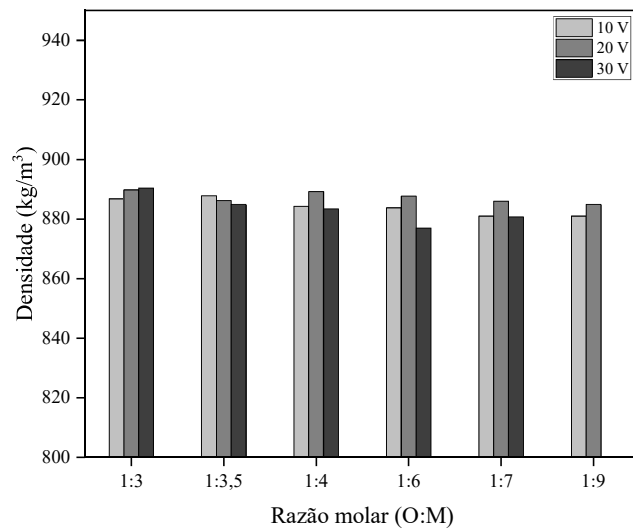


Fig 5. Influência da razão molar e da tensão aplicada no índice de acidez do biodiesel; Letras iguais não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$)

453



454

455

Fig 6. Influência da razão molar e da tensão aplicada na densidade do biodiesel

456 **Tabelas:**

457 **Tabela 1**

458 Propriedades físico-química do óleo de girassol utilizado para a produção de biodiesel

Parâmetros	Unidade	Óleo de girassol
Índice de acidez	mg KOH/g	1,85 ± 0,07
Ácidos graxos livres	%	0,93
Densidade	kg/m ³	911,0

459

460

461

462

463

464