

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ
SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO
CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL NEWTON FREIRE MAIA
CURSO TÉCNICO EM SISTEMAS DE ENERGIA RENOVÁVEL

POTENCIAL ENERGÉTICO DAS MICROALGAS: Uma Análise para Geração
Sustentável de Biocombustível

PINHAIS
2024

EMILY MARQUES DA SILVA
LIVIAN COLERE DE SOUZA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DAS MICROALGAS: Uma Análise para Geração
Sustentável de Biocombustível**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico de Sistemas de Energia Renovável do Centro Estadual de Educação Profissional Newton Freire Maia como parte do requisito para obtenção do título de Técnico em Sistemas de Energia Renovável.

Orientador (a): José Airton Gonçalves de Lima.

PINHAIS
2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos ao Professor José Airton, que foi nosso paião, nos orientando e apoiando em todos os momentos durante esta jornada no CEEP - Newton Freire Maia.

Agradecemos também ao professor Mateus e à professora Marcele, que são excelentes profissionais, por nos auxiliarem com a correção deste trabalho.

Agradecemos aos nossos familiares que nos apoiaram de maneira incondicional, sem eles não estaríamos aqui até hoje.

Por fim, agradecemos ao Professor André B. Mariano por ter achado um tempo em sua agenda para nos atender, e nos auxiliar com o que precisávamos para concluir este trabalho.

RESUMO

O aumento da demanda por fontes de energia sustentáveis e as crescentes preocupações ambientais têm impulsionado a busca por alternativas aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, as microalgas emergem como uma das principais alternativas para a produção de biocombustíveis, devido à sua alta capacidade de captura de CO₂ durante a fotossíntese e ao seu elevado teor lipídico, que pode ser convertido em biodiesel. Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial energético das microalgas para a produção de biocombustíveis, com foco nas espécies *Chlorella vulgaris*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Thalassiosira pseudonana*.

Foram analisados os métodos de cultivo em sistemas abertos e fechados, destacando as vantagens e limitações de cada abordagem. Enquanto os sistemas fechados, como fotobiorreatores, se mostram mais eficientes na produção de biomassa devido ao melhor controle das condições ambientais, eles apresentam custos mais elevados de instalação e manutenção. Por outro lado, os sistemas abertos, como lagoas, têm custos operacionais menores, mas são mais vulneráveis à contaminação e a variações climáticas, o que pode afetar a produção.

Os resultados demonstraram que as microalgas possuem grande potencial para substituir combustíveis fósseis, especialmente no setor de biocombustíveis líquidos, como o biodiesel. A transesterificação, que converte os lipídios das microalgas em biodiesel, foi identificada como uma metodologia viável, embora os custos associados ao processo ainda representem um desafio significativo para a viabilidade econômica.

Por fim, conclui-se que as microalgas representam uma fonte promissora de energia renovável e têm um papel crucial na transição energética global. No entanto, é necessário avançar no desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência dos processos de conversão e reduzam os custos de produção, a fim de viabilizar sua adoção em larga escala. Investimentos contínuos em pesquisa e inovação são essenciais para tornar as microalgas uma alternativa competitiva aos combustíveis fósseis no futuro.

Palavras-chave: microalgas, biocombustíveis, biodiesel, fotobiorreatores, transesterificação.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable energy sources and growing environmental concerns have driven the search for alternatives to fossil fuels. In this context, microalgae have emerged as one of the leading alternatives for biofuel production due to their high capacity to capture CO₂ during photosynthesis and their elevated lipid content, which can be converted into biodiesel. This study aims to evaluate the energy potential of microalgae for biofuel production, focusing on the species *Chlorella vulgaris*, *Phaeodactylum tricornutum*, and *Thalassiosira pseudonana*.

Cultivation methods in open and closed systems were analyzed, highlighting the advantages and limitations of each approach. While closed systems, such as photobioreactors, prove more efficient in biomass production due to better control of environmental conditions, they involve higher installation and maintenance costs. In contrast, open systems, such as ponds, have lower operational costs but are more vulnerable to contamination and climatic variations, which can affect production.

The results demonstrated that microalgae have great potential to replace fossil fuels, especially in the liquid biofuels sector, such as biodiesel. Transesterification, which converts microalgal lipids into biodiesel, was identified as a viable methodology, although the costs associated with the process still represent a significant challenge to economic feasibility.

In conclusion, microalgae represent a promising source of renewable energy and play a crucial role in the global energy transition. However, there is a need to advance the development of technologies that increase the efficiency of conversion processes and reduce production costs in order to enable their large-scale adoption. Continued investment in research and innovation is essential to make microalgae a competitive alternative to fossil fuels in the future.

Keywords: microalgae, biofuels, biodiesel, photobioreactors, transesterification.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MICROALGAS.....	8
FIGURA 2 - ALGAS VERDES (<i>Chlorella vulgaris</i>).....	9
FIGURA 3 - DIATOMÁCEAS (<i>Thalassiosira pseudonana</i>).....	10
FIGURA 4 - ALGAS DOURADAS (<i>Phaeodactylum tricornutum</i>).....	11
FIGURA 5 - CIANOBACTÉRIAS VISTAS EM MICROSCÓPIO.....	12
FIGURA 6 - SISTEMAS DE CULTIVO ABERTO TIPO PISTA DE CORRIDA.....	18
FIGURA 7 - FOTOBIORREATOR TUBULAR.....	19
FIGURA 8 - TRANSESTERIFICAÇÃO DE TRIACILGLICERÓIS NA PRESENÇA DE METANOL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO.....	22

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - POTÊNCIA-PICO PARA AS PRINCIPAIS CIDADES BRASILEIRAS;

TABELA 2 - COMPOSIÇÃO DAS MICROALGAS SELECIONADAS;

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DAS MICROALGAS.

LISTA DE SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica;

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis;

EPA - Acido Eicosapentaenoico;

FBR - Fotobiorreator;

NPDEAS - Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável;

UFPR - Universidade Federal do Paraná.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. OBJETIVO GERAL.....	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1. FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVAS.....	4
3.1.1. BIOMASSA.....	5
3.2. BIORREATOR.....	5
3.3. BIOCOMBUSTÍVEL.....	6
3.3.1. BODIESEL.....	6
3.3.2. BIOGÁS.....	7
3.3.3. BIOCOMBUSTÍVEL DE MICROALGAS.....	7
3.4. MICROALGAS.....	8
FIGURA 1 - MICROALGAS.....	8
3.4.1. ALGAS VERDES.....	9
FIGURA 2 - ALGAS VERDES (<i>Chlorella vulgaris</i>).....	9
3.4.2. DIATOMÁCEAS.....	10
FIGURA 3 - DIATOMÁCEAS (<i>Thalassiosira pseudonana</i>).....	10
3.4.2.1. ALGAS DOURADAS.....	11
FIGURA 4 - ALGAS DOURADAS (<i>Phaeodactylum tricornutum</i>).....	11
3.4.3. CIANOBACTÉRIAS.....	12
FIGURA 5 - Cianobactérias vistas em microscópio.....	12
3.4.4. COMPOSIÇÃO DA MICROALGA.....	13
3.4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE MICROALGAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL.....	14
3.5. SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS.....	15
3.5.1. SISTEMA ABERTO.....	16
FIGURA 6 - SISTEMAS DE CULTIVO ABERTO TIPO PISTA DE CORRIDA.....	17
3.5.2. SISTEMA FECHADO.....	18
FIGURA 7 - FOTOBIORREATOR TUBULAR.....	18
3.5.3. EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS DE MICROALGAS.....	19
3.5.4. PROCESSOS DE CONVERSÃO DE LIPÍDIOS EM BODIESEL.....	20
3.5.5. TRANSESTERIFICAÇÃO.....	20
FIGURA 8 - TRANSESTERIFICAÇÃO DE TRIACILGLICERÓIS NA PRESENÇA DE METANOL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO.....	21
3.5.6. QUALIDADE DO BODIESEL E PADRÕES DE CONFORMIDADE.....	22
3.6. O PAPEL POTENCIAL DAS MICROALGAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL.....	23
3.7. ECONOMIA NA PRODUÇÃO DO BODIESEL DE MICROALGAS.....	23

4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	26
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	28
REFERÊNCIAS.....	29

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o aumento populacional em conjunto com a crescente utilização de transportes a combustão, a busca por fontes de energias limpas, alternativas e sustentáveis se tornou algo indispensável para garantir o futuro do planeta. Desta maneira, de acordo com o que está supramencionado, o estudo acerca da geração de biocombustíveis de microalgas apresenta um potencial promissor.

De acordo com Nobre, (2001) os impactos das mudanças climáticas em nosso planeta estão cada vez mais evidentes, ocasionando crescimento das emissões dos gases de efeito estufa, como a emissão de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), tais substâncias possuem características de reter calor. Os combustíveis fósseis são grandes responsáveis pela emissão dessas substâncias de maneira exacerbada na atmosfera terrestre. Assim, é necessário o questionamento acerca da viabilidade da utilização de microalgas para geração de biocombustíveis.

Neste trabalho, serão abordadas espécies como *Chlorella vulgaris*, *Thalassiosira pseudonana* e *Phaeodactylum tricornutum* conhecidas por seu alto teor lipídico e potencial na produção de biodiesel; e a *Spirulina platensis*, que apesar de não ser uma espécie de microalga, são cianobactérias ricas em proteínas e utilizada em suplementos alimentares e que apresenta grande potencial para produção de biogás (MORAIS; COSTA, 2009). O objetivo deste estudo é avaliar o cultivo dessas microalgas, seus processos de conversão em biocombustíveis e o potencial de cada uma delas para contribuir com fontes de energia, visando uma nova fonte de energia sustentável.

As microalgas utilizam o CO₂ no processo fotossintético, o que permite capturar este gás, contribuindo para a redução da sua concentração na atmosfera. Quando cultivadas com o propósito de gerar biocombustíveis, elas não apenas capturam o CO₂, mas também diminuem a emissão de dióxido de carbono ao substituir combustíveis fósseis por biocombustíveis. Este processo pode ser altamente eficiente, já que o cultivo de microalgas apresenta uma taxa de crescimento superior à de plantas terrestres, permitindo sua utilização em áreas

menos férteis, como zonas desérticas e costeiras (JANKOWSKA et al., 2017; BENEMANN et al., 2018).

Portanto, as microalgas, além de servirem como base para a produção de biocombustíveis, podem ser utilizadas para a produção de biomassa. Sua queima libera menos CO₂ do que foi consumido para a sua produção, sendo considerada uma fonte de energia de "emissão zero". Assim, teremos também a geração de energia elétrica a partir delas (MALTA et al., 2019; OLIVEIRA et al., 2021).

É preciso ter em vista os desafios ambientais, econômicos, e técnicos para essa geração, os quais serão explorados ao longo deste trabalho, por meio de pesquisas de campo, elaboração de projetos e análise.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial energético das microalgas para a produção de biocombustíveis, destacando sua viabilidade econômica, eficiência energética e impactos ambientais, com o objetivo de contribuir para a transição sustentável da matriz energética global.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar as principais espécies de microalgas adequadas para a produção de biocombustíveis, com base em sua composição lipídica e capacidade de cultivo;
- Analisar os métodos de cultivo de microalgas em sistemas abertos e fechados, avaliando sua eficiência e desafios técnicos;
- Avaliar o processo de conversão de biomassa de microalgas em biodiesel, com foco na eficiência da transesterificação e nas limitações econômicas;
- Discutir o papel das microalgas no contexto da transição energética global, enfatizando inovações tecnológicas e tendências futuras no setor.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. FONTES DE ENERGIA ALTERNATIVAS

De acordo com Fontana (2021), o mundo se mostrou dependente de fontes de energia desde a revolução industrial, quando o marco entre energia e economia foi estreitado, nesse período a energia motriz era o carvão utilizado nas máquinas a vapor, que foi utilizado para substituir a energia animal e humana.

Ao traçar um avanço histórico, chegamos aos dias atuais, onde a utilização de diversas fontes de energia se tornou uma realidade cotidiana. Hoje, nossa preocupação se volta para as consequências das fontes energéticas do passado. Nesse contexto, buscamos a adoção de alternativas limpas, renováveis e sustentáveis. Essa mudança não é apenas uma questão de transição energética, mas envolve uma reflexão cuidadosa sobre a aplicabilidade e o impacto ambiental que cada nova fonte de energia pode provocar.

No cenário brasileiro, a biomassa, especialmente a proveniente da cana-de-açúcar, tem se destacado como uma fonte alternativa de energia no sistema de cogeração, impulsionada pelo crescente consumo de etanol. Esse tipo de cogeração tem sido considerado uma solução viável e sustentável, com um potencial significativo para atender à demanda energética do país (ÚNICA, 2022)

Em outro âmbito, temos a energia eólica tem conquistado espaço, com o Ceará se destacando como pioneiro na instalação de turbinas eólicas, influenciando outros estados a adotarem essa forma de geração elétrica. Em 2016, o Brasil já contava com uma capacidade instalada de 20,3 MW em energia eólica, refletindo um compromisso crescente com a diversificação da matriz energética. Por sua vez, a energia solar se apresenta como uma das fontes mais viáveis e em ascensão.

Em 2016, o Brasil possuía trinta e nove usinas solares conectadas à rede elétrica, com uma capacidade total de 22.952 kW, representando apenas 0,015% da matriz elétrica nacional. Este cenário ressalta a necessidade de expansão e diversificação das fontes renováveis no Brasil, que busca cada vez mais aumentar a participação de energias limpas e sustentáveis (ANEEL,2016).

3.1.1. BIOMASSA

A biomassa tem emergido como uma alternativa energética sustentável, sendo uma das principais soluções para a crescente demanda de energia. No Brasil, segundo Cardoso (2012), os resíduos agrícolas e florestais, como o bagaço de cana e a madeira, são as fontes mais promissoras para a geração de eletricidade. O autor destaca processos como a combustão direta e a gaseificação, que convertem biomassa em energia de forma eficiente e ambientalmente responsável, visto que além de oferecer maior eficiência, oferece também o menor impacto ambiental.

O autor aponta que, para que a biomassa se consolide como uma fonte de energia competitiva e sustentável, é crucial investir em pesquisa e desenvolvimento para melhorar a eficiência dos sistemas de conversão e reduzir os custos de implementação. Assim, a biomassa se configura como uma alternativa não apenas viável, mas estratégica para o desenvolvimento energético sustentável do Brasil.

A utilização de energias renováveis, em particular a proveniente da biomassa, apresenta um conjunto importante de vantagens de natureza tão diversa como a redução da emissão de gases com efeito estufa, o aumento da diversidade de oferta de energia, a produção de energia sustentável a longo prazo, a criação de oportunidades de emprego, o desenvolvimento econômico local e a diminuição das importações de combustíveis convencionais (Oliveira, 2011, p. 118)

Dessa forma, a biomassa não só contribui para a diversificação da matriz energética, mas também promove o desenvolvimento sustentável e a independência energética de regiões produtoras, sendo crucial para a mitigação dos impactos ambientais globais e o avanço da bioenergia. Além disso, a contínua pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de conversão energética reforça a importância de seu uso a longo prazo.

3.2. BIORREATOR

De acordo com Andrade e Oliveira (2024), os biorreatores são utilizados no cultivo de microrganismos, oferecendo um ambiente propício para o desenvolvimento das células. No Brasil, houveram diversas pesquisas recentes para melhoria dos sistemas de cultivo e eficiência, apresentando inovações recentes em

biorreatores, incluindo o desenvolvimento de sistemas híbridos que combinam o biorreator e o processo de digestão anaeróbio para otimizar a eficiência de conversão dos resíduos orgânicos em energia. Essa inovação pode melhorar a viabilidade econômica dos sistemas de bioenergia.

3.3. BIOCOMBUSTÍVEL

Desde o século passado o petróleo vem sendo a principal fonte global de combustível, porém a futura escassez deste recurso e o grande impacto ambiental causado pelo mesmo, abriu portas para novas alternativas, viabilizando fontes de energias limpas e renováveis em solução aos combustíveis fósseis, dentre elas, o biocombustível. Os biocombustíveis são compostos principalmente por matéria orgânica, como óleos vegetais, biomassa, resíduos orgânicos de animais e plantas e até mesmo algas e microalgas (VIDAL, 2019).

O Brasil, embora não seja um grande contribuinte para a emissão de gases na atmosfera, adotou a produção de biocombustíveis, pois tem um grande potencial na redução desses gases, buscando alternativas para substituir a utilização de combustíveis fósseis. No Brasil atualmente, aproximadamente 45% da energia utilizada é renovável, possuindo um grande papel no cenário mundial na produção e consumo de biocombustíveis, de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

3.3.1. BIODIESEL

Uma vez que os óleos vegetais podem também ser utilizados para consumo humano, seu uso como biocombustível pode colaborar com o aumento do preço de mercado, se tornando menos viável a utilização de biodiesel, impedindo a seu uso, mesmo havendo vantagens comparando com o combustíveis fósseis (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

A retirada do biodiesel pode ser feita por dois processos: a transesterificação e a esterificação. Como matérias-primas, podem ser usados diferentes óleos vegetais e gorduras de origem animal. Também é possível adquirir o biodiesel por meio de resíduos orgânicos de indústrias e também domésticos, como sobras de óleo.

3.3.2. BIOGÁS

O biogás é uma mistura gasosa com a predominância do metano (CH_4) e do Dióxido de Carbono (CO_2), que é resultado da fermentação de resíduos orgânicos na ausência de oxigênio, como dejetos de animais e resíduos vegetais.

No Brasil, o interesse pela produção do biogás aumentou desde os anos de 1970. Muitos programas governamentais influenciaram a instalação de muitos biodigestores, principalmente na geração de energia e também na produção do biofertilizante (KUNZ, 2006).

3.3.3. BIOCOMBUSTÍVEL DE MICROALGAS

Os biocombustíveis produzidos a partir de microalgas vem sendo altamente discutido na literatura, sendo produzido por transesterificação com glicerol como um produto secundário. Com base em dados, algumas espécies de microalgas acumulam até 73,4% de lipídios, tendo como principal componente os triglicerídeos, estes podem ser convertidos em biodiesel por meio de uma reação de transesterificação. (D'AGOSTIN, 2017, p. 31.).

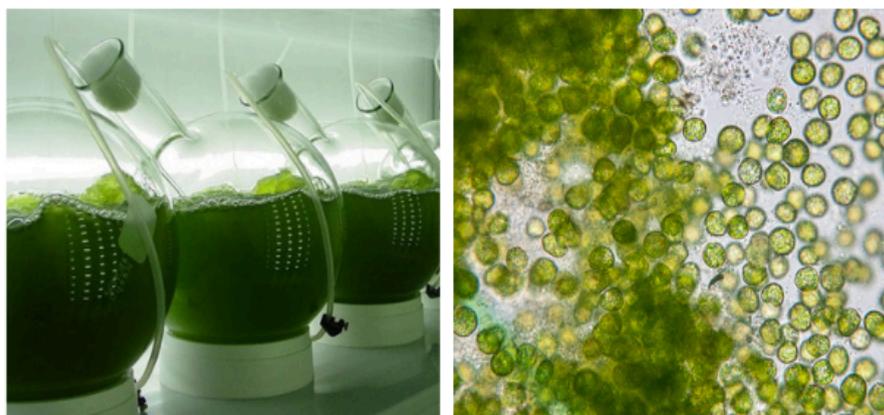
Os óleos encontrados nas microalgas possuem características físico químicas similares aos dos óleos vegetais e esta vantagem, dentre inúmeras outras, corroboram o apontamento para as microalgas como sendo matérias-primas promissoras para a produção de biodiesel (Hakalin, 2014, p. 1.).

Segundo as Nações Unidas, um dos objetivos desenvolvido na Cúpula Mundial de Desenvolvimento Sustentável (World Summit Sustainable Development) de 2002, em Johannesburgo, é a tomada de ações em busca da produção de energia economicamente viável, socialmente aceitável e vinda de fontes sustentáveis. Sendo assim é necessária a redução da dependência de combustíveis fósseis para mitigar os efeitos do aquecimento global, explorando como fonte de energia alternativa o biocombustível de microalgas.

3.4. MICROALGAS

Microalgas são organismos vivos unicelulares e fotossintetizantes, abundantemente encontradas em ambientes aquáticos, visto que possuem grande facilidade de desenvolvimento. Esses organismos são produtores primários que agem com a conversão de energia solar em energia química, tendo extrema importância na cadeia trófica (FIGURA 1).

FIGURA 1 - MICROALGAS



FONTE: EMOL (2018) e UFPB (2022)

As microalgas possuem alto valor nutricional, utilizadas na alimentação animal e humana, representam uma fonte suplementar de proteínas, carboidratos, ácidos graxos, pigmentos naturais, como os carotenóides¹ vitaminas, entre outras substâncias que beneficiam a saúde, sistema imunológico, fertilidade e controle do peso. (D'AGOSTIN, 2017, p. 18-19).

Além da indústria alimentar, as microalgas apresentam um grande potencial energético, sendo exploradas pela indústria pois possuem um alto teor lipídico que pode ser aproveitado no processo de transesterificação para a produção de biodiesel e biomassa. Com base nesse contexto, o processo de transesterificação

¹ Os carotenóides são pigmentos lipossolúveis encontrados em plantas, microalgas e organismos fotossintetizantes, com importantes funções biológicas, incluindo a fotoproteção e a atuação como precursores de vitaminas. Estudos brasileiros têm investigado a riqueza em carotenóides de diversas espécies de microalgas e seu potencial na alimentação e na indústria farmacêutica. Por exemplo, pesquisas mostraram que microalgas como *Chlorella vulgaris* e *Spirulina platensis* possuem altos teores de carotenóides, o que pode contribuir para a produção de suplementos nutricionais e corantes naturais. Além disso, a extração e a aplicação desses compostos têm sido objeto de estudos visando otimizar o rendimento e a qualidade dos carotenóides, destacando seu uso em formulações alimentícias e cosméticas. (OLIVEIRA et al., 2016; SOUZA et al., 2018).

se apresenta como um potencial promissor para a substituição dos combustíveis fósseis (VALDERRAMA et al., 2023).

3.4.1. ALGAS VERDES

De acordo com Sarker e Kaparaju (2023), microalgas foram classificadas em 13 divisões: *Chlorophyta* (algas verdes); *Rhodophyta* (algas vermelhas); *Phaeophyceae* (algas pardas); *Chrysophyta* (algas douradas); *Bacillariophyta* (diatomáceas); *Cryptophyta* (criptomonas); *Euglenophyta* (euglenoides); *Dinophyta* (dinoflagelados); *Haptophyta* (haptófitas); *Xanthophyta* (algas amarelo-verdes); *Glaucophyta* (glaucófitas); *Chlorophyta* (carófitas ou algas verdes mais complexas); *Cyanophyta* (cianobactérias ou algas azuis). Para essa classificação, foram consideradas suas adaptações evolutivas, diferenças como tamanho, e elementos sintetizantes, produtos de armazenamento e composição da parede celular.

As algas verdes (*Chlorophyceae*) são um dos grupos mais utilizados, por apresentarem facilidade em seu desenvolvimento, importância ecológica na produção de oxigênio e fixação de carbono, essenciais para o equilíbrio ecológico global, e facilidade no cultivo, visto que são algas de água doce, o que facilita o seu cultivo e a sua produção em grande escala (CONCEIÇÃO, 2016).

Abaixo, apresentamos a figura 2, que ilustra uma das algas verdes mais utilizadas, a *Chlorella vulgaris*.

FIGURA 2 - ALGAS VERDES (*Chlorella vulgaris*)



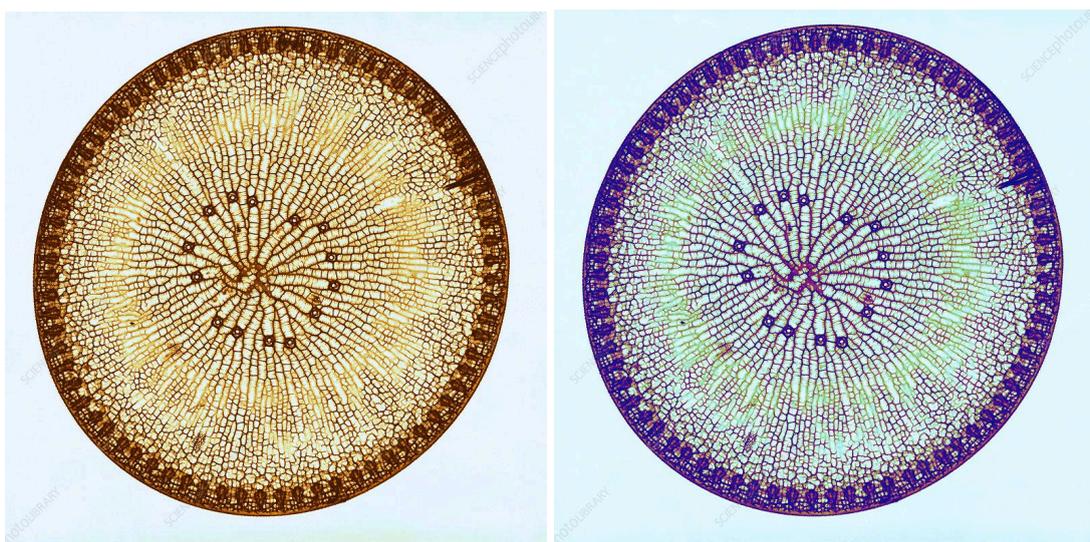
FONTE: CHLORELLA VULGARIS NIES 2170. (2022)

A *Chlorella vulgaris*, têm destaque pela sua facilidade de cultivo e contribuição na fixação de carbono e produção de oxigênio. A utilização dessas microalgas para produção de biomassa sustentável reforça seu valor no equilíbrio ambiental e no avanço de tecnologias limpas, tornando-as essenciais para futuros estudos e aplicações energéticas (SILVA et al. 2021).

3.4.2. DIATOMÁCEAS

De acordo com Fonseca et al. (2020), pertencentes a classe *Bacillariophyceae*, as diatomáceas são microalgas marinhas, que apresentam um alto teor lipídico e salinidade, a *Thalassiosira pseudonana* é uma espécie amplamente estudada por apresentar um grande potencial. Sendo relevante para a produção de biocombustíveis, uma vez que pode acumular grandes quantidades de lipídios em condições de estresse, que podem ser causados por limitação de nutrientes, alterações da luminosidade, variação de temperatura, etc, o que aumenta seu potencial para a produção de biodiesel. Além disso, essa diatomácea é amplamente utilizada em estudos biotecnológicos devido ao seu genoma sequenciado e à facilidade de cultivo em laboratório.

FIGURA 3 - DIATOMÁCEAS (*Thalassiosira pseudonana*)



FONTE: Sciencephoto (2018)

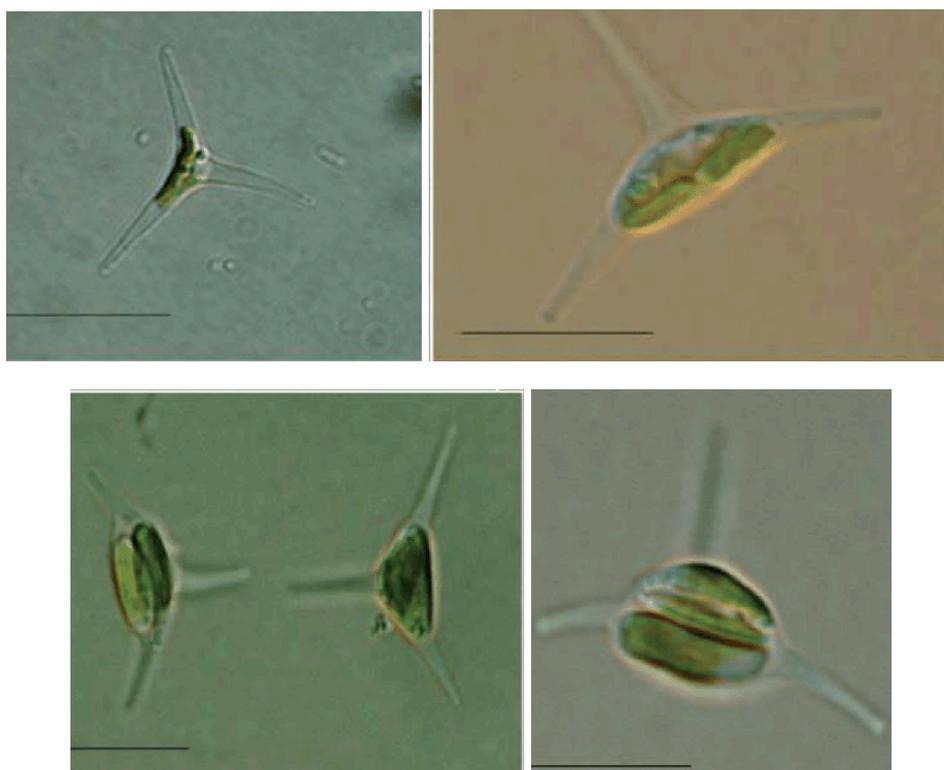
Pereira et al. (2019) afirmam que as *Thalassiosira pseudonana* possuem um grande potencial lipídico que pode ser otimizado por meio da manipulação do

cultivo, essas condições são causadas por circunstâncias de estresse. Podem ser causados por limitação de nutrientes, alterações da luminosidade, variação de temperatura, etc, o que aumenta seu potencial para a produção de biodiesel.

3.4.2.1. ALGAS DOURADAS

A espécie *Phaeodactylum tricornutum* de alga dourada é considerada uma diatomácea, que apresenta rica diversidade e potencial, é comumente encontrada em ecossistemas marinhos. Essa espécie é muito explorada para a produção de biodiesel por conta de seu alto teor lipídico, sendo uma das principais microalgas utilizadas para a geração de energia, e para seu desenvolvimento comercial, como uma fábrica de células para um espectro de produtos comercializáveis.(Reis et al. 2016).

FIGURA 4 - ALGAS DOURADAS (*Phaeodactylum tricornutum*)



FONTE: BENOIT TESSON. (2009)

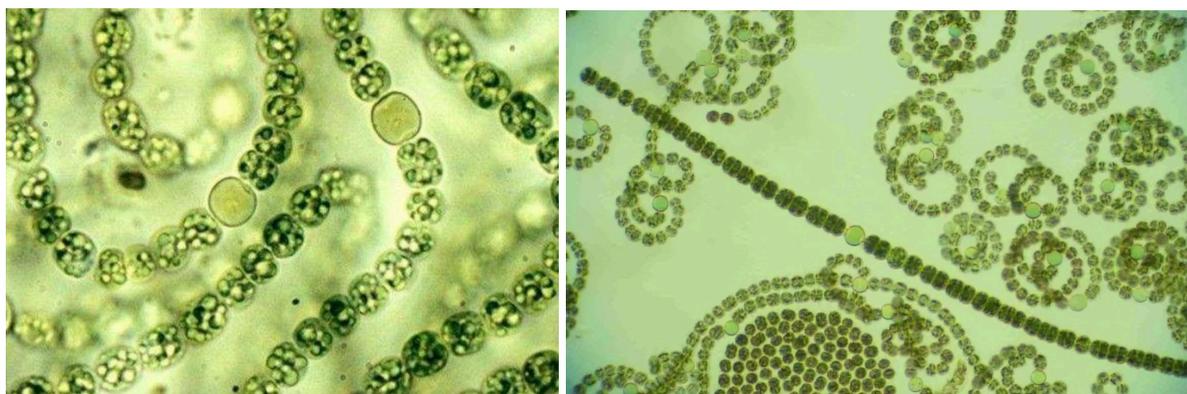
Sua versatilidade e riqueza em ecossistemas marinhos fazem dela uma ótima alternativa para o desenvolvimento de biocombustíveis e outros produtos comerciais derivados de microalgas. Essa capacidade de atuação em diversas

áreas industriais reforça o papel das algas douradas como parte de um futuro energético mais sustentável e comercialmente viável.

3.4.3. CIANOBACTÉRIAS

As cianobactérias são microrganismos fotossintetizantes, mostrados na figura 5, de extrema relevância visto que desempenham um papel fundamental na bioenergia. São fonte de hidrogênio, sendo promissoras para a produção de bio-hidrogênio, uma das alternativas energéticas mais limpas e sustentáveis. Estudos indicam que a *Spirulina* e a *Arthrospira*, duas espécies amplamente cultivadas, possuem um alto teor de proteínas e são ricas em ficocianinas, que têm aplicações tanto na indústria alimentícia quanto na farmacêutica, graças às suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (Santos et al., 2013; Oliveira, 2011).

FIGURA 5 - CIANOBACTÉRIAS VISTAS EM MICROSCÓPIO



FONTE: es.nextews (2018), kknews.cc (2022)

O interesse nas cianobactérias também se estende ao seu uso como biofertilizantes, principalmente em práticas de agricultura sustentável. Sua capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico melhora a fertilidade do solo, promovendo o crescimento de culturas agrícolas, especialmente em sistemas agroecológicos. Oliveira (2011) destaca que essa característica das cianobactérias pode reduzir a necessidade de fertilizantes sintéticos, contribuindo para uma agricultura mais ecológica e econômica.

Além do uso energético e agrícola, as cianobactérias são uma fonte valiosa de substâncias bioativas. Pigmentos como a ficocianina, presente em *Spirulina*,

possuem propriedades antioxidantes, sendo utilizados em cosméticos e suplementos alimentares. Outros compostos, como carotenóides e ácidos graxos, também são extraídos para a indústria farmacêutica, devido aos seus efeitos benéficos à saúde humana (Silva et al., 2014). O uso de cianobactérias na produção desses compostos bioativos representa uma forma de exploração sustentável dos recursos naturais, proporcionando benefícios econômicos e ambientais.

Portanto, as cianobactérias têm um potencial vasto e diversificado, que vai desde a produção de energia limpa até aplicações em saúde e agricultura. Com o avanço tecnológico e a pesquisa contínua, esses organismos podem desempenhar um papel central na bioeconomia do futuro, contribuindo para soluções inovadoras e sustentáveis em diversos setores da indústria.

3.4.4. COMPOSIÇÃO DA MICROALGA

Segundo os pesquisadores Brown et al. (1989), as microalgas são compostas por carboidratos, lipídios, proteínas e minerais, sendo o restante ácidos nucleicos. Pelo seu grande valor nutricional, muitas delas vêm sendo estudadas para serem empregadas na alimentação animal e humana, na agricultura, tratamento de águas residuais e também como uma alternativa aos combustíveis fósseis.

A tabela a seguir mostra a composição dos três grupos de microalgas mencionadas anteriormente e de cianobactérias.

Tabela 2 - Composição das microalgas selecionadas

Grupo de Microalgas	Espécie	Composição Principal	Teor Lipídico (%)	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	Fonte
Algas verdes	<i>Chlorella vulgaris</i>	Lipídios, proteínas, carboidratos	20-30	50-60	10-15	BORGES, A. C.; GARCIA, D. C.
Algas Douradas	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Lipídios, ácidos graxos poli-insaturados	25-35	25-30	20-30	REIS, A.; CASTRO, R.; SOUZA, F.
Diatomáceas	<i>Thalassiosira pseudonana</i>	Silício, lipídios, proteínas	20-40	30-40	10-20	FONSECA, J. S.; PEREIRA, L. S.; CAVALCANTI, R. S.
Cianobactérias	<i>Spirulina platensis</i>	Proteínas, vitaminas, minerais	6-8	60-70	15-20	OLIVEIRA, R. P.; TEIXEIRA, R. M.; SOUZA, J. R.

Na tabela é observado que boa parte desses microrganismos é composta por proteínas, em seguida lipídios e por fim carboidratos. Com exceção das cianobactérias, que são ricas em proteínas, as microalgas mais utilizadas para a produção de biocombustível são aquelas que apresentam maior teor lipídico em sua composição, oferecendo assim, um maior volume de biodiesel ao final do processo de transesterificação.

3.4.5. CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS TIPOS DE MICROALGAS UTILIZADAS NA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL

As microalgas têm ganhado destaque na pesquisa e desenvolvimento de biocombustíveis devido à sua rápida taxa de crescimento, alta produtividade lipídica e potencial de conversão em diversos produtos energéticos. A classificação das microalgas utilizadas na produção de biocombustíveis pode ser feita com base nas

suas características e aplicações. A seguir, apresenta-se uma tabela que sintetiza as principais espécies de microalgas, suas aplicações e características relevantes.

Tabela 3 - Classificação das microalgas

ESPÉCIE	APLICAÇÕES	CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS	FONTE
<i>Chlorella vulgaris</i>	Biodiesel, bioetanol	Alta taxa de crescimento, rico em proteínas e ácidos graxos, fácil cultivo em fotobiorreatores.	MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S.
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Biodiesel, bioquerosene	Produz ácidos graxos poli-insaturados (EPA), alta produtividade lipídica sob estresse.	REIS, A.; CASTRO, R.; SOUZA, F.
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	Biodiesel	Acumula lipídios sob condições de estresse nutricional.	FONSECA, J. S.; PEREIRA, L. S.; CAVALCANTI, R. S.
<i>Spirulina platensis</i>	Biogás, biodiesel	Rica em proteínas, usada para bioenergia e suplementos alimentares, cultivo fácil e robusto.	OLIVEIRA, R. P.; TEIXEIRA, R. M.; SOUZA, J. R.

A tabela acima destaca quatro espécies principais de microalgas com aplicações relevantes na produção de biocombustíveis. A *Chlorella vulgaris* é amplamente estudada devido à sua rápida taxa de crescimento e alto teor proteico, que a torna ideal para a produção de biodiesel e bioetanol (MATA et al., 2010; FONSECA et al., 2020). Por outro lado, *Phaeodactylum tricornutum* se destaca pela produção de ácidos graxos poli-insaturados, como o EPA, que são de grande interesse na indústria de biocombustíveis (REIS et al., 2016).

A *Thalassiosira pseudonana* é notável por sua capacidade de acumular lipídios sob condições de estresse nutricional, sendo uma forte candidata para a produção de biodiesel a partir de microalgas marinhas (BORGES & GARCIA, 2022). Por fim, a *Spirulina platensis*, conhecida por sua riqueza em proteínas e facilidade

de cultivo, é utilizada não apenas na produção de biocombustíveis, mas também como suplemento alimentar, mostrando versatilidade em suas aplicações (OLIVEIRA et al., 2019).

3.5. SISTEMAS DE CULTIVO DE MICROALGAS

O cultivo de microalgas vem sendo estudado nas últimas décadas como uma alternativa promissora para diversas aplicações como na área de biocombustíveis, biorremediação, produção de alimentos e cosméticos, além de seu papel crucial na mitigação das mudanças climáticas, tendo em vista o seu grande potencial na absorção de CO₂ da atmosfera. Pode-se destacar dois sistemas de cultivo que vem ganhando destaques, o sistema aberto, realizado em lagoas o que acaba sendo um cultivo de baixo custo, e também o sistema fechado realizado geralmente em fotobiorreatores, onde é proporcionado um controle mais rigoroso à produção (FIGUEIREDO, 2020).

3.5.1. SISTEMA ABERTO

O cultivo de microalgas em sistemas abertos (FIGURA 6) vem sendo estudado nos últimos anos pelos seus baixos custos de operação, sua facilidade de construção e sua versatilidade para a produção em larga escala, mas apesar de sua utilização industrial, ainda apresenta desafios técnicos relevantes como a baixa concentração de biomassa e baixa produtividade, estão sujeitas à contaminação externas e a condições meteorológicas, especialmente flutuações na concentração de nutrientes e de células devido à evaporação e a chuva.

Esse tipo de produção deve ser utilizada no cultivo de espécies de crescimento rápido como a *Dunaliella* sp. (adaptada à alta salinidade), *Spirulina* sp. (adaptada à alta alcalinidade e *Chlorella* sp. (adaptada em meio rico em nutrientes) (D'AGOSTIN, 2017, p.19).

Visto que a análise dos fatores que influenciam o crescimento das microalgas, como a temperatura, luminosidade e concentração de nutrientes, é fundamental para otimizar o cultivo. Por exemplo, estudos indicam que a suplementação de nutrientes específicos pode aumentar a produtividade de

biomassa e a concentração de lipídios, essenciais para a produção de biocombustíveis (MATA et al., 2010; REIS et al., 2016).

Portanto, a pesquisa contínua sobre as condições ideais de cultivo e as espécies mais promissoras é crucial para maximizar o potencial dos sistemas abertos na indústria de biocombustíveis. Essa abordagem não apenas favorece a eficiência produtiva, mas também possibilita a exploração de características específicas de cada espécie, como a resistência a variações climáticas e a capacidade de utilização de diferentes fontes de nutrientes. Além disso, a implementação de práticas de manejo sustentável no cultivo de microalgas pode minimizar impactos ambientais negativos, contribuindo para a preservação de ecossistemas aquáticos. À medida que a demanda por fontes de energia renovável cresce, o aprimoramento das técnicas de cultivo de microalgas pode se tornar um pilar central na transição para um futuro energético mais sustentável.

FIGURA 6 - SISTEMAS DE CULTIVO ABERTO TIPO PISTA DE CORRIDA



FONTE: Adaptado de galpemar.es et al. (2017).

Em geral, a escolha de microalgas adequadas para sistemas abertos deve levar em conta as condições locais e os objetivos de produção. As microalgas que são mais resilientes a condições ambientais adversas e que têm um crescimento acelerado são as mais indicadas para cultivo em larga escala. O controle rigoroso das variáveis de cultivo, como luz, temperatura e nutrientes, pode maximizar a eficiência desses sistemas, permitindo que sejam utilizadas em aplicações como a produção de biocombustíveis e o tratamento de águas residuais (BORGES &

GARCIA, 2022). Assim, a seleção das espécies é um fator crítico para o sucesso do cultivo em sistemas abertos.

3.5.2. SISTEMA FECHADO

O sistema de cultivo fechado traz vantagens em relação a contaminação da espécie, otimiza a produção pela redução da perda de CO_2 , e a baixa evaporação d'água, oferecendo ao produtor a oportunidade de fazer um cultivo mais controlado que aprimora a sua produção, partindo do ponto que todas as condições estão sob o seu controle.

Esta modalidade de cultivo é muito utilizada na indústria farmacêutica e de cosméticos, mas também vem sendo utilizada na produção de microalgas para a produção de biocombustíveis e outras análises, onde o cultivo é feito em um fotobiorreator, como a cultivada na Universidade Federal do Paraná (UFPR) no Núcleo de Pesquisas e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS) (FIGURA 7).

FIGURA 7 - FOTOBIORREATOR TUBULAR



FONTE: Researchgate (2018)

A principal função do FBR é reduzir o caminho da luz aumentando assim a disponibilidade de energia luminosa para cada célula. Desse modo, a complexidade

do FBR fechado é maior do que os FBR abertos. Os valores relacionados à construção de FBR fechados ainda são elevados. Os altos custos de reatores fechados se devem, principalmente, às características dos materiais envolvidos na sua construção. Os tubos devem ser transparentes; flexíveis e duráveis; não oferecer toxicidade; resistentes a agentes químicos, metabólitos produzidos pelas microalgas e às condições climáticas. (D'AGOSTIN, 2017, p. 20-21).

3.5.3. EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS DE MICROALGAS

A extração de lipídios das microalgas é uma etapa fundamental na conversão em biocombustíveis, uma vez que esses lipídios servem como matéria-prima para a produção de biodiesel. No Brasil, diversos estudos têm explorado diferentes métodos de extração, destacando-se a extração por solventes, por prensagem mecânica e por CO₂ supercrítico.

A extração com solventes, como hexano, é um dos métodos mais comuns devido à sua alta eficiência na obtenção de lipídios (VIEIRA et al., 2015). Porém, esse método envolve o uso de grandes quantidades de solvente, o que pode gerar resíduos tóxicos e tornar o processo menos sustentável. Já a extração por prensagem mecânica, como estudado por Silva et al. (2018), apresenta vantagens como a ausência de solventes, sendo mais ecológica, mas com menor rendimento em comparação com os métodos químicos.

Outra alternativa que tem ganhado atenção no Brasil é a extração com CO₂ supercrítico. Segundo Costa et al. (2017), essa técnica oferece alta eficiência e menor impacto ambiental, pois o CO₂ utilizado pode ser reciclado após o processo. No entanto, o alto custo do equipamento e a necessidade de condições de pressão e temperatura elevadas ainda são desafios para a adoção em larga escala.

Além desses métodos, técnicas assistidas por ultrassom e micro-ondas têm sido investigadas por sua capacidade de aumentar a eficiência de extração, reduzindo o tempo de processo e o consumo de energia (SANTOS et al., 2020). A escolha do método de extração depende de variáveis como a espécie de microalga, o rendimento de lipídios e a viabilidade econômica do processo.

3.5.4. PROCESSOS DE CONVERSÃO DE LIPÍDIOS EM BIODIESEL

A conversão dos lipídios extraídos das microalgas em biodiesel é tradicionalmente realizada através do processo de transesterificação, que envolve a reação dos lipídios com um álcool (geralmente metanol ou etanol) na presença de um catalisador, formando ésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol como subproduto (SANTOS et al., 2016).

No Brasil, o uso de catalisadores básicos, como o hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), é amplamente adotado devido à sua alta eficiência e custos relativamente baixos (SILVA et al., 2019). Contudo, a presença de ácidos graxos livres nas microalgas pode levar à formação de sabões, o que reduz a eficiência do processo de transesterificação (FERREIRA et al., 2017).

Nesses casos, o uso de catalisadores ácidos, como o ácido sulfúrico, é recomendado, embora o processo se torne mais lento e menos eficiente.

Uma alternativa promissora para a transesterificação convencional é o uso de enzimas, como as lipases, que apresentam vantagens em termos de seletividade e menor formação de subprodutos, como sabões (COSTA et al., 2020). No entanto, o custo elevado das enzimas e a necessidade de otimizar o processo para aumentar a produtividade são desafios que ainda precisam ser superados.

Além disso, processos alternativos, como a pirólise e a hidrólise enzimática, têm sido estudados no Brasil como formas de conversão de microalgas em biodiesel. A pirólise, por exemplo, quebra a biomassa algal em ausência de oxigênio, produzindo líquidos e gases que podem ser refinados para biodiesel (SANTOS et al., 2021). A hidrólise enzimática, por sua vez, utiliza enzimas para quebrar os lipídios em ácidos graxos livres e glicerol, que podem então ser convertidos em biodiesel.

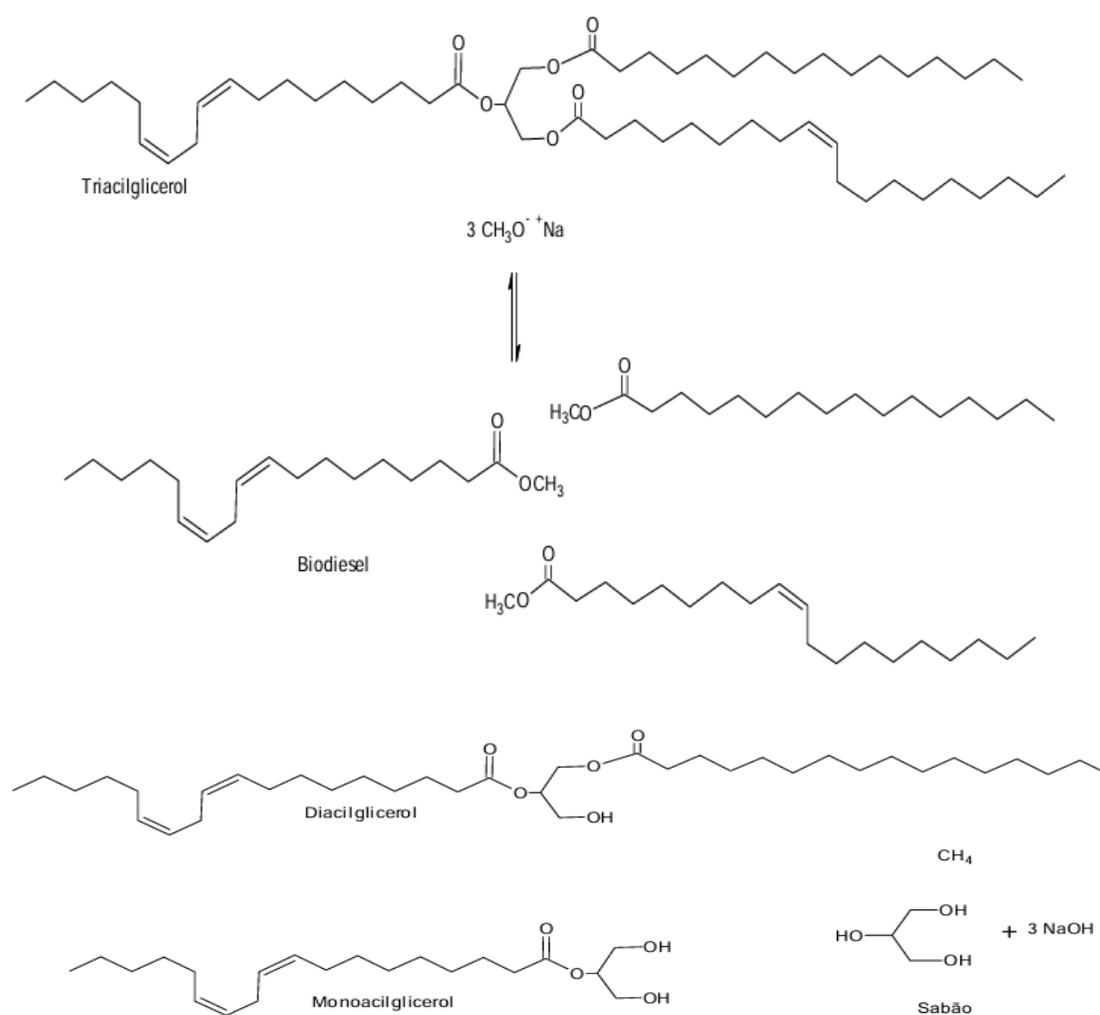
3.5.5. TRANSESTERIFICAÇÃO

A transesterificação é uma reação química fundamental que transforma óleos ou gorduras em biodiesel. Esse processo ocorre pela mistura desses lipídios com um álcool, geralmente metanol ou etanol, na presença de um catalisador, que pode ser ácido ou básico. Conforme afirmam Santos et al. (2016), a transesterificação é crucial para a conversão de óleos vegetais e gorduras animais

em biodiesel, contribuindo para a viabilidade econômica de fontes renováveis de energia. Desde os primeiros relatos de biodiesel produzido através da transesterificação em 1937, a tecnologia tem avançado significativamente, gerando um volume considerável de estudos que exploram suas aplicações e eficiência.

Segundo Lima e Chagas (2020), a transesterificação não apenas oferece uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, mas também contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, ao utilizar recursos renováveis. Na Figura 8, é apresentado o processo de transesterificação, que ilustra as etapas envolvidas, desde a preparação da matéria-prima até a obtenção do biodiesel e glicerol como subproduto.

FIGURA 8 - TRANSESTERIFICAÇÃO DE TRIACILGLICERÓIS NA PRESENÇA DE METANOL E HIDRÓXIDO DE SÓDIO



FONTE: MENEGHETTI, Simoni P. et al.,(2013)

Na produção de biodiesel, a transesterificação ocorre por meio de catalisadores do tipo bases e ácidos de Brønsted, sendo os principais exemplos os hidróxidos e alcóxidos de metais alcalinos e os ácidos sulfúrico, fosfórico, clorídrico e órgãos sulfônicos (Meneghetti, S. M. P. et al. 2013).

3.5.6. QUALIDADE DO BIODIESEL E PADRÕES DE CONFORMIDADE

A qualidade do biodiesel é um fator essencial para garantir seu desempenho eficiente e seguro, tanto em termos de utilização em motores quanto em sua conformidade ambiental. As principais propriedades do biodiesel incluem viscosidade, ponto de fluidez, índice de cetano, teor de água e a presença de contaminantes, como ácidos graxos livres e metais pesados (MARTINS et al., 2017).

No Brasil, a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) estabelece a Resolução nº 50/2013, que define as especificações para biodiesel. O parâmetro de viscosidade, por exemplo, é essencial, pois influencia diretamente na atomização do combustível e, conseqüentemente, no desempenho do motor. Já o ponto de fluidez determina a temperatura mínima em que o biodiesel permanece fluido, sendo crucial para o desempenho do combustível em regiões com climas mais frios (SILVA et al., 2018).

O índice de cetano, que está diretamente relacionado à capacidade de ignição do biodiesel, também é um parâmetro importante para garantir a eficiência da combustão e a redução de emissões. De acordo com Lima et al. (2019), o biodiesel produzido a partir de microalgas tende a apresentar um índice de cetano mais alto, o que resulta em uma queima mais eficiente e com menores emissões de poluentes.

Além das especificações físicas, o biodiesel deve atender a normas para garantir que não haja contaminação por metais pesados, resíduos de solventes ou outros compostos indesejados. As normas técnicas brasileiras, como a ABNT NBR 15543, buscam assegurar que o biodiesel produzido, inclusive a partir de microalgas, atenda a esses padrões, promovendo a sustentabilidade e a eficiência do combustível (GOMES et al., 2020).

3.6. O PAPEL POTENCIAL DAS MICROALGAS NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA GLOBAL

As microalgas apresentam um papel promissor e fundamental para a produção de biodiesel, mas também desempenham durante seu processo fotossintetizante uma grande captura de CO₂ da atmosfera. Isso não apenas reduz a emissão de gases de efeito estufa, mas também contribui para a mitigação das mudanças climáticas. De acordo com La Bella et al. (2022), as microalgas podem se desenvolver em diferentes ambientes aquáticos sob diversas condições, tornando-se uma solução sustentável e versátil.

Segundo La Bella et al. (2022), o uso de microalgas no tratamento de efluentes é uma excelente opção pois esse tratamento é realizado em uma só etapa, elas apresentam taxas de remoção de diferentes poluentes como o nitrato (NO₃-), nitrito (NO₂-), amônio (NH₄+), nitrogênio (N) e fósforo (P). A biomassa de microalgas obtida durante o processo de biorremediação de águas residuais é abundante em lipídios (10 a 50% nas células de microalgas) e carboidratos (Bhattacharya; Goswami, 2020). No fim, a biomassa resultante desta microalga pode servir como matéria prima para biocombustíveis e produtos de valor agregado.

3.7. ECONOMIA NA PRODUÇÃO DO BIODIESEL DE MICROALGAS

A produção de óleo a partir de microalgas necessita de uma habilidade de produzir grandes quantidades de biomassa rica em lipídios a baixo custo e extraí-los de forma barata e eficiente. As fases em que houveram maior impacto no custo da produção do biodiesel foi na produção de matéria prima (60%-75%) e a fase da colheita contribuindo com 20%-30% no custo de produção de biomassa (MATA et al., 2010).

A maior parte das estimativas de produção de combustíveis a partir de microalgas prevêem que com as tecnologias atuais de produção, o biodiesel de algas pode ser manufaturado por aproximadamente US\$ 4,54 o galão, na melhor das hipóteses e usando biorreatores de alta densidade. Sem a ajuda de subsídios, para o biodiesel competir diretamente com o diesel de petróleo dos Estados Unidos,

esse preço máximo teria que baixar para US\$ 1,81 cada galão produzido , em relação aos preços de combustíveis em 2006 (UM et al., 2009). Para produzir um quilograma de biomassa de microalgas, o custo é de US\$ 2,95 em fotobiorreatores tubulares e de US\$ 3,80 para sistemas abertos, segundo Chisti (2007). Esses valores não consideram o custo do dióxido de carbono (CO₂).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foi definido o modelo de pesquisa bibliográfica. De acordo com Gil (2010), a pesquisa bibliográfica é uma investigação de obras publicadas anteriormente sobre um assunto específico, estruturando o trabalho que será desenvolvido.

Para dar início à pesquisa, realizamos um estudo comparativo entre espécies de microalgas, focando em teor lipídico e condições de cultivo em sistemas abertos e fechados. Entre fevereiro e setembro de 2024, utilizamos a Biblioteca Digital da UFPR e o Google Academy para buscar referências relevantes e estudos anteriores nesta área.

Em 25 de setembro de 2024, ocorreu uma reunião com o professor André B. Mariano, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), cofundador do Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NPDEAS). Nesse encontro, foram compartilhadas informações detalhadas sobre os projetos relacionados a microalgas na universidade, os processos de cultivo e o uso de fotobiorreatores industriais. Questionamentos sobre as dificuldades na produção de biocombustível, quantidade mensal produzida e outros esclarecimentos sobre o tema também foram discutidos.

Com base nos resultados, o trabalho concluiu com uma análise da viabilidade da produção de biodiesel a partir de microalgas em larga escala, levando em conta fatores ambientais, econômicos e técnicos.

Palavras-chave: Biodiesel, microalgas, extração de lipídeos, transesterificação, energias renováveis, produção sustentável, fotobiorreatores, análise GC-MS.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Entre as diversas fontes alternativas de energia, a biomassa tem um papel importante, especialmente no contexto de biocombustíveis. Nesse cenário, as microalgas se destacam tanto por seu elevado teor de lipídios, utilizado na produção de biodiesel, quanto pela capacidade de capturar CO₂, auxiliando na mitigação dos impactos climáticos (MATA et al., 2010; REIS et al., 2016).

Especificamente, os resultados da pesquisa revelaram que as algas douradas (*Phaeodactylum tricornutum*) e as diatomáceas (*Thalassiosira pseudonana*) apresentaram altos índices de produtividade lipídica, variando entre 30% e 40%. Esse potencial torna essas microalgas candidatas promissoras para substituir fontes convencionais de biocombustíveis, especialmente em aplicações sustentáveis (FONSECA et al., 2020; BORGES & GARCIA, 2022).

Para entender a viabilidade do cultivo, analisamos os principais sistemas: abertos e fechados. Revisamos 15 estudos sobre sistemas abertos e 20 sobre sistemas fechados. De acordo com a literatura, os sistemas fechados são mais eficientes devido ao maior controle ambiental, embora apresentem custos mais elevados, estimados em US\$ 2,95/kg em fotobiorreatores. Em contrapartida, os sistemas abertos, com custo aproximado de US\$ 3,80/kg, sofrem com variabilidade climática e risco de contaminação (CHISTI, 2007; D'AGOSTIN, 2017).

Após o cultivo, o processo de transesterificação é aplicado para converter os óleos extraídos das microalgas em biodiesel. Apesar de ser uma tecnologia essencial, estudos indicam que o processo ainda apresenta desafios econômicos e necessita de pré-tratamentos específicos para viabilizar a produção em larga escala (MENEGETTI et al., 2013).

Esses resultados reforçam o potencial das microalgas como alternativa aos combustíveis fósseis, especialmente em setores como transporte marítimo e aéreo, onde os biocombustíveis líquidos são particularmente vantajosos em comparação com outras fontes de energia, como solar e eólica (BUTLER et al., 2020; MELO et al., 2020).

Ainda assim, para que as microalgas se tornem competitivas no mercado de energia, é imprescindível a redução de custos de produção e o desenvolvimento de tecnologias de conversão mais eficientes. Superar essas limitações é essencial para possibilitar a adoção em larga escala e garantir a sustentabilidade dessa fonte

energética (UM & KIM, 2009).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos e a discussão apresentada, é possível estabelecer uma conclusão de que as microalgas oferecem uma alternativa interessante e inovadora, destacou o potencial dessa fonte de energia para substituir os combustíveis convencionais, tendo como sua principal vantagem a eliminação dos gases de efeito estufa, visto que além da captura eficiente de CO₂, usam áreas não-competitivas com a agricultura.

A pesquisa desenvolvida também evidenciou desafios consideráveis que ainda precisam ser enfrentados para viabilizar sua aplicação em larga escala, entre eles, destacam-se os altos custos de produção, especialmente em sistemas de cultivo fechados, e a necessidade de maior eficiência nos processos de conversão de biomassa em biocombustíveis. A viabilidade econômica continua a ser o maior obstáculo, tornando imprescindível o desenvolvimento de novas tecnologias para reduzir os custos e aumentar a competitividade frente a outras fontes de energia alternativas.

Com isso notou-se a importância das inovações tecnológicas como a integração das microalgas em sistemas de biorrefinaria pode maximizar a rentabilidade, permitindo o aproveitamento de subprodutos e a diversificação da cadeia, além de políticas de incentivo a tecnologia pode nos ajudar nesse processo de transição para energias limpas.

Portanto, as microalgas possuem um papel crucial no futuro da transição energética global. Contudo, para que esse potencial seja plenamente realizado, é necessário continuar investindo em pesquisa e desenvolvimento tecnológico, buscando soluções que tornem a produção de biocombustíveis de microalgas mais acessível e sustentável.

REFERÊNCIAS

- ANEEL. Relatório de Geração Distribuída. Brasília, 2016.
- ALVES, J. J. A. Estimativa da Potência, Perspectiva e Sustentabilidade da Energia Eólica no Estado do Ceará. Campina Grande. 163p, 2006.
- ANDRADE, H. C.; OLIVEIRA, C. J. Inovações em Biorreatores para Bioenergia: Uma Revisão. *Revista de Tecnologia e Inovação*, 22(1), 78-92, 2024.
- BENEMANN, J. R.; et al. Uso de microalgas no sequestro de CO₂ e produção de biocombustíveis. 2018.
- BHATTACHARYA, S.; GOSWAMI, S. Microalgae as potential feedstock for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 118, p. 109542, 2020.
- BORGES, A. C. GARCIA, D. C. Microalgas como fonte de biodiesel: potencialidades e desafios. *Revista Brasileira de Biotecnologia*, v. 9, n. 2, p. 25-35, 2022.
- BROWN, M. R.; RODRIGUES, J. D.; LEE, Y. K.; BEARDALL, J.; HUNTLEY, M. E. A review of the effects of temperature on the composition of microalgae. *Journal of Applied Phycology*, v. 1, n. 1, p. 15-22, 1989.
- BUTLER, Thomas; KAPOORE, Rahul Vijay; VAIDYANATHAN, Seetharaman. *Phaeodactylum tricornutum*: A diatom cell factory. *Trends in Biotechnology*, v. 38, n. 6, p. 606-622, Jun. 2020.
- CARDOSO, Bruno Monteiro. Uso da biomassa como alternativa energética. 2012. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.
- CHOWDHURY, H.; et al. Produção de biogás e biodiesel a partir de microalgas. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 16, n. 1, p. 12-18, 2019.
- COGEN. Cogeração de energia via biomassa de cana pode crescer 57% até 2030 com RenovaBio. 2022.
- COSTA, R. S.; et al. (2017). "Extração de lipídios de microalgas para a produção de biodiesel: Avaliação de diferentes métodos." *Revista Brasileira de Energia Renovável*, 22(1): 45-57.
- CONCEIÇÃO, Lorena Pedreira. *Chlorophyceae (Chlorophyta) em corpos aquáticos da região Sudoeste da Bahia*. 2016.
- DERNER, Roberto Bianchi. Efeito de fontes de carbono no crescimento e na composição bioquímica das microalgas *Chaetoceros muelleri* e *Thalassiosira fluviatilis*, com ênfase no teor de ácidos graxos poliinsaturados. 2006.

D'AGOSTIN, Diego Araujo de Lima. Automação de fotobiorreatores para cultivo de microalgas em regime contínuo visando aumento da produtividade. 19-20, 2017.

D'AGOSTIN, J. Microalgas: cultivo e aplicações. Curitiba, 2017.

EMBRAPA. Biomassa e energia, 2019.

FERREIRA, J. M.; Santos, L. M. Aplicações de Microalgas na Biorremediação de Águas Contaminadas. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 30(4), 275-290. 2021.

FERREIRA, M. R.; et al. "Avaliação de catalisadores ácidos para transesterificação de microalgas." *Jornal Brasileiro de Química*, 12(4): 233-240. 2017.

FERRAZ, J. M. G.; MARRIEL, I. E. Biogás: fonte alternativa de energia. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1980.

FIGUEIREDO, B. dos S. A. *Microalgas: a 3ª geração de biocombustíveis no Brasil*. Embrapa Agroenergia, 2015.

FONTANA, G. A. A Revolução Industrial e sua Dependência Energética. *Revista de Energia*, 2021.

FORBES. Bagaço de cana vai ajudar o Brasil no maior avanço em cogeração de energia desde 2015. 2022.

FONSECA, J. S.; PEREIRA, L. S.; CAVALCANTI, R. S. Produção de biodiesel a partir de microalgas: um estudo sobre a *Thalassiosira pseudonana*. *Acta Brasileira de Microalgas*, v. 5, n. 1, p. 15-24, 2020.

GALPEMUR, A. et al. Microalgae in wastewater treatment: An overview. 2017.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOMES, F. A.; et al. (2020). "Normas e especificações para o biodiesel de microalgas: Implicações para o mercado nacional." *Revista de Biocombustíveis*, 25(2): 102-109.

JANKOWSKA, E.; NETO, E.; et al. A utilização de microalgas na bioconversão de resíduos e na produção de biocombustíveis. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 3, p. 65-75, 2017.

KUNZ, Airton; OLIVEIRA, Paulo Armando V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. *Biogás: fonte alternativa de energia*, v. 15, n. 3, 2006.

KUNZ, Aléssio; TREVISAN, Rodrigo; RODRIGUES, Marcelo Antonio Soares. Aproveitamento de Biomassa Residual para Produção de Energia: uma Revisão Crítica. *Revista Virtual de Química*, v. 5, n. 1, p. 22-44, 2014.

LA BELLA, G.; DIBENEDETTO, R.; SANTORO, G.; RICCARDI, A.; MONTELEONE, G.; DELLA MONICA, A. Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, v. 10, p. 904046, 2022.

LIMA, A. S.; et al. (2019). "Propriedades do biodiesel de microalgas e suas aplicações em motores de combustão." *Revista Brasileira de Engenharia de Energia*, 18(3): 155-169.

LIMA, T. A.; CHAGAS, C. F. S. Avaliação do potencial de produção de biodiesel a partir de microalgas. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 14, n. 4, p. 835-844, 2020.

LOURENÇO, S. O. Cultivo de microalgas marinhas - princípios e aplicações. São Carlos: RiMa, 2006.

MALTA, J. R. et al. Avaliação do potencial de microalgas na produção de biocombustíveis e geração de energia elétrica. *Revista Brasileira de Biociências*, v. 15, n. 2, p. 55-66, 2019.

MARTINS, P. D.; et al. (2017). "Propriedades físico-químicas do biodiesel e seus efeitos na eficiência do motor." *Revista de Tecnologia e Inovação em Biocombustíveis*, 30(1): 71-83.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 1, p. 217-232, 2010.

MEDEIROS, Diego. Aproveitamento energético das microalgas: uma avaliação de ciclo de vida. 2012. 150 f. – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

MELO, C. F.; VILLALBA, F. A.; GOUVEIA, L. (2020). Cultivo de microalgas para produção de biodiesel: Revisão e desafios. *Revista Virtual de Química*, v. 12, n. 2, p. 389-412.

MENEGHETTI, S. M. P.; TAVARES, M. F. M.; ARAUJO, D. R. A.; RIBEIRO, R. R.; GOMES, L. A. A. Transesterificação de óleos vegetais: revisão. *Revista Virtual de Química*, v. 5, n. 1, p. 63-73, 2013.

MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V. A cianobactéria *Spirulina* como fonte de nutrientes e suas aplicações. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 30, n. 1, p. 61-74, 2009.

NASCIMENTO, Raphael Santos do; ALVES, Geziele Mucio. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: métodos e benefícios ambientais.

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES. Informações sobre microalgas.

NOBRE, Carlos A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. *Parcerias Estratégicas*, CETESB, 2001. p.

OLIVEIRA, A. A. Cianobactérias: Potencial biotecnológico. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Biologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

OLIVEIRA, D. A.; et al. Sustentabilidade e eficiência energética na produção de biocombustíveis a partir de microalgas. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122150, 2021

OLIVEIRA, Flávia C. C.; SUAREZ, Paulo A. Z.; SANTOS, Wildson L. P. dos. O uso de combustíveis alternativos: uma análise sobre o álcool etílico hidratado e os biocombustíveis. Recebido em: 23 mar. 2007.

OLIVEIRA, R. P.; TEIXEIRA, R. M.; SOUZA, J. R. Avaliação do potencial lipídico de microalgas: um estudo com *Spirulina platensis* e *Chlorella vulgaris*. *Revista Brasileira de Alimentos*, v. 7, n. 2, p. 75-84, 2019.

PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM: light micrographs of different stages in the transformation. ResearchGate, 2015.

PEREIRA, T. R.; OLIVEIRA, R. S.; MORAES, L. A. B.; WERNECK, C. M.; SILVA, D. J. Produção de biodiesel a partir de *Thalassiosira pseudonana*: influências da manipulação do cultivo. *Revista Brasileira de Biotecnologia*, v. 2, n. 1, p. 15-25, 2019.

RESEARCHGATE. Application of photobioreactors for microalgae cultivation. 2018.

REIS, A.; CASTRO, R.; SOUZA, F. Estudo comparativo do teor lipídico de microalgas: *Phaeodactylum tricornutum* e outras espécies. *Journal of Applied Phycology*, v. 28, n. 4, p. 2237-2245, 2016.

SARKER, N. K.; KAPARAJU, P. A Critical Review on the Status and Progress of Microalgae Cultivation in Outdoor Photobioreactors Conducted over 35 Years (1986–2021). *Energies*, v. 16, n. 7, p. 3105, 2023.

SANTOS, A. M.; SILVA, L. G.; FERREIRA, R. R. Produção de biocombustíveis a partir de microalgas e cianobactérias: um estudo comparativo. *Revista Brasileira de Biotecnologia*, v. 3, n. 2, p. 45-56, 2013.

SANTOS, J. A.; FURLAN, A. M.; ALMEIDA, M. C. de. Produção de biodiesel a partir de óleo de fritura: otimização do processo de transesterificação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 10, p. 912-918, 2016.

SANTOS, A. L.; et al. (2020). "Avanços em métodos de extração de lipídios de microalgas." *Revista Brasileira de Biotecnologia*, 21(5): 300-315.

SANTOS, M. P.; et al. (2021). "Pirólise como alternativa na conversão de microalgas em biodiesel." *Revista Brasileira de Energia*, 29(3): 120-132.

SANTOS, A. L.; et al. (2016). "Transesterificação de óleos vegetais para a produção de biodiesel: um estudo sobre os parâmetros e a escolha do catalisador." *Revista Brasileira de Energia Renovável*, 21(1): 23-35.

SCIENCE PHOTO LIBRARY. Diatom, *Thalassiosira pseudonana*, TEM, 2018.

SILVA, A. C. da; SOUZA, J. M. de; RIBEIRO, R. C. (2021). Biodiesel a partir de microalgas: Uma análise das vantagens e desafios. *Revista Meio Ambiente*, v. 10, n. 1, p. 1102.

SILVA, C. R.; et al. (2018). "Qualidade e características do biodiesel de microalgas no Brasil." *Bioenergy Research*, 15(4): 667-680.

SILVA, L. S.; et al. (2019). "Uso de catalisadores básicos e ácidos na transesterificação de lipídios de microalgas." *Jornal de Química Aplicada*, 17(2): 91-102.

SILVA, C. E.; MOREIRA, M. J.; COSTA, T. M. Potencial antioxidante de pigmentos de cianobactérias aplicados na indústria cosmética. *Journal of Biotechnology and Health*, v. 5, n. 4, p. 23-35, 2014.

SILVA, Danilo Alves; OLIVEIRA, Maria Clara; COSTA, Renan de Souza. Produção e caracterização de biomassa de *Chlorella vulgaris* em água produzida. 2021.

SILVA, D. F.; COUTO, A. T.; VALENTIM, J. M.; MELO, A. D. Mini Review: Insights into the polymorphism of the diatom *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. *Journal of Applied Phycology*, 2013.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). O futuro da cogeração de energia no Brasil. São Paulo, 2022.

UM, M. et al. Production of biodiesel from microalgae through biological carbon fixation. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, v. 5, n. 3, p. 250-254, 2009.

VALDERRAMA, D. D.; LIMA, S. A.; DUDZIAK, G. S.; PENTEADO, P. R. M.; CASTILHO, M. A. Microalgas na produção de biodiesel: estudo das espécies *Dunaliella tertiolecta*, *Isochrysis galbana* e *Tetraselmis gracilis*. 2023.

VIDAL, M. de Fátima. Produção e Uso de Biocombustíveis no Brasil. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, n.79. (Caderno Setorial ETENE, n.79), 2019.

VIEIRA, E. F.; et al. (2015). "Comparação entre métodos convencionais e alternativos para a extração de lipídios de microalgas." *Revista de Ciências Ambientais*, 9(1): 45-58.