



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL  
CAMPUS ARAPIRACA - UNIDADE EDUCACIONAL DE PENEDO  
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - BACHARELADO

BRUNO SANTANA DOS SANTOS

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MACROALGAS DO LITORAL  
SUL DE ALAGOAS: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PRODUTO E  
ANÁLISE DE VARIÁVEIS DE PROCESSO

PENEDO-AL  
2022

BRUNO SANTANA DOS SANTOS

PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MACROALGAS DO LITORAL  
SUL DE ALAGOAS: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PRODUTO E  
ANÁLISE DE VARIÁVEIS DE PROCESSO

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado à Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Arapiraca, Unidade Educacional de Penedo, como pré-requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Adriana Carla de Oliveira Lopes.



Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca*  
Unidade Educacional Penedo  
Biblioteca Setorial Penedo - BSP

S237p Santos, Bruno Santana dos  
Produção de biodiesel a partir do óleo de macroalgas do Litoral Sul de Alagoas: desenvolvimento sustentável do produto e análise de variáveis de processo / Bruno Santana dos Santos. – Penedo, AL, 2022.  
43 f.: il.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana Carla de Oliveira Lopes.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) -  
Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Unidade Educacional Penedo,  
Penedo, AL, 2021.  
Referências: f. 41-43.

1. Produção de biodiesel. 2. Macroalgas marinhas. 3. Desenvolvimento sustentável. 4. Litoral Sul – Alagoas. I. Lopes, Adriana Carla de Oliveira. II. Título.

CDU 658.5

## **Folha de Aprovação**

BRUNO SANTANA DOS SANTOS

### **PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DO ÓLEO DE MACROALGAS DO LITORAL SUL DE ALAGOAS: DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO PRODUTO E ANÁLISE DE VARIÁVEIS DE PROCESSO**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado à Universidade Federal de Alagoas - UFAL, Campus de Arapiraca, Unidade Educacional de Penedo, como pré-requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Data de Aprovação: 05/ 12/ 2022.

### **Banca Examinadora**

---

Prof.<sup>a</sup> Dra. Adriana Carla de Oliveira Lopes  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca, Unidade Educacional de Penedo*  
(Orientador)

Prof.<sup>a</sup> Dra. Luanda Regina Reis Lima  
Universidade de Pernambuco – UPE  
(Examinadora)

---

Prof.<sup>a</sup> Me. Larissa Farias Almeida  
Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
*Campus Arapiraca, Unidade Educacional de Penedo*  
(Examinadora)

## DEDICATÓRIA

*Primeiramente a Deus por sempre me  
proteger e me livrar de todo mal.  
Aos meus pais, Luciana Santana e José Pedro,  
por acreditarem em mim e me apoiarem.*

## **AGRADECIMENTOS**

A vida é feita de fases e após seis anos, mais uma se encerra e junto com ela um sonho que foi alcançado com muito esforço, dedicação e apoio.

Ao longo de mais de seis anos de curso, o caminho foi repleto de desafios, porém nunca fiquei desamparado. Assim, refiro-me:

A Deus, o autor da vida, que me proporcionou viver um sonho de infância e jamais me abandonou durante toda minha vida.

Sou grato aos meus pais, José Pedro dos Santos e Luciana Maria de Santana, que sempre me ajudaram da melhor forma possível e me apoiaram em cada decisão. Agradeço também a meus avós, tios, tias, primos e irmãos que fazem parte dessa conquista.

Gratidão a minha namorada e amiga Karolaine Monteiro e ao meu amigo Sávio Iury, cada um de vocês contribuíram de formas diferentes durante todo esse percurso.

Sou grato a minha orientadora, à Prof.<sup>a</sup> Dra. Adriana Carla de Oliveira Lopes por ter me ajudado nesta etapa se dedicando à minha orientação, pelos conselhos, paciência e conhecimentos repassados durante o curso, sendo fundamental na minha formação.

Quero agradecer também aos demais professores que pude ter a oportunidade de conhecer ao decorrer do curso, onde pude aprimorar meus conhecimentos com a ajuda de cada um deles. Além disso, sou grato a todos os meus colegas de curso que fizeram parte da minha jornada.

Agradeço imensamente ao laboratório de química do Instituto Federal de Alagoas (IFAL) do Campus Maceió-AL pela valiosa contribuição em termos de caracterização do óleo e análises para a obtenção da conversão do óleo em biodiesel.

Agradeço à Prof.<sup>a</sup> Dra. Luanda Regina Reis Lima e à Prof.<sup>a</sup> Me. Larissa Farias Almeida pelo aceite do convite de participar da banca examinadora e por todas as contribuições neste trabalho.

Enfim, agradeço a Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por toda oportunidade em todos esses anos de curso.

“Sonhos determinam o que você quer. Ação determina o que você conquista”.

Aldo Novak

## RESUMO

A utilização de macroalgas marinhas encontradas nas praias do litoral sul de Alagoas para a produção de biodiesel, indica não só uma rota alternativa para a síntese desse biocombustível como também apresenta um emprego para esses resíduos de macroalgas que causam uma problemática para comerciantes e moradores do litoral sul alagoano que vivem do turismo, pois as mesmas, trazidas pelas ondas, se acumulam nas areias das praias exalando mau cheiro e quando removidas de forma indevida podem causar problemas à saúde humana. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo realizar os experimentos de produção do biodiesel a partir do óleo extraído das macroalgas marinhas do litoral sul de Alagoas, visando o desenvolvimento sustentável do produto e análise dos efeitos principais das variáveis de processo com relação à conversão do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel. Para isso, foi utilizada como metodologia a técnica do planejamento fatorial completo com dois níveis e três variáveis de processo: temperatura de reação (30-70 °C); razão molar óleo/álcool (1:4-1:10) e concentração de catalisador hidróxido de sódio (0,5%-1,5%). A resposta de interesse para este planejamento experimental foi a conversão do óleo de resíduos de macroalgas marinhas em biodiesel. Diante disso, foram constatados que os efeitos da temperatura de reação e a razão molar óleo/álcool foram significativos, promovendo uma variação média de 6,185 % e 8,03% respectivamente, na conversão obtida através da reação de transesterificação. Por fim, foi comprovado que as macroalgas marinhas coletadas podem ser empregadas na produção de biodiesel.

**Palavras-chave:** Produção de Biodiesel, Macroalgas Marinhas, Variáveis de Processo.

## ABSTRACT

The use of marine macroalgae found on the beaches of the south coast of Alagoas for the production of biodiesel, not only indicates an alternative route for the synthesis of this biofuel, but also presents a use for these macroalgae residues that cause a problem for traders and residents of the coast. south of Alagoas who live off tourism, because the same, brought by the waves, accumulate on the sands of the beaches exhaling a bad smell and when improperly removed can cause problems to human health. Therefore, the present work aims to carry out biodiesel production experiments from oil extracted from marine macroalgae on the southern coast of Alagoas, aiming at the sustainable development of the product and analysis of the main effects of process variables in relation to oil conversion. of marine macroalgae in biodiesel. For this, the technique of full factorial design with two levels and three process variables was used as a methodology: reaction temperature (30-70 °C); oil/alcohol molar ratio (1:4-1:10) and sodium hydroxide catalyst concentration (0,5%-1,5%). The response of interest to this experimental design was the conversion of marine macroalgae waste oil into biodiesel. Therefore, it was verified that the effects of the reaction temperature and the oil/alcohol molar ratio were significant, promoting an average variation of 6.185% and 8.03% respectively, in the conversion obtained through the transesterification reaction. Finally, it was proven that the collected marine macroalgae can be used in the production of biodiesel.

**Keywords:** *Biodiesel Production, Marine Macroalgae, Process Variables.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Praia Pontal do Peba	15
Figura 2 – Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil	18
Figura 3 - Produção de biodiesel por região em 2021	19
Figura 4 - Matéria prima para produção de biodiesel por Região em 2021	20
Figura 5 - Reação de transesterificação	21
Figura 6 - Autor do presente trabalho realizando a coleta de algas marinhas	26
Figura 7 - Macroalgas verde e vermelha	27
Figura 8 - Macroalgas verde e marrom/parda	27
Figura 9 - Autor do presente trabalho realizando as reações de transesterificação em bancada	28
Figura 10 - Produção de biodiesel de macroalgas marinhas via transesterificação	28
Figura 11 - Fluxograma do procedimento experimental	29
Figura 12 - Diagrama de Pareto mostrando os efeitos principais e efeitos de interação das variáveis estudadas	32
Figura 13 - Superfície de resposta	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Intervalo de estudo das variáveis via transesterificação do óleo de macroalgas marinhas	23
Tabela 2 - Matriz de experimentos do planejamento fatorial completo contendo os resultados referentes as conversões do óleo em biodiesel de macroalgas marinhas	30
Tabela 3 - Cálculo do resíduo (e)	35
Tabela 4 - Análise da Variância (ANOVA)	36
Tabela 5 - Coeficientes de regressão para a resposta do planejamento experimental	37
Tabela 6 – Condição ótima para realização dos experimentos	38

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANOVA – Análise da Variância

c - Concentração

CEIB - Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel

e – Cálculo dos Resíduos

ep – Erro Padrão

FID - Detector de Ionização de Chama

g - Grama

GG - Grupo Gestor

gl – Graus de Liberdade

h - Hora

IFAL – Instituto Federal de Alagoas

mL – milímetro

pH - Potencial Hidrogeniônico

PIBIC - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

PNPB - Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel

QMRes – Quadrados Médios

R - Razão

SQRes – Soma de Quadrados

T – Temperatura

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

m<sup>3</sup> – Metros Cúbicos

% - Porcentagem

°C – Grau Celsius

C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH – Álcool Etanol Anidro

NaOH – Hidróxido de Sódio

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>14</b>
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
<b>3</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b>	<b>15</b>
<b>4</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>17</b>
4.1	Sustentabilidade	17
4.2	Biocombustíveis	17
4.3	Biodiesel	18
4.4	Algas Marinhas	20
4.5	Reação de Transesterificação	21
4.6	Planejamento Fatorial Completo	22
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>23</b>
5.1	Materiais	23
5.2	Planejamento Experimental	23
5.3	Procedimento Experimental	24
5.4	Coleta de Macroalgas Marinhas	26
5.5	Execução dos Experimentos	27
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>30</b>
6.1	Modelo Estatístico	34
6.2	Análise da Variância (ANOVA) e dos Coeficientes de Regressão	35
6.3	Superfície de Resposta	37
6.4	Condição Ótima dos Experimentos	38
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>40</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento da procura por combustíveis e a redução das reservas de petróleo, tem sido constatada ao longo dos anos (COBUS; PRADO, 2019). Assim, a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos tem ganhado destaque (OLIVEIRA; SUAREZ; SANTOS, 2008). Diante disso, pesquisas referentes a fontes energéticas foram realizadas, como por exemplo os biocombustíveis (COBUS; PRADO, 2019).

Os biocombustíveis são combustíveis derivados de biomassa, oleaginosas e outras fontes orgânicas. Os mais conhecidos no Brasil são o etanol e o biodiesel (SAUER, 2007).

Além de se enquadrar como um combustível renovável (ANP, 2022a) e possuir um rendimento similar ao diesel, o biodiesel ainda contribui menos para o efeito estufa, reduzindo a emissão de dióxido de carbono e gases tóxicos como o monóxido de carbono (o biodiesel ainda emite quase 80% a menos de CO<sub>2</sub> do que o diesel), e reduz em até 33% os óxidos de enxofre (LOPES, 2008). Além disso, ainda diminui a emissão de materiais particulados e hidrocarbonetos durante o processo de combustão (BATENI; SARAEIAN; ABLE, 2017).

O processo de produção de biodiesel mais utilizado no Brasil e no mundo é o de transesterificação/alcoolise (SUAREZ et al., 2009). Esta é uma reação química envolvendo triglicerídeos (de gorduras animais ou óleos vegetais) e um álcool, que forma o biodiesel (ésteres) e a glicerina (glicerol). Esses óleos e gorduras são substâncias classificadas como lipídeos (OLIVEIRA; SUAREZ; SANTOS, 2008). Para aumentar a velocidade de reação, é possível utilizar um catalisador ácido, básico ou até uma enzima (LOPES, 2008). Após as reações de transesterificação, é necessário purificar o biodiesel produzido, pois antes de sua comercialização é preciso que o mesmo atenda as especificações exigidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (ANP, 2022a).

Os biocombustíveis derivados de algas são considerados por muitos a resposta mais eficaz, renovável, sustentável e benéfica para o meio ambiente, sendo considerados biocombustíveis avançados, de terceira geração (VASSILEV; VASSILEVA, 2016).

Embora a maioria das macroalgas marinhas apresentem quantidades menores de óleos, quando comparadas as microalgas (seres unicelulares), estudos apontam espécies, principalmente de algas pardas, como a *Dictyota sandvicensis Sonder in Kützing (Phaeophyceae)*, que apresentam 20% do peso seco de lipídeos, o que evidencia a possibilidade de sua utilização para a produção de compostos a base de óleo (OILS, 2019).

Devido a ação das ondas, é comum encontrar na praia do pontal do Peba, litoral sul de Alagoas, toneladas de resíduos de sargaço (*Sargassum vulgare var.vulgare* e *Sargassum*

*horneri* ), gerando problemas aos moradores e visitantes do local por conta do apodrecimento da alga marinha, a qual exala mau cheiro. Mesmo estes resíduos podendo ser usados como adubo nos coqueirais da região, a quantidade retirada em carroças para aproveitamento do material orgânico é insuficiente para limpar a beira-mar por completo, segundo os moradores da comunidade (VINICÍUS, 2020).

Vários estudos foram realizados para a otimização do processo de produção de biodiesel, demonstrando conclusivamente que a eficiência da reação de transesterificação deste biocombustível depende da matéria-prima (gordura animal ou óleo vegetal) e pode ser influenciada por variáveis do processo como: óleo/ razão molar do álcool, concentração do catalisador e temperatura da reação (LOPES, 2008; COBUS; PRADO, 2019).

Logo, dentro de uma perspectiva de empregar os resíduos de macroalgas marinhas, no desenvolvimento de uma fonte renovável, não poluente e biodegradável de energia, este trabalho propôs estudar a produção de biodiesel a partir do óleo extraído desta biomassa residual, visando o desenvolvimento sustentável do produto e análise dos efeitos principais das variáveis de processo com relação à conversão do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel.

Portanto, espera-se que esta proposta contribua com o setor produtivo do biodiesel, principalmente na região nordeste do país, onde as macroalgas são facilmente encontradas nas faixas litorâneas, trazidas pela força da natureza.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem por objetivo realizar os experimentos de produção do biodiesel a partir do óleo extraído das macroalgas marinhas do litoral sul de Alagoas, visando o desenvolvimento sustentável do produto e análise dos efeitos principais das variáveis de processo com relação à conversão do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel.

### 2.2. Objetivos Específicos

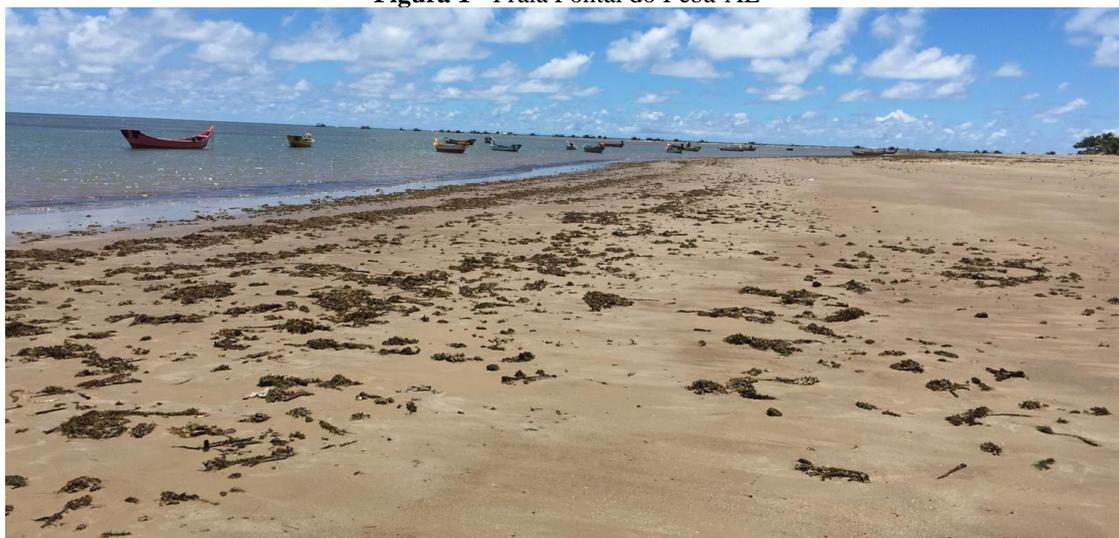
- Coletar os resíduos de macroalgas marinhas nas praias do litoral sul de Alagoas;
- Planejar um estudo estatístico para a análise do processo de produção do biodiesel a partir do óleo de resíduos de macroalgas, utilizando a técnica do planejamento experimental fatorial completo com três variáveis: temperatura de reação; razão molar óleo/álcool e concentração do catalisador hidróxido de sódio;
- Executar os experimentos de transesterificação, em escala de bancada, nas condições de uma matriz obtida pela técnica do planejamento experimental, para a produção do biodiesel;
- Obter e analisar os efeitos principais das variáveis de processo: temperatura de reação; razão molar óleo/álcool e concentração de catalisador hidróxido de sódio; utilizando a técnica do planejamento experimental, com relação à conversão (% massa) do óleo de macroalgas à biodiesel.

### 3. JUSTIFICATIVA

É comum encontrar na praia do pontal do Peba, litoral sul de Alagoas (Figura 1), toneladas de resíduos de sargaço, gerando problemas aos moradores e visitantes do local por conta do apodrecimento das algas marinhas, a qual exala mau cheiro e ocupação de espaço.

Esses resíduos são coletados para serem usados como adubo nos coqueirais da região, porém a quantidade retirada em carroças para aproveitamento do material orgânico é insuficiente para limpar a beira-mar por completo (VINICÍUS, 2020).

**Figura 1 - Praia Pontal do Peba-AL**



Fonte: Autor, 2022.

A utilização destes resíduos de macroalgas marinhas para a produção de biodiesel (combustível não poluente, menos tóxico que o óleo diesel e biodegradável) seria uma rota alternativa para o emprego desta biomassa residual. Além disso, estão relacionados com a desenvolvimento sustentável, pois aborda os três pilares da sustentabilidade: econômico, social e ambiental.

No pilar econômico, a produção de biodiesel pode gerar empregos para a população local e contribuir com a economia da mesma. Com relação ao pilar social, a produção de biodiesel possibilita a inclusão social promovendo o desenvolvimento da sociedade envolvida nesse processo (OLIVEIRA et al. 2012).

Com relação ao pilar ambiental, o biodiesel além de ser um combustível independente do petróleo, comparado ao óleo diesel do petróleo, diminui a emissão de gases tóxicos e ainda emite menos gás carbônico (CO<sub>2</sub>), principal contribuinte do efeito estufa (LOPES, 2008; BATENI et al., 2017; COBUS, 2019).

Assim, espera-se que este trabalho contribua com o setor produtivo do biodiesel, principalmente na região nordeste do país, onde as macroalgas são facilmente encontradas nas faixas litorâneas, trazidas pela força da natureza.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1. Sustentabilidade

A palavra sustentabilidade deriva do vocábulo latim "sustentari", tendo o significado de sustentar, resistir e conservar em bom estado. (PAZ; KIPPER, 2016). A sustentabilidade é composta de três dimensões/pilares que se relacionam: social, ambiental e econômico (DE OLIVEIRA CLARO; CLARO; AMÂNCIO, 2008).

Segundo Oliveira et al. (2012) o pilar econômico está relacionado com os empreendimentos viáveis, ou seja, atraentes para os investidores. Já o pilar ambiental, avalia a interação de processos com o meio ambiente sem causar danos permanentes. Por fim, o pilar social se preocupa com o estabelecimento de ações que sejam justas para parceiros, trabalhadores e sociedade. Juntos, esses três pilares se relacionam de tal forma que resulta no alcance da sustentabilidade (OLIVEIRA et al. 2012).

### 4.2. Biocombustíveis

Pode-se definir biocombustíveis como todo combustível proveniente de matéria-prima renovável (MOTA; MONTEIRO, 2013), que podem substituir, parcial ou totalmente, combustíveis derivados do petróleo e gás natural (BRASIL, 2022).

Os biocombustíveis podem ser classificados da seguinte forma:

- 1ª Geração: produzidos a partir de matérias-primas de origem alimentícia, como por exemplo o etanol de fermentação de açúcares e o biodiesel obtido a partir de óleos e gorduras (MOTA; MONTEIRO, 2013);
- 2ª Geração: podem ser obtidos a partir de fontes que não são adequadas ao consumo humano, como por exemplo subprodutos de cadeias agroindustriais (VIDAL, 2019);
- 3ª Geração: derivados de biomassa cultivada, como por exemplo, as algas marinhas (MOTA; MONTEIRO, 2013);
- 4ª Geração: podem ser produzidos a partir de culturas com alta eficiência solar (BRANCO, 2014), tendo como propósito produzir geneticamente microrganismos, como leveduras, microalgas, fungos e cianobactérias (GUEDES; SANTOS, DOS SANTOS; 2021).

Segundo Vidal (2022), no cenário mundial de produção e uso de biocombustíveis o Brasil tem se destacado devido a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar e do biodiesel derivados de gorduras de animais ou de óleos vegetais. O país ainda apresenta condições

climáticas favoráveis e experiência na produção de biocombustíveis, e tais vantagens devem ser aproveitadas (DELGADO; SOUSA; ROITMAN, 2017).

Além disso, com o objetivo de estimular a produção de biocombustíveis no país, o governo lançou o programa denominado RenovaBio que é a Política Nacional de biocombustíveis, que foi instituída pela Lei nº 13.576/201, com o intuito de assumir os compromissos relacionados ao acordo de Paris (ANP, 2022c).

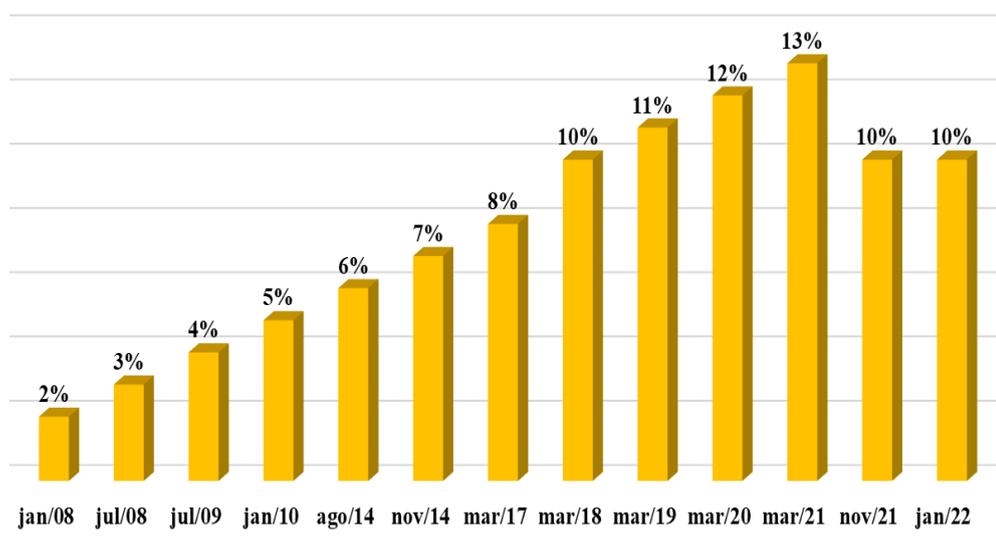
#### 4.3. Biodiesel

Segundo a ANP (2002a), o biodiesel é um combustível de origem renovável que pode ser obtido a partir de uma reação química denominada transesterificação. Em 2003 iniciou as pesquisas para o desenvolvimento de uma política para o biodiesel no Brasil, onde o governo federal criou a Comissão Executiva Interministerial do Biodiesel (CEIB) e do Grupo Gestor (GG), e em 2004 lançou o Programa de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB).

Com isso, a partir desse ano, o biodiesel passou a ser misturado ao diesel, apenas em caráter experimental e, somente entre o ano de 2005 e 2007, a comercialização passou a ser forma voluntária, no teor de 2%. O biodiesel só foi introduzido na matriz energética do Brasil em 2005, através do artigo 2º da Lei nº 11.097/2005, com isso, a mistura passou a ser obrigatória no teor de 2% (B2), em todo o território nacional (ANP, 2022a).

Com o passar dos anos o percentual de biocombustível presente no diesel fóssil foi ampliado, chegando aos 12% como pode ser visualizado na Figura 2.

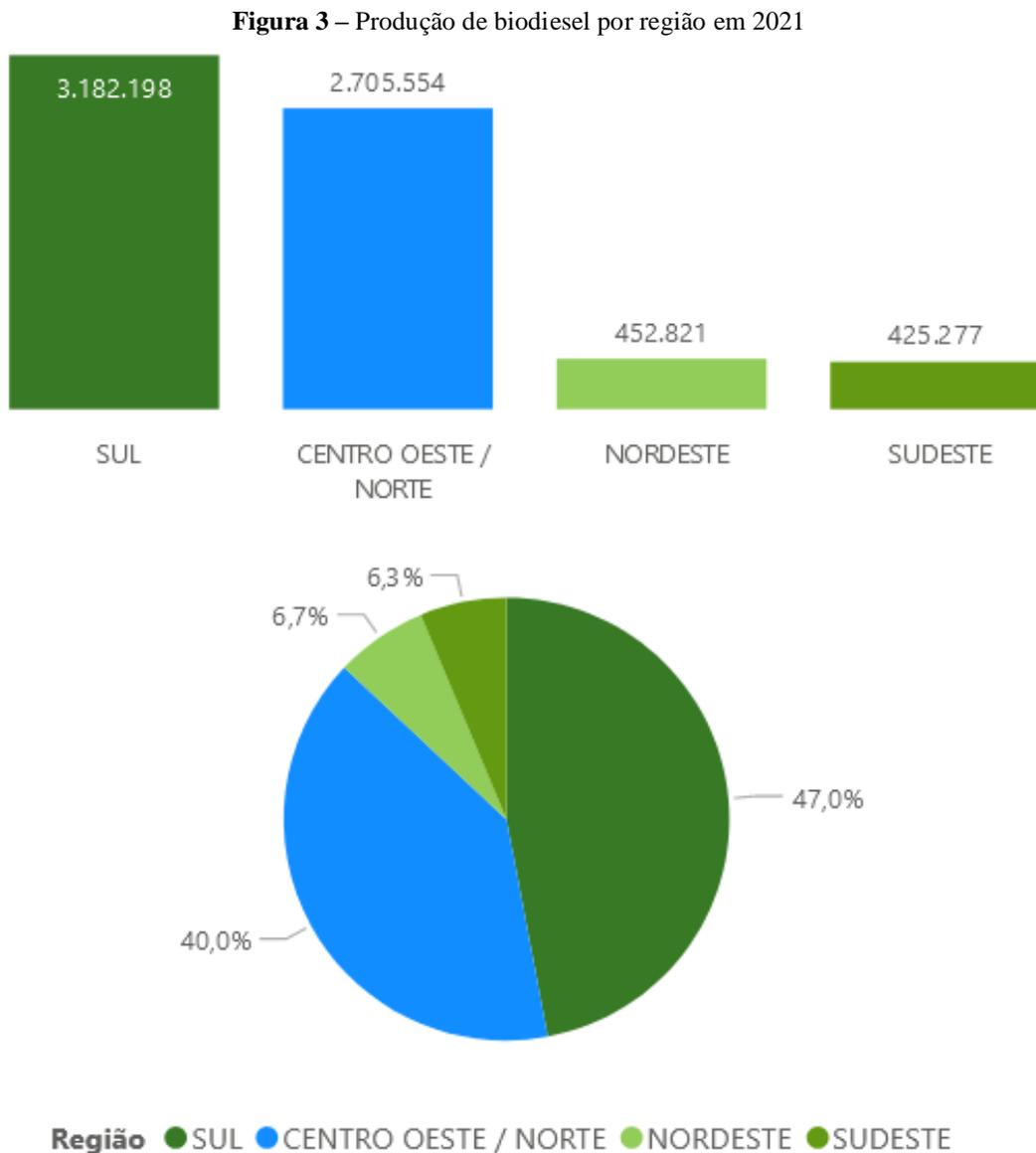
**Figura 2** - Evolução do percentual de teor de biodiesel presente no diesel fóssil no Brasil



Fonte: Adaptado de ANP, 2022a.

É possível perceber que foram realizados diversos aumentos de percentual do teor de biodiesel entre os anos de 2008 e 2022, mostrando a importância desse biocombustível para o país.

A Figura 3 apresenta a produção de biodiesel nas cinco regiões do Brasil.

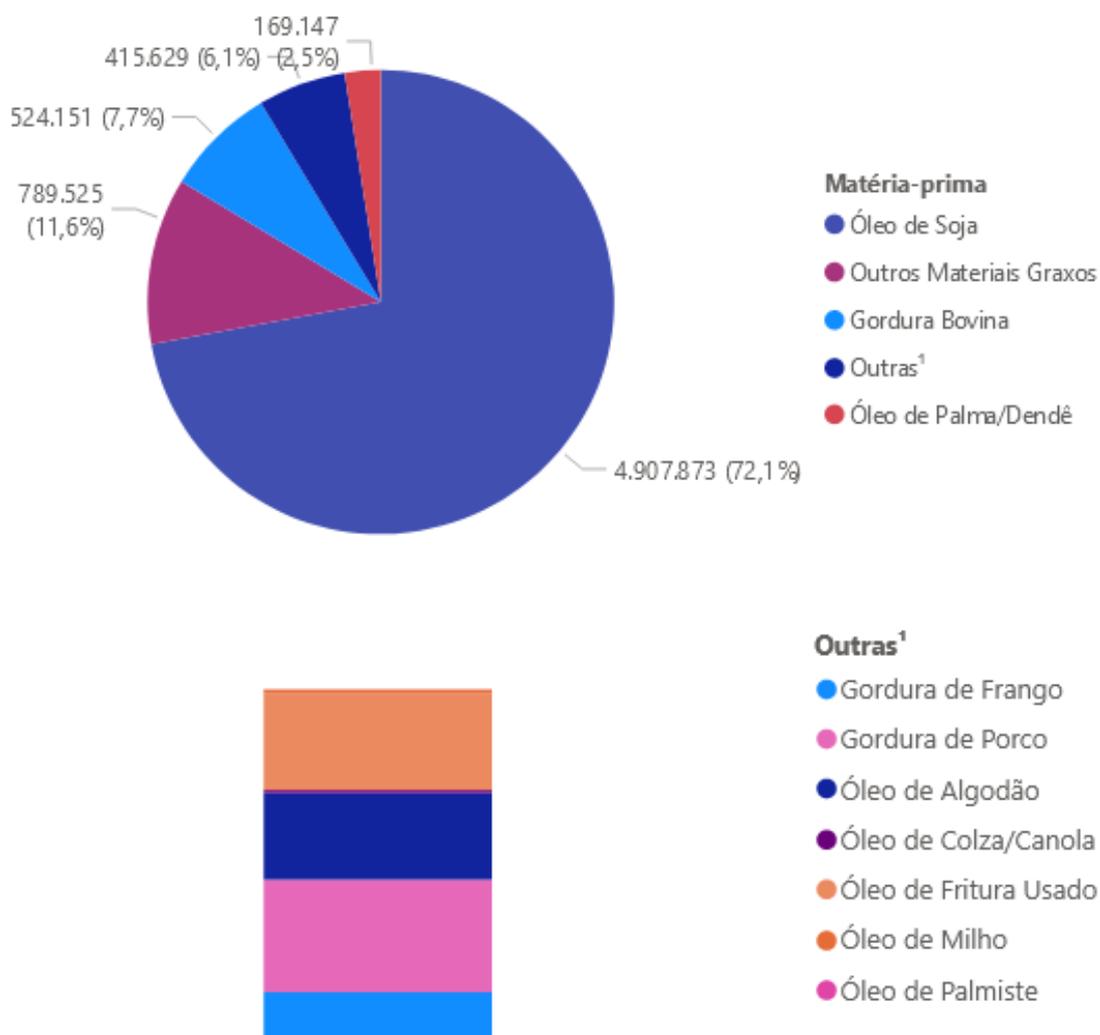


Fonte: ANP, 2022b.

Somando a produção de todas as regiões, foram produzidos cerca de 7 milhões de metros cúbicos de biodiesel no ano de 2021, sendo a Região Sul a principal produtora (ANP, 2022b).

De acordo com ANP (2022b), as matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel referente ao ano de 2021 podem ser visualizadas na Figura 4.

**Figura 4** – Matéria-prima para produção de biodiesel por Região em 2021



Fonte: ANP, 2022b.

A matéria-prima mais utilizada foi o óleo de soja com um percentual acima de 70% e o óleo de palma/dendê o menos utilizado.

#### 4.4. Algas Marinhas

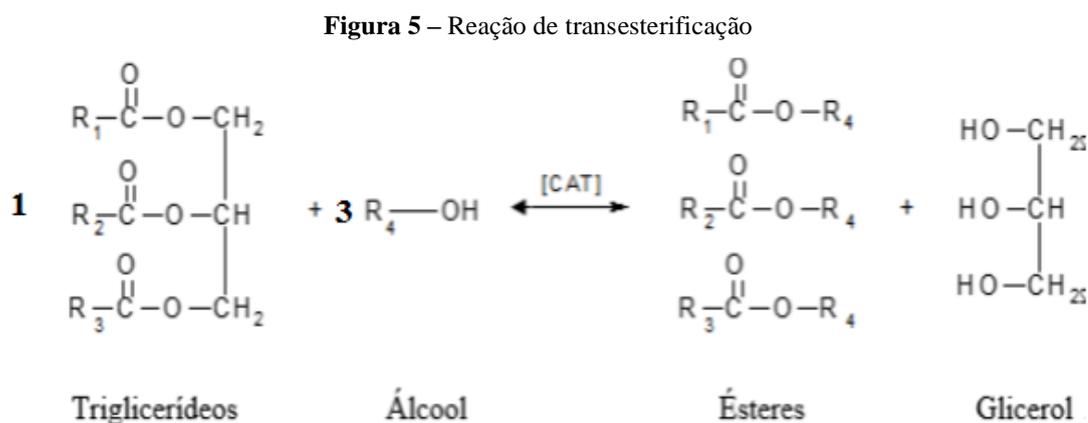
As algas consistem em vários grupos de organismos aquáticos, e podem ser divididas: microalgas e macroalgas. As microalgas marinhas são microrganismos invisíveis a olho nu. Já as macroalgas são visíveis a olho nu por serem bem maiores (HOMIAK, 2014).

As macroalgas, seres fotossintetizantes pertencentes ao domínio *Eukarya*, são algas de tamanhos consideráveis, de rápido crescimento, que se encontram agrupadas de acordo com a sua pigmentação e capacidade de armazenamento no talo (corpo das algas que não apresenta

folhas, raízes e caules): *Chlorophyta* (algas verdes), *Rhodophyta* (algas vermelhas) e *Ochrophyta-Phaeophyceae* (algas castanhas ou pardas) (PEREIRA; CORREIA, 2015). Devido à composição e variedade de macroalgas, estas são consideradas importantes fontes de inúmeros produtos com as mais variadas aplicações tais como na medicina tradicional, na alimentação, na agricultura: rações e biofertilizantes, na extração de pigmentos, entre outras. (CARDOSO et al., 2014).

#### 4.5. Reação de Transesterificação

As reação de transesterificação ou alcoólise está associada à conversão de óleos ou gorduras de origem animal ou vegetal, com álcoois de cadeia curta em biodiesel (Meneghetti; Meneghetti; BRITO, 2013), ou seja, essa reação ocorre quando os triglicerídeos reagem com etanol/metanol, (CHISTI, 2007). Segundo Santos (2009), a razão molar estequiométrica de álcool e óleo na transesterificação é de 3:1 (três mols de álcool para um mol de óleo), porém, um amplo excesso de álcool é utilizado para deslocar o equilíbrio químico a fim de maximizar a produção de ésteres graxos (Figura 5). Durante essa reação, são gerados alguns contaminantes, como o glicerol (glicerina) e resíduos de catalizadores (ALVES et al. 2016; BATENI; SARAEIAN; ABLE, 2017).



**Fonte:** Adaptado de Lopes, 2008.

Para que esse biodiesel formado seja comercializado, é necessário passar por um processo de purificação, para que sejam retirados ou reduzidos todos os poluentes (ANP,2022a), tais como, o catalisador e a glicerina.

#### 4.6. Planejamento Fatorial Completo

Para a realização de um planejamento fatorial, é necessário primeiro especificar os níveis onde cada fator deve ser estudado, ou seja, os valores dos fatores, que serão utilizados para realizar os experimentos. Já para fazer um planejamento fatorial completo, deve-se realizar experimentos com todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores (NETO; ESCARMINIO; BRUNS, 2001).

Segundo Bôssó (2012), a quantidade de experimentos para realização de um planejamento de experimentos com dois níveis e  $k$  variáveis pode ser obtido através da multiplicação de cada nível das  $k$  variáveis, ou seja,  $2^k$ , como mostra a Equação 1:

$$n = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^k \qquad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$n$  é a quantidade de experimentos realizados.

$k$  quantidade de variáveis.

Os planejamentos de dois níveis costumam-se identificar os níveis superior e inferior com os sinais (+) e (-), respectivamente. A atribuição desses sinais também pode ser feita para os níveis dos fatores qualitativos (NETO; ESCARMINIO; BRUNS, 2001).

É essencial realizar os ensaios em duplicatas, para que seja possível obter uma maneira de estimar o erro experimental, e com isso conseguir avaliar a significância dos efeitos (de interação e efeito principal). Portanto, é necessário que a duplicação seja uma repetição autêntica, seguindo todos os passos da primeira repetição (NETO; ESCARMINIO; BRUNS, 2001).

## 5. METODOLOGIA

Vale ressaltar que a extração do óleo foi realizada pela bolsista do projeto de pesquisa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) ciclo 2021/2022, tendo a orientadora deste trabalho como coordenadora de projeto e o discente Bruno Santana (autor deste TCC) como membro integrante da equipe executora.

### 5.1. Materiais

Os reagentes para a produção do biodiesel foram:

- o óleo extraído dos resíduos de macroalgas encontradas no litoral sul de Alagoas;
- o álcool etanol anidro ( $C_2H_5OH$ ) PA obtido comercialmente;
- o catalisador básico hidróxido de sódio (NaOH) PA obtido comercialmente.

### 5.2. Planejamento Experimental

A técnica do planejamento experimental fatorial completo que foi utilizada durante todo o estudo estatístico foi baseada na metodologia descrita por Neto et al. (2001), com o objetivo de analisar a influência das variáveis de processo selecionadas bem como seus efeitos de interação no processo de produção do biodiesel.

Para determinar as condições experimentais que possam maximizar a síntese de ésteres (biodiesel), resultantes da reação de transesterificação, foi realizado um planejamento experimental fatorial completo com 2 níveis e 3 variáveis. As variáveis analisadas nesta etapa foram: temperatura de reação; razão molar óleo/álcool etanol e concentração do catalisador hidróxido de sódio. Já o intervalo de estudo destas variáveis foi escolhido com o objetivo de abranger grande parte dos estudos Tabela 1.

**Tabela 1** – Intervalo de estudo das variáveis via transesterificação do óleo de macroalgas marinhas

Variável	Intervalo
Temperatura (°C)	30 -70
Concentração de NaOH (%p/p)	0,5-1,5
Razão molar óleo de macroalgas/etanol	1:4 -1:10

Fonte: Autor, 2022.

O uso do planejamento fatorial permitir expressar como as variáveis de processo influenciarão na conversão do óleo de macroalga marinha em biodiesel. De acordo com a técnica do planejamento experimental fatorial completo, se há três variáveis selecionadas

deverão ser realizados oito experimentos, feitos em duplicata, ou seja, ocorreram dezesseis experimentos, obedecendo a metodologia do planejamento experimental descrita por Neto et al. (2001).

Os efeitos principais e os efeitos de interação das variáveis selecionadas foram calculados de acordo com a metodologia descrita por Neto et al. (2001). No caso de um planejamento fatorial com dois níveis e  $k$  variáveis, o efeito  $E$  de uma determinada variável é calculado a partir da Equação 2:

$$E = \frac{1}{2^{k-1}} \times X_i^t \times Y \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$X^t$ : é a matriz linha que é obtida transpondo a coluna da matriz de planejamento correspondente à variável  $i$ ;

$Y$  é a matriz coluna obtida com os valores da variável resposta do planejamento.

### 5.3. Procedimento Experimental

- **Coleta dos resíduos de macroalgas marinhas:** As coletas de amostras compostas das macroalgas para posterior caracterização das espécies foram coletadas na praia do Pontal do Peba, localizadas no litoral sul de Alagoas, Nordeste do Brasil;
- **Extração:** Conforme já mencionado, essa etapa foi realizada pela bolsista do projeto de pesquisa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) ciclo 2021/2022, o qual teve a orientadora deste trabalho como coordenadora de projeto;
- **Caracterização do óleo de macroalgas marinhas:** Após a extração do óleo a partir dos resíduos de macroalgas marinhas, o mesmo foi encaminhado para a realização de análises via cromatografia gasosa (CG) em cromatógrafo *VARIAN*, modelo CP-3800 com Detector de Ionização de Chama (*FID*), com o intuito de obter a massa molar deste óleo para fins de cálculos estequiométricos necessários para às reações de transesterificação;
- **Reações de transesterificação:** As reações de transesterificação, bem como os processos de purificação do biodiesel foram realizados segundo a metodologia

de Lopes (2008). Após a extração do óleo a partir dos resíduos de macroalgas marinhas e verificação do melhor método, o mesmo foi submetido a um processo de transesterificação, obedecendo as condições do planejamento experimental já mencionadas. A quantidade de óleo utilizada foi de 70 g e adicionada a um balão de fundo redondo, já as quantidades de etanol ( $C_2H_5OH$ ) e do catalisador NaOH, bem como a temperatura de reação, seguiram os valores do planejamento de experimentos, de acordo com o intervalo de estudo das variáveis. O catalisador foi adicionado ao álcool gerando uma mistura homogênea, a qual foi adicionada ao óleo iniciando a reação de transesterificação cuja duração foi de uma hora (1h);

- **Processo de purificação:** A metodologia de purificação do biodiesel foi a mesma adotada por Lopes (2008). Depois de decorrido o tempo de reação, a fase inferior foi descartada e a fase superior da mistura reacional (contendo o biodiesel) foi transferida do balão onde se encontrava a mistura reacional, para um funil de separação, onde foram adicionados primeiramente 50 ml de uma solução de ácido sulfúrico 5,0% para neutralizar o catalisador básico NaOH, e após esta etapa o biodiesel foi purificado através da lavagem com água destilada. No fim de cada operação de lavagem, o pH da água utilizada foi medido, por meio de fitas de medição de pH e comparado com o da água destilada pura. Ao término do processo de lavagem, o pH do biodiesel apresentou um valor bastante próximo do referente à água destilada, indicando que as impurezas presentes no biodiesel já haviam sido removidas;
- **Obtenção da conversão do óleo de macroalgas em biodiesel:** No estudo da influência das variáveis selecionadas no processo de transesterificação, o parâmetro de avaliação foi a conversão (% massa) do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel, esta conversão foi determinada por cromatografia gasosa (CG), utilizando o cromatógrafo VARIAN, modelo CP-3800 com detector FID;
- **Análise dos efeitos das variáveis de processo:** Para a obtenção dos efeitos principais, dos efeitos de interação de duas e de três variáveis, foram utilizados os modelos matemáticos do planejamento experimental fatorial completo descrito por Neto et al. (2001).

#### 5.4. Coleta de Macroalgas Marinhas

Nesta etapa, foi realizada a coleta de Macroalgas na praia Pontal do Peba, localizada no município de Piaçabuçu, no Estado de Alagoas (Figura 6).

**Figura 6** - Autor do presente trabalho realizando a coleta de algas marinhas



**Fonte:** Autor, 2022.

A Praia do Pontal do Peba foi escolhida dentre todas as outras do litoral Sul de Alagoas, pois ela está localizada perto do local de moradia do autor deste trabalho e por conter os três tipos de macroalgas marinhas que foram citadas anteriormente, como mostra as Figuras 7 e 8.

**Figura 7** – Macroalgas verde e vermelha**Figura 8** – Macroalgas verde e marrom/parda

**Fonte:** Autor, 2022.

A coleta das macroalgas foi realizada no mês de janeiro de 2022, apenas uma única vez, já que as amostras foram suficientes para realizar todos os experimentos.

### 5.5. Execução dos Experimentos

Nesta etapa, foi iniciada a execução dos experimentos para a produção do biodiesel via reação de transesterificação. A Figura 9, mostra o autor do presente trabalho, Bruno Santana, executando uma das principais etapas correspondente à produção do biodiesel através de macroalgas marinhas.

O procedimento experimental consistiu em adicionar o óleo extraído dos resíduos de macroalgas marinhas, assim como a mistura homogênea de etanol mais catalisador NaOH a um balão de fundo redondo.

Após cada reação de transesterificação (Figura 10), ocorreu o processo de purificação do biodiesel realizado pela colaboradora do projeto PIBIC 2021/2022 do qual a orientadora e autor deste trabalho fazem parte, só após a purificação deste biocombustível, as amostras de biodiesel foram levadas ao laboratório de química do Instituto Federal de Maceió (IFAL) para as análises de conversão do óleo em biodiesel, essas análises foram feitas via cromatografia gasosa, utilizando o cromatógrafo VARIAN, modelo CP-3800 com detector FID.

**Figura 9** – Autor do presente trabalho realizando as reações de transesterificação em bancada



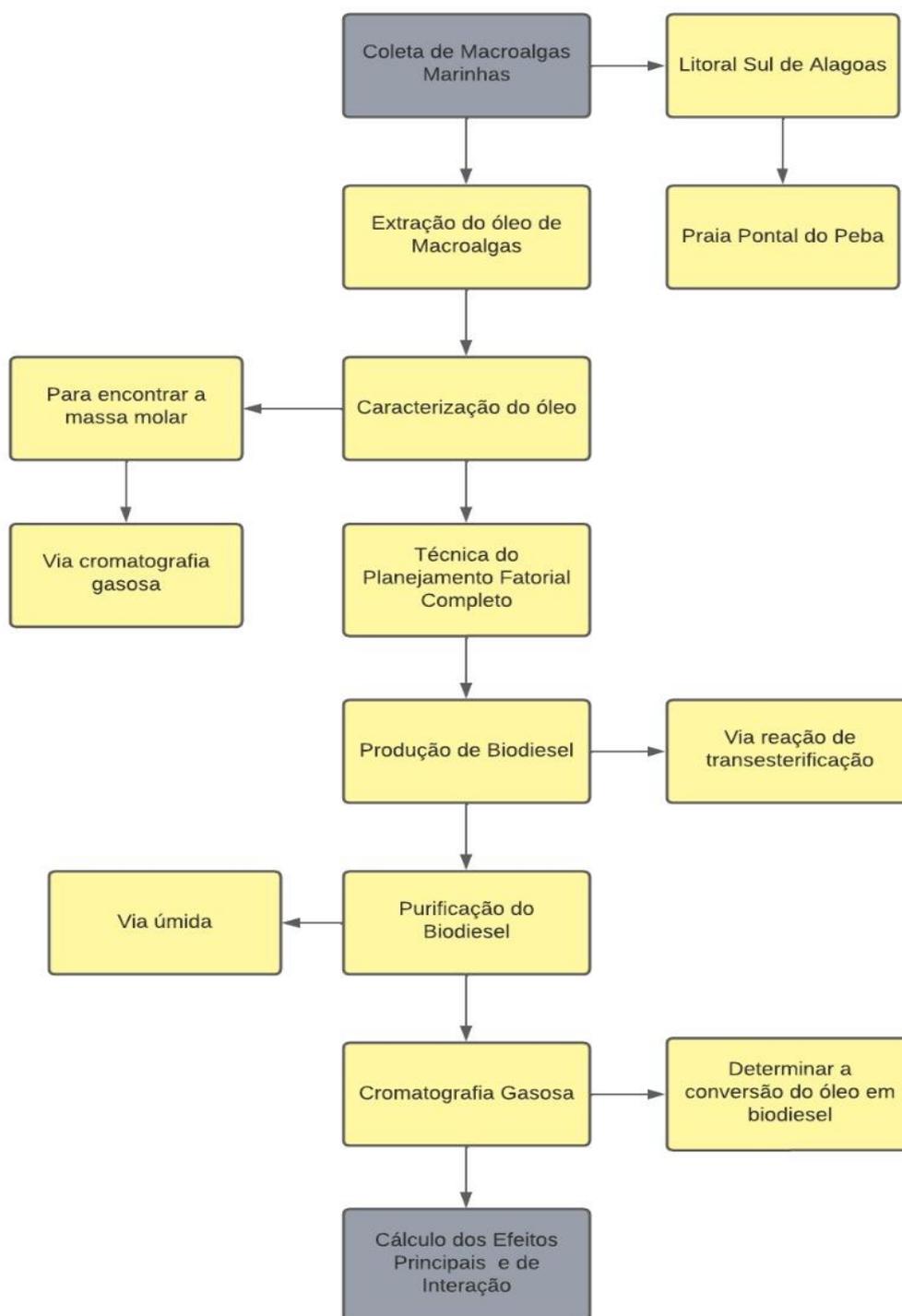
**Figura 10** – Produção de biodiesel de macroalgas marinhas via transesterificação



**Fonte:** Autor, 2022.

Todas as etapas do procedimento experimental do presente trabalho pode ser visualizadas através da Figura 11:

**Figura 11** – Fluxograma do procedimento experimental



**Fonte:** Autor, 2022.

Ao analisar o procedimento experimental, é possível perceber que ao todo foram realizadas 8 etapas para sua conclusão, iniciando com a coleta de macroalgas e finalizando com a realização dos cálculos dos efeitos principais e de interação.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a obtenção das conversões (%massa) do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel, via cromatografia gasosa (CG) realizadas no Instituto Federal de Alagoas, foram executados todos os experimentos previstos na matriz de experimentos conforme a Tabela 2. A técnica do planejamento fatorial completo utiliza-se o -1 para representar o limite inferior e +1 para representar o limite superior do intervalo das variáveis estudadas.

**Tabela 2** – Matriz de experimentos do planejamento fatorial completo contendo os resultados referentes as conversões do óleo em biodiesel de macroalgas marinhas

<b>Experimento</b>	<b>Temperatura da reação (°C)</b>	<b>Concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p)</b>	<b>Razão molar óleo de macroalga/etanol</b>	<b>Conversão do óleo de macroalga em biodiesel (%)</b>
<b>1</b>	30/-1	0,5/-1	1:4/-1	46,23
<b>2</b>	70/+1	0,5/-1	1:4/-1	54,17
<b>3</b>	30/-1	1,5/+1	1:4/-1	43,12
<b>4</b>	70/+1	1,5/+1	1:4/-1	55,45
<b>5</b>	30/-1	0,5/-1	1:10/+1	56,73
<b>6</b>	70/+1	0,5/-1	1:10/+1	58,65
<b>7</b>	30/-1	1,5/+1	1:10/+1	56,68
<b>8</b>	70/+1	1,5/+1	1:10/+1	59,13

**Fonte:** Autor, 2022.

Utilizando a técnica do planejamento fatorial completo, a Tabela 2 foi transformada em uma matriz “X”, contendo apenas os elementos +1 e -1.

Com relação às conversões do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel, os valores obtidos via cromatografia gasosa foram os seguintes:

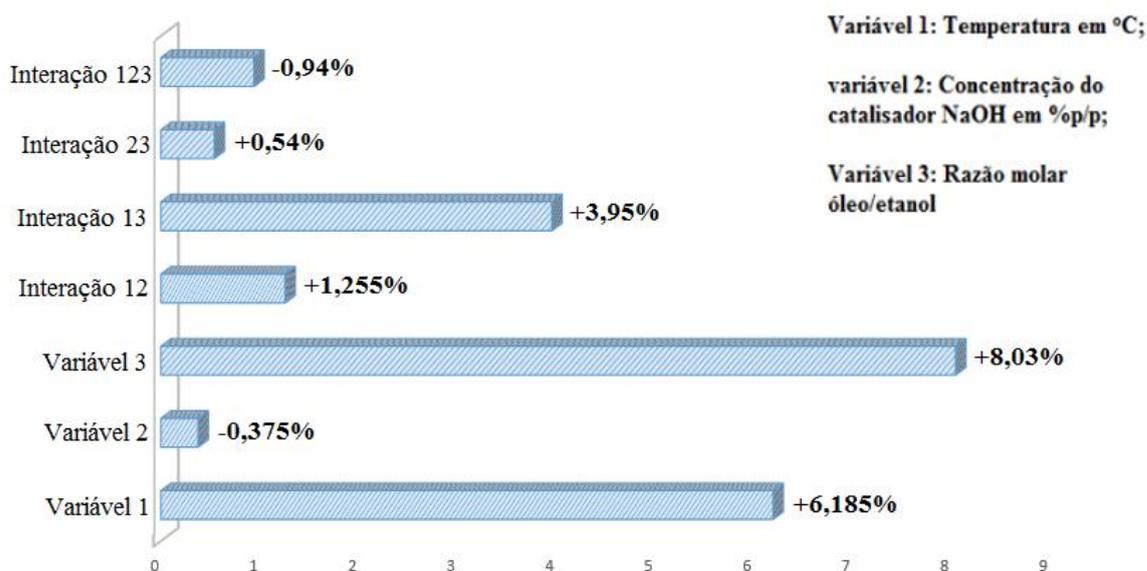
- **Experimento 1:** temperatura de reação igual a 30 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 0,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:4; A conversão do óleo de macroalgas em biodiesel obtida foi de 46,23%.

- **Experimento 2:** temperatura da reação igual a 70 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 0,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:4; a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel, obtida foi de 54,17%.
- **Experimento 3:** temperatura da reação igual a 30 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 1,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:4, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 43,12%.
- **Experimento 4:** temperatura da reação igual a 70 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 1,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:4, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 55,45%.
- **Experimento 5:** temperatura da reação igual a 30 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 0,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:10, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 56,73%.
- **Experimento 6:** temperatura da reação igual a 70 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 0,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:10, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 58,65%.
- **Experimento 7:** temperatura da reação igual a 30 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 1,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:10, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 56,68%.
- **Experimento 8:** temperatura da reação igual a 70 °C; concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p) igual a 1,5; e razão molar óleo de macroalga/etanol igual a 1:10, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi de 59,13%.

Após a realização de todas as reações e tendo o conhecimento dos valores numéricos da conversão (%massa) do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel, foram realizadas as análises das influências dos efeitos principais e efeitos de interação das variáveis de processo (temperatura de reação, razão molar óleo/álcool etanol e concentração do catalisador hidróxido de sódio).

O programa *Smath Studio* permite a realização de cálculos algébricos, tais como produtos matriciais, presentes nos modelos matemáticos da técnica estatística aqui mencionada. Assim, a versão *free* deste programa foi utilizada como ferramenta para efetuar os cálculos e obter estes efeitos, sendo representados graficamente no diagrama de *Pareto* (Figura 12).

**Figura 12** – Diagrama de Pareto mostrando os efeitos principais e efeitos de interação das variáveis estudadas



Fonte: Autor, 2022.

Desta forma, estes efeitos representam a influência que cada variável exerce, isoladamente, sobre a resposta do sistema (a conversão em biodiesel), e podem ser interpretados da seguinte maneira:

- **Efeito principal variável 1 (temperatura de reação):** se a temperatura de reação aumentar de 30 para 70° C, mantendo as outras variáveis constantes, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá aumentar, em média, 6,185%;
- **Efeito principal variável 2 (concentração em peso do catalisador NaOH):** se a concentração do catalisador NaOH aumentar de 0,5% a 1,5%, mantendo as outras variáveis constantes, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá diminuir, em média, 0,375%;
- **Efeito principal variável 3 (razão molar óleo de macroalga/etanol):** se a razão molar óleo de macroalga/etanol aumentar de 1:4 para 1:10, mantendo as outras variáveis constantes, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá aumentar, em média, 8,03%.

Já as interações das variáveis podem ser interpretadas da seguinte forma:

- **Interação das variáveis 1 e 2:** Significa que se a temperatura de reação aumentar de 30 para 70° C e a se a concentração em peso do catalisador hidróxido de sódio aumentar de

0,5 para 1,5%, mantendo a variável razão molar óleo/etanol constante, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá aumentar, em média, 1,255%;

- **Interação das variáveis 1 e 3:** Significa que se a temperatura de reação aumentar de 30 para 70° C e a razão molar óleo/etanol aumentar de 1:4 para 1:10, mantendo a concentração do catalisador hidróxido de sódio constante, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá aumentar, em média, 3,95%;
- **Interação das variáveis 2 e 3:** Significa que se a concentração em peso do catalisador hidróxido de sódio aumentar de 0,5 para 1,5% e a razão molar óleo/etanol aumentar de 1:4 para 1:10, mantendo a temperatura da reação constante, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá aumentar, em média, 0,54%;
- **Interação das variáveis 1, 2 e 3:** Significa que se a se a temperatura de reação aumentar de 30 para 70° C, e a concentração em peso do catalisador hidróxido de sódio aumentar de 0,5 para 1,5% e a razão molar óleo/etanol aumentar de 1:4 para 1:10, a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel irá diminuir, em média, 0,94%.

Com relação às conversões, considerando as condições de cada experimento, pode-se perceber que a variável concentração de catalisador não apresentou considerável influência na resposta conversão. Já as variáveis temperatura de reação e razão molar óleo/álcool foram as que mais influenciaram, de forma positiva, nas conversões do óleo de macroalgas em biodiesel.

O aumento da razão molar óleo/álcool de 1:4 para 1:10 aumentou o percentual de conversão, assim como a variável temperatura de reação, causou considerável aumento nesta resposta, quando seu valor passou de 30°C para 70°C.

Analisando os efeitos de interação de duas e de três variáveis de processo, foi verificado que o efeito de interação que mais se destacou com relação a conversão do óleo de macroalgas em biodiesel foi o efeito de interação entre as variáveis temperatura de reação e razão molar álcool/óleo apresentando um aumento na conversão de 3,95%;

Os resultados encontrados podem ser explicados pela teoria do equilíbrio químico (BRADY. HUMISTON, 1986), sendo aplicadas para reações reversíveis, como é o caso da transesterificação do biodiesel (MURAYAMA, 1994; MA; HANNA 1999). Ela menciona que quanto maior a temperatura, para reação endotérmica (a qual absorve energia), o equilíbrio desloca-se no sentido de formação dos produtos da reação. A teoria também diz que quando a concentração do reagente aumenta, como foi o caso do aumento da quantidade em mols do reagente álcool (de 4 para 10 mols), o equilíbrio químico desloca-se para o sentido de formação

dos produtos, fazendo com que a conversão do reagente em produto seja aumentada (BRADY; HUMISTON, 1986).

### 6.1. Modelo Estatístico

Através dos dados experimentais obtidos, foi elaborado um modelo linear com as variáveis estudadas codificadas pela letra x. Este modelo serviu para estimar o rendimento de biodiesel de macroalgas marinhas usando valores codificados das variáveis estudadas no presente trabalho. Estes valores codificados devem pertencer ao intervalo  $-1 \leq x \leq +1$ , o qual foi considerado neste trabalho.

Sendo assim, foi adotado o modelo linear para a previsão das respostas desejadas (Equação 3):

$$\beta = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{123}x_1x_2x_3 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde  $x_i$  são variáveis codificadas. Como no presente trabalho está sendo considerado apenas os níveis baixo e alto,  $x_i$  assume os valores -1 e +1.

Ademais,  $\beta = \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23} + e \beta_{123}$  são os parâmetros do modelo de regressão, que podem ser estimados através do método dos mínimos quadrados.

Para fins práticos, a estimativa de  $\beta_0$  é a média geral das respostas e, as estimativas dos demais parâmetros foram obtidas através da metodologia descrita por Neto et al. (2001), como mostra a Equação 4.

$$\beta = (X^t X)^{-1}X^tY \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$X^t$  é a transposta;

$X$  é a matriz de planejamento;

$Y$  é a matriz coluna contendo as respostas do planejamento.

O modelo linear obtido para o processo de produção do biodiesel de macroalgas marinhas do presente trabalho é apresentado a seguir:

$$y = 53,7575 + 3,095x_1 - 0,1875x_2 + 4,015x_3 + 0,6275x_1x_2 - 1,975x_1x_3 + 0,27x_2x_3 - 0,47x_1x_2x_3 \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

y é a estimativa da resposta conversão em biodiesel de macroalgas marinhas;

x<sub>1</sub> é variável codificada da temperatura e que pertence ao intervalo:  $-1 \leq x \leq +1$ ;

x<sub>2</sub> é variável codificada concentração do catalisador e que pertence ao intervalo:  $-1 \leq x \leq +1$ ;

x<sub>3</sub> é variável codificada da razão molar óleo/etanol e que pertence ao intervalo:  $-1 \leq x \leq +1$ ;

## 6.2. Análise da variância (ANOVA) e dos coeficientes de regressão

Calculando os valores estimados através do modelo linear já apresentado, tem-se os valores descritos na Tabela 3. E na Tabela 4 é apresentada a análise da variância (ANOVA).

**Tabela 3:** Cálculo do resíduo (e)

Respostas (Y)	Estimados (y)	e = Y - y	e <sup>2</sup>
44,71	44,97	-0,26	0,0676
47,75	44,97	2,78	7,73
56,89	55,43	1,46	2,13
51,45	55,43	3,98	15,84
41,82	44,37	-2,55	6,5
44,42	44,37	0,05	0,0025
56,87	54,19	2,68	7,18
54,03	54,19	-0,16	0,0256
57,31	55,47	1,84	3,38
56,15	55,47	0,68	0,4624
59,24	59,91	-0,67	0,4489
58,06	59,91	-1,85	3,42
57,18	57,83	-0,65	0,42
55,98	57,83	-1,85	3,42
57,67	57,88	-0,21	0,044
60,59	57,88	2,71	7,34

Fonte: Autor, 2022.

**Tabela 4:** Análise da variância (ANOVA)

Fonte de variação	Graus de liberdade (gl)	Soma de quadrados (SQRes)	Quadrados médios (QMRes)
Resíduo	8	58,41	7,3

**Fonte:** Autor, 2022.

Onde:

gl = é a diferença entre o número de observações e o número de parâmetros estimados, isto é,

gl = n-p;

QMRes é a razão entre soma dos quadrados e os graus de liberdade, isto é,

$$QMRes = \frac{\sum e^2}{gl} \quad \text{Equação (6)}$$

Conforme já mencionado, através dos resultados obtidos no planejamento experimental foi possível determinar os coeficientes de regressão que estão apresentados na Tabela 6 juntamente com o erro padrão (ep) dos mesmos calculados através das seguintes equações:

Para calcular o erro padrão para o coeficiente da constante  $\beta_0$  utilizou a Equação 7:

$$ep(\beta_0) = \sqrt{\frac{QMRes}{n}} \quad \text{Equação (7)}$$

E para calcular o erro padrão dos demais coeficientes  $\beta$  utilizou a Equação 8:

$$ep(\beta) = \sqrt{\frac{4 \times QMRes}{n}} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

QMRes é o quadrado médio dos resíduos;

n é o número de observações. No presente trabalho foi igual a 16.

Analisando estes coeficientes de regressão e o erro padrão pode-se determinar aqueles que foram estatisticamente significativos, conforme Tabela 5.

**Tabela 5:** Coeficientes de regressão para a resposta do planejamento experimental

Variáveis	Coeficientes de regressão	Erro padrão
Média	53,7575	0,67
Temperatura [T]	3,095	1,35
Concentração de catalisador [C]	-0,1875	1,35
Razão molar óleo: álcool [R]	4,015	1,35
Efeito de interação: T x C	0,6275	1,35
Efeito de interação: T x R	-1,975	1,35
Efeito de interação: R x C	0,27	1,35
Efeito de interação: TxCxR	-0,47	1,35

Fonte: Autor, 2022.

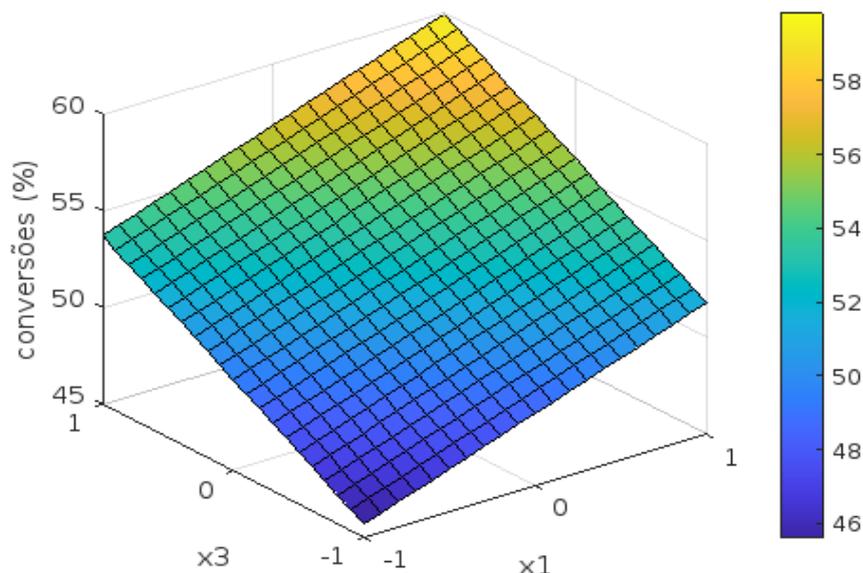
O coeficiente da variável concentração de catalisador e os coeficientes dos efeitos de interação de duas variáveis: temperatura com a concentração de catalisador e razão molar óleo/álcool com a concentração do catalisador, assim como o coeficiente do efeito de interação das três variáveis não são estatisticamente significativos, visto que são menores que o erro padrão encontrado. Podendo, portanto, serem descartados no modelo linear.

Após a análise dos coeficientes de regressão, o modelo estatístico linear para o cálculo do rendimento de biodiesel de macroalgas marinhas pode ser representado através da Equação 9:

$$y = 53,7575 + 3,095x_1 + 4,015x_3 - 1,975x_1x_3 \quad \text{Equação (9)}$$

### 6.3. Superfície de resposta

A descrição gráfica do modelo ajustado  $y = 53,7575 + 3,095x_1 + 4,015x_3 - 1,975x_1x_3$ , também conhecida como superfície de respostas, pode simplificar a interpretação dos resultados, conforme a Figura 13.

**Figura 13:** Superfície de respostas

**Fonte:** Autor, 2022.

Analisando a superfície de respostas, pode-se observar que nos intervalos estudados, as maiores conversões do óleo de macroalgas marinhas em biodiesel ocorreram para níveis altos de temperatura e níveis altos para a razão molar óleo/álcool.

#### 6.4. Condição ótima dos experimentos

A partir dos resultados obtidos, foi possível encontrar a condição ótima referente ao intervalo das variáveis que mais influenciaram durante as reações, conforme a Tabela 6:

**Tabela 6:** Condição ótima para realização dos experimentos

Variáveis	Configuração Ótima
Temperatura de reação (°C)	70°C
Concentração em peso do catalisador NaOH (%p/p)	0,5%
Razão molar óleo/álcool	1:10

**Fonte:** Autor, 2022.

Assim, a temperatura de reação teve maior influência quando foi aumentada para 70°C, enquanto a concentração do catalisador NaOH influenciou mais a 0,5% e a razão molar óleo/álcool em 1:4.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante deste trabalho, foi possível conhecer o processo de produção de biodiesel a partir dos resíduos de macroalgas marinhas e sua importância para o desenvolvimento sustentável.

Percebeu-se também, que os resultados obtidos mostraram que o biodiesel pode ser produzido a partir do óleo de resíduos de macroalgas marinhas encontradas nas praias do litoral sul de Alagoas. Observou-se também que o planejamento experimental fatorial foi eficiente no estudo da influência das variáveis de processo utilizadas. Sendo assim, os efeitos temperatura de reação e a razão molar óleo/álcool foram significativos, promovendo uma variação média de 6,185 % e 8,03% respectivamente, na conversão obtida pela reação de transesterificação. Já o efeito da variável concentração do catalisador hidróxido de sódio, comparado com os efeitos das variáveis temperatura de reação e razão molar óleo/etanol, não influenciou de forma significativa no processo estudado.

Além disso, percebeu-se também que o emprego dos resíduos de macroalgas para produção de biodiesel está relacionado com a sustentabilidade, que inclui os três pilares (econômico, social, ambiental), contribuindo para o melhor aproveitamento desse resíduo, pois a produção de biodiesel pode gerar empregos para a população, além de diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> e gases tóxicos, e contribuir com a economia brasileira.

Portanto, os resultados obtidos, com relação a influência das variáveis, puderam ser justificados pela teoria do equilíbrio químico. Desta forma, todos os objetivos do presente trabalho foram atingidos e podem contribuir com o enriquecimento da literatura para a comunidade científica em trabalhos futuros.

## **8. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

- Análise da glicerina livre e glicerina total resultante do processo de purificação do biodiesel;
- Estudo de diferentes catalisadores (homogêneos e heterogêneos);
- Desenvolvimento do modelo quadrático do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Magno José et al. Biodiesel dry purification with sugarcane bagasse. **Industrial Crops and Products**, v. 89, p. 119-127, out./2016.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Especificação do Biodiesel. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-e-mapa-dinamicos-de-produtores-de-combustiveis-e-derivados/painel-dinamico-de-produtores-de-biodiesel>. Acesso em: 15 de nov. de 2022a.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Painel Dinâmico de Produtores de Biodiesel. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 15 de nov. de 2022b.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. RenovaBio. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 15 de nov. de 2022c.

BATENI, H.; SARAEIAN, A.; ABLE, C. A comprehensive review on biodiesel purification and upgrading. **Biofuel Research Journal**, v. 4, n. 3, p. 668-690, set./2017.

BÔSSO, Antônio Rafael de Souza Alves et al. Desenvolvimento do Software PlanEx de planejamento de experimentos online e sua aplicação didática na pós-Graduação. 2012.

BRADY, J. E. HUMISTON, G. E. **Química Geral**. 2ª ed, vol.2, 1986.

BRANCO, Luizella Giardino Barbosa. Biocombustíveis: vantagens e desafios. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 3, n. 1, 2014.

BRASIL. Brasil Avança no Setor de Biocombustíveis, 12 de jul 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/07/brasil-avanca-no-setor-de-biocombustiveis>. Acesso em: 10 de nov. de 2022.

CARDOSO, Susana et al. Bioproducts from seaweeds: a review with special focus on the Iberian Peninsula. **Current Organic Chemistry**, v. 18, n. 7, p. 896-917, mai./2014.

CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, fev./2007.

COBUS, D.; PRADO, G. G. **Produção de biodiesel por transesterificação utilizando banho ultrassônico**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

DELGADO, Fernanda; SOUSA, Milas Evangelista de; ROITMAN, Tamar. Biocombustíveis. 2017.

DE OLIVEIRA CLARO, P. B.; CLARO, D. P.; AMÂNCIO, R. Entendendo o conceito de sustentabilidade nas organizações. **Revista de Administração-RAUSP**, v. 43, n. 4, p. 289-300, 2008.

GUEDES, J. M.; SANTOS, A. G. D.; DOS SANTOS, H. S dos. Uso da biomassa como fonte energética para produção de biocombustíveis. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, 2021.

HOMIAK, Juliana Aparecida. Produção de biodiesel utilizando microalgas. **SaBios-Revista de Saúde e Biologia**, v. 9, n. 2, p. 65-74, 2014.

LOPES, A. C. O. 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.

MA, F.; HANNA, M.A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**. v. 70, p. 1-15, 1999.

MENEGHETTI, S. P.; MENEGHETTI, M. R.; BRITO, Y. C. A reação de transesterificação, algumas aplicações e obtenção de biodiesel. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 1, p. 63-73, 2013.

MOTA, C. J.A.; MONTEIRO, R. S. Química e sustentabilidade: novas fronteiras em biocombustíveis. **Química Nova**, v. 36, p. 1483-1490, 2013.

MURAYAMA, Tadashi et al. **Evaluating vegetable oils as a diesel fuel**. Inform, v.5, n.10, 1994.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos – pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Ed. Unicamp: Campinas, 2001.

OILS, G. "Óleo de Algas Marinhas | Sea Weed Oil", 2019. Disponível em: <https://www.granoils.com.br/oleo-de-algas-marinhas-fitness-pele.html> . Acesso em: 10 nov de 2022.

OLIVEIRA, F. C.C; SUAREZ, P. A.Z; SANTOS, W.L.P. dos. Biodiesel: possibilidades e desafios. **Química Nova na Escola**, v. 28, n. 3, 2008.

OLIVEIRA, L. R. D., MEDEIROS, R. M., TERRA, P. D. B., QUELAS, O. L. G. (2012). Sustentabilidade: da evolução dos conceitos à implementação como estratégia nas organizações. *Production*, 22, 70-82.

PAZ, F. J.; KIPPER, L. M. Sustentabilidade nas organizações: vantagens e desafios. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, v. 11, n. 2, p. 85, 2016.

PEREIRA, L.; CORREIA, F. Macroalgas Marinhas da Costa Portuguesa - biodiversidade, ecologia e utilizações (1ª ed.): Notas de Rodapé Edições, 2015.

SANTOS, F. F. P. dos. **Produção de biodiesel assistida por ultrassom**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

SAUER, Ildo. Biocombustíveis no Brasil comercialização e logística. **BRASIL. Ministério das relações exteriores-MRE (Org.). Biocombustíveis no Brasil: realidades e perspectivas**. Brasília: Arte Impressora Gráfica LTDA, p. 34-59, 2007.

SUAREZ, Paulo AZ et al. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. **Química nova**, v. 32, p. 768-775, 2009.

VASSILEV, S. V., VASSILEVA, C. G. Composition, properties and challenges of algae biomass for biofuel application: An overview. **Fuel**, 181, 1-33, 2016.

VIDAL, Maria de Fátima. Produção e uso de biocombustíveis no Brasil. 2019.

VIDAL, Maria de Fátima. Indústria: Biocombustíveis-Biodiesel e Etanol. 2022.

VINÍCIUS, F. Sargaço na Praia do Peba. Piaçabuçu-AL, 2020. Disponível em: <https://piacabucu.al.gov.br> .Acesso em: 15 de out. de 2022.