

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

FABIANA ALVES MADEIRA

**ROTA PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE
MICROALGAS**

SÃO CARLOS -SP
2024

FABIANA ALVES MADEIRA

ROTA PARA A PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni Horta

São Carlos-SP
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Fabiana Alves, Madeira

ROTA PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE
MICROALGAS / Madeira Fabiana Alves -- 2024.
36f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni Horta

Banca Examinadora: Prof. Dr. Antônio Carlos Luperni
Horta, Prof. Dr. Paulo Waldir Tardioli, Profa. Dra.

Adriana Paula Ferreira Palhares

Bibliografia

1. Biodiesel. 2. Microalgae; . 3. Scenedesmus obliquus. I.
Fabiana Alves, Madeira. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e Tecnologia

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso da candidata Fabiana Alves Madeira, realizada em 22/01/2024:

Prof. Dr. Antônio Carlos Luperni Horta
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Paulo Waldir Tardioli
Universidade Federal de São Carlos

Profa. Dra. Adriana Paula Ferreira Palhares
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família que sempre foi minha maior motivação a seguir em frente, mesmo com todas as adversidades e aos amigos Sônia e José por serem fiéis e incentivadores.

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Carlos, carinhosamente chamado de Kaká, por ter me apoiado mesmo com toda a adversidade encontrada e a compreensão dele com o momento. Também ao Prof. Dr. Paulo Tardioli pela preocupação e compreensão com a minha pessoa. A instituição por me proporcionar o conhecimento e crescimento que foi e é tão importante para o meu desenvolvimento enquanto ser humano.

“Ninguém realmente começa nada novo, Sra. Nemur. Todos se baseiam nos fracassos de outros homens. Não há nada realmente original na ciência. O que cada homem contribui para a soma do conhecimento é o que conta.” (Keyes, Daniel)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma possível rota tecnológica de bancada para produção de biodiesel a partir de microalgas. As microalgas estão presentes em todo o mundo e são potenciais produtoras de matéria prima para biodiesel. Ainda são pouco exploradas para esse fim, mas vêm adquirindo mais incentivos e pesquisas na área, pois apresentam características vantajosas em relação às culturas de plantas terrestres oleaginosas, como elevada conversão de luz solar em biomassa, alta eficiência, podem ser cultivadas em água não potável e apresentam crescimento rápido e facilitado. Além disso, são microrganismos fotossintetizantes que fixam o CO₂ atmosférico mitigando o efeito estufa. Para a obtenção de biodiesel considera-se as seguintes etapas principais: cultivo, colheita da biomassa, extração dos lipídios presentes nas células, e por fim a transesterificação dos acilglicerídeos que resulta em biodiesel e glicerol basicamente. A extração dos lipídios se mostrou como uma das etapas de maior atenção, apresentando diferentes metodologias possíveis para romper a parede da célula como uso de solventes polares e apolares, prensagem mecânica, fluídos supercríticos, choque osmótico, entre outros. Na produção e extração de lipídios provenientes de biomassa de *Scenedesmus obliquus*, deve-se considerar cuidadosamente as etapas e as características do material empregado, pois podem afetar a quantificação e obtenção do produto final. As técnicas possuem em geral, alta demanda de energia e pouca sustentabilidade ambiental e ainda alto custo de processamento. Nota-se que a *Scenedesmus obliquus*, apresenta características próprias que a tornam versátil aos mais variados métodos de extração, mesmo assim, no atual estudo de caso, a técnica mais indicada de extração seria o uso de micro-ondas associada ao uso do solvente acetato de etila. Para a secagem sugere-se o processo em estufa, já para a colheita, a centrifugação da biomassa produzida em fotobiorreator se mostrou mais adequada.

Palavras-chave: biodiesel; microalgae; *Scenedesmus obliquus*

ABSTRACT

This work presents a possible bench-scale technological pathway for biodiesel production from microalgae. Microalgae are found worldwide and are potential producers of raw material for biodiesel. They are still underexplored for this purpose, but are gaining more incentives and research in this area due to their advantageous characteristics compared to terrestrial oilseed crops, such as high conversion of sunlight to biomass, high efficiency, ability to be cultivated in non-potable water, and rapid and easy growth. In addition, they are photosynthetic microorganisms that fix atmospheric CO₂, thereby mitigating the greenhouse effect. For the production of biodiesel, the following main steps are considered: cultivation, biomass harvesting, extraction of lipids present in the cells, and finally transesterification of acylglycerides to essentially biodiesel and glycerol. Lipid extraction has been highlighted as one of the most critical steps, with various possible methods to disrupt the cell wall, including the use of polar and non-polar solvents, mechanical pressing, supercritical fluids, osmotic shock, among others. In the production and extraction of lipids from biomass, it is important to carefully consider the steps and characteristics of the material used, as they may affect the quantification and yield of the final product. The techniques generally have high energy requirements, low environmental sustainability and high processing costs. It is noted that *Scenedesmus obliquus* has characteristics that make it versatile for different extraction methods; however, in the current case study, the most appropriate extraction technique would be the use of microwave-assisted extraction combined with ethyl acetate solvent. For drying, oven drying is suggested, while for harvesting, centrifugation of the biomass produced in the photobioreactor proved to be more appropriate.

Keyword: biodiesel; microalgae; *Scenedesmus obliquus*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação de cultivo, colheita, secagem e de extração lipídica de microalgas.	14
Figura 2 - Reator do tipo lagoa aberta	15
Figura 3 - Fotobiorreator tubular	15
Figura 4 - Fluxograma sugerido para produção de biodiesel de microalga em escala de bancada	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e limitações de lagoas abertas e fotobiorreatores	16
Tabela 2 - Métodos de colheita, suas vantagens e desvantagens	19
Tabela 3 - Métodos de secagem com suas vantagens e desvantagens	21
Tabela 4 - Métodos de extração mais utilizados, vantagens, desvantagens e considerações	25

LISTA DE SIGLAS

DAF	flotação por ar dissolvido
dcw	dry cell weight (massa celular seca)
ECF	eletrocoagulação-flotação
g	grama
HCH	hexano comprimido a quente
MAE	extração assistida por micro-ondas
mg	miligramas
ml	mililitros
PVC	policloreto de vinila
v/v	razão volume/volume
μ max	Taxa específica máxima de crescimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	PROCESSO DE EXTRAÇÃO	13
2.2	CULTIVO	14
2.3	COLHEITA	18
2.4	SECAGEM	20
2.5	EXTRAÇÃO	21
2.6	MICROALGA SCENEDESMUS SP	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4	DISCUSSÃO	27
5	CONCLUSÃO	31
	REFERÊNCIAS	32

1 INTRODUÇÃO

Os desastres ambientais causados pelo aquecimento global emergem como uma das preocupações centrais da contemporaneidade, tornando imperativa a adoção de tecnologias de mitigação. Nesse contexto, a busca por fontes de energia renováveis torna-se crucial para reduzir os impactos ambientais e promover uma produção sustentável. Entre as alternativas promissoras, destaca-se o biodiesel, que compartilha propriedades de combustão similares ao diesel convencional, mas com emissões reduzidas de compostos poluentes. Além disso, o biodiesel é isento de componentes aromáticos e de enxofre, sendo derivado de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais. Uma abordagem particularmente promissora para a produção de biodiesel envolve o uso de microalgas. Esses microrganismos têm a capacidade de capturar o CO₂ presente na atmosfera e utilizar esse carbono como nutriente para a síntese de lipídios que podem ser usados como matéria-prima para a produção de biodiesel, estabelecendo assim um ciclo sustentável de produção (FERREIRA, I., 2021; ZORN et al., 2016; SILVA, G. 2013).

As microalgas estão presentes em todo o mundo e são potenciais produtoras de matéria-prima para biodiesel. Ainda são pouco exploradas para esse fim, mas vêm adquirindo mais incentivos e pesquisas na área, pois possuem características vantajosas em relação às culturas terrestres. Estes microrganismos apresentam elevada capacidade de conversão de luz solar em biomassa, alta eficiência, podem ser cultivadas em água não potável, apresentam crescimento rápido e facilitado e além de tudo, utilizam CO₂ como fonte de nutriente, mitigando o acúmulo de gás carbônico na atmosfera (ZORN et al., 2016; SILVA, G. 2013). Comparativamente às plantas oleaginosas, as microalgas apresentam algumas vantagens importantes, tais como não serem concorrentes à produção alimentícia, não necessitam de grandes áreas de cultivo, aliás podem ser cultivadas em áreas inférteis e sobretudo produzem maior quantidade de óleo (SILVA, R.; BACHOLSKY; JERÔNIMO, 2015).

Segundo YIN e colaboradores (2020), as diferentes matérias-primas apresentam diferentes eficiências de conversão de biomassa em biodiesel. Podem-se citar algumas como a canola com 1%, o coco com 1,5%, a palma com 3% e, sendo significativamente maior, algumas espécies de microalgas com até 91%.

Assim como em outros métodos de obtenção de biocombustíveis a partir de vegetais, é essencial considerar condições fundamentais para a produção, que abrangem a eficiência fotossintética, a produção de lipídios, o custo de produção e a colheita (BRENNAN; OWENDE, 2010). As técnicas utilizadas na produção de biodiesel a partir de microalgas são similares às já empregadas para biodiesel proveniente de gorduras animais e óleos vegetais, sendo dependentes de suas composições. Para tal, são aplicados processos como esterificação, transesterificação e craqueamento térmico (FERREIRA, I., 2021).

Para a obtenção de biodiesel a partir de microalgas considera-se as seguintes etapas: cultivo, floculação da biomassa, extração dos lipídios presentes nas células, e por fim a transesterificação. A extração dos lipídios é etapa fundamental no processo e se utiliza de diferentes metodologias para romper a parede da célula como solventes polares e apolares, prensagem mecânica, fluídos supercríticos, choque osmótico, entre outros (ZORN et al., 2016; Oliveira et al., 2014; VIÊGAS, 2010).

Com uma notável flexibilidade de processamento no que diz respeito à produção de fontes de energia, muitas microalgas se proliferam eficientemente ao utilizar a energia solar, convertendo-a em energia química por meio da fotossíntese. Assim, os sistemas utilizados para sua produção incluem lagoas fotossintéticas, que são sistemas abertos, e fotobiorreatores, que são sistemas fechados (ZORN, et al., 2016).

Para garantir uma rápida multiplicação celular, as microalgas demandam condições ideais em seu cultivo. Entretanto, sob tais condições favoráveis, elas não armazenam quantidades significativas de carboidratos e lipídios, o que torna inviável a produção de biodiesel. Por outro lado, algumas condições de cultivo podem provocar uma diminuição no crescimento celular, redução na síntese proteica e maximização do acúmulo de óleos. Com a privação de nutrientes como fósforo e nitrogênio, as células microalgais podem redirecionar o metabolismo para armazenar substâncias na forma de triglicerídeos ou triacilgliceróis. Além disso, ocorre um aumento na síntese enzimática específica para absorção nutricional, resultando no acúmulo de carboidratos e lipídios, predominantemente próximo às mitocôndrias. A quantidade e composição desses lipídios variam de acordo com a espécie de microalga utilizada, sendo posteriormente extraídos para a conversão em biodiesel (ZORN, et al., 2016; HAKALIN, 2014).

Assim como outros microrganismos, as microalgas recorrem à síntese de acilgliceróis como forma de armazenamento de energia. Tipicamente, essa síntese inicia-

se a partir do L- α -fosfoglicerol, derivado da via glicolítica, e acilCoA. A transferência de resíduos de acila ocorre através da acilCoA transferase, que forma o ácido lisofosfatídico. Este último, por meio da L-acilglicerol-3-fosfato-aciltransferase, transfere outra acila, resultando no ácido L- α -fosfatídico. Composto este que é precursor dos fosfolipídios ou, converte-se em triacilglicerol após a ação de uma fosfatase e a incorporação do terceiro resíduo de acila pela diacilglicerolacil transferase (HUANG et al., 2010).

O objetivo deste trabalho de revisão bibliográfica é realizar um levantamento abrangente das pesquisas recentes sobre a produção de biodiesel a partir de microalgas, analisar as metodologias e tecnologias disponíveis e, com base nessa análise, propor uma rota viável para a produção sustentável de biodiesel a partir desses microrganismos. A revisão se concentrará na avaliação das diferentes técnicas de cultivo, extração de lipídios e processos de transesterificação, levando em consideração aspectos como eficiência, impacto ambiental e viabilidade econômica. O objetivo final é contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis para a produção de biodiesel a partir da microalga *Scenedesmus obliquus*, visando à redução da dependência de fontes de energia fósseis e à mitigação dos impactos ambientais associados.

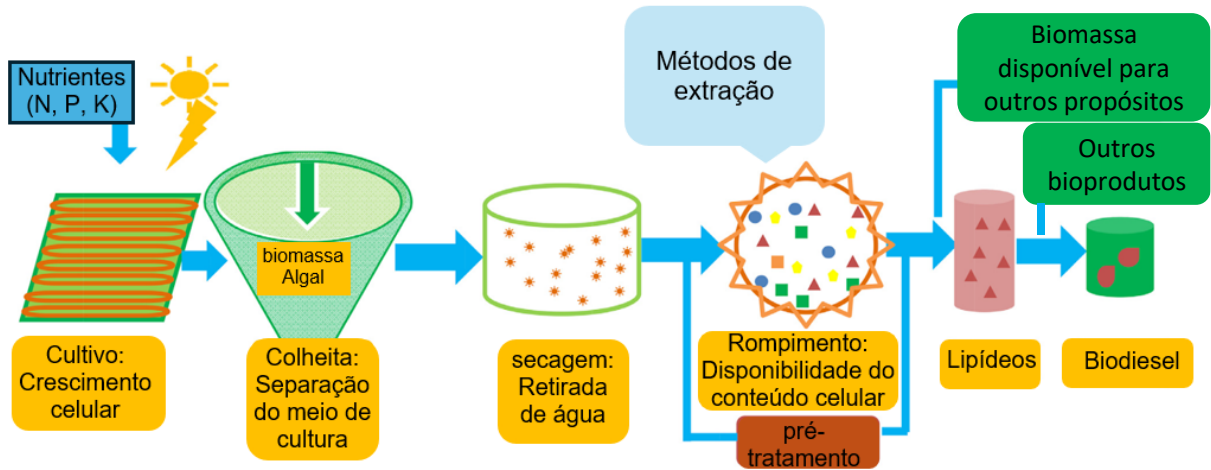
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção apresenta uma revisão detalhada dos principais conceitos relativos ao desenvolvimento do trabalho.

2.1 PROCESSO GERAL DE PRODUÇÃO DE BODIESEL:

A produção do biodiesel proveniente de microalgas é dependente de uma série de etapas até sua obtenção, conforme representado no fluxograma a seguir, Figura 1. Nesse processo, compreende-se o cultivo, seguido da colheita, secagem, rompimento celular para separação dos lipídios e da biomassa, que fica disponível para diversas aplicações. A etapa crítica da extração de lipídios, considerada o maior obstáculo devido ao seu custo e baixa taxa de extração, envolve métodos mecânicos e químicos, como prensagem, extração Soxhlet, extração assistida por ultrassom e extração com líquidos iônicos (KUMAR, 2022; KALSUM, 2019; ELOKA-EBOBKA, 2017; WU, 2017).

Figura 1 – Representação de cultivo, colheita, secagem e de extração lipídica de microalgas.



Fonte: Adaptado de (KUMAR, 2022)

2.2 CULTIVO

Como visto anteriormente, a produção de biodiesel inicia-se com a obtenção de biomassa rica em óleos. Existem duas formas principais para produção de biomassa que são os sistemas abertos e os sistemas fechados. Os abertos, representado na Figura 2, compreendem as águas naturais, como os tanques e lagoas e as conhecidas “*raceway ponds*”, que são habitualmente construídos em circuito de canais retangulares conectados nas extremidades de forma ovalada, normalmente construídos em concreto ou policloreto de vinila (PVC) (RICHMOND, 2004; BRENNAN; OWENDE, 2010).

De forma geral, as lagoas abertas são mais baratas para cultivos de larga escala, requerem menos gasto de energia, manutenção e a limpeza é facilitada. No entanto, ainda de acordo com BRENNAN; OWENDE, (2010), sistemas abertos podem consumir bastante energia elétrica nos impelidores, necessitando-se também de cuidado quanto à evaporação da água e do nível do tanque. Outro problema relevante é que esses sistemas são mais propensos a fatores climáticos, contaminações por bactérias e falta de controle de temperatura, intensidade de iluminação e evaporação (RICHMOND, 2004; BRENNAN, L; OWENDE, P. 2010).

Já os sistemas fechados, os chamados fotobiorreatores, Figura 3, podem apresentar arranjos variados, tais como em colunas, tubulares ou placas. Existe uma variedade grande de materiais disponíveis para a construção destes sistemas, tais como

vidros, plásticos diversos rígidos ou flexíveis. Como fonte de energia, a iluminação pode ser natural quando estão ao ar livre ou artificial quando se precisa de um controle específico. Por serem fechados apresentam menor índice de contaminação, oferecem ainda um controle de temperatura, reduzido efeito de sombreamento e de taxa de evaporação e perda de CO₂. No entanto, estes sistemas apresentam maior custo para serem construídos e para sua operação (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Figura 2 - Reator do tipo lagoa aberta



Fonte: O autor, 2024.

Figura 3 - Fotobiorreator tubular



Fonte: UFPR, 2024

A Tabela 1 elenca algumas características de lagoas abertas e fotobiorreatores.

Tabela 1 - Vantagens e limitações de lagoas abertas e fotobiorreatores.

Sistema	Vantagens	Limitações
Lagoa aberta (raceway pond)	<ul style="list-style-type: none"> - Relativamente barato; Fácil limpeza; - Utilização de áreas não agrícolas; - Fácil manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa produtividade de biomassa; - Requer grande área de terra; - Limitado a poucas cepas; - Suscetível a contaminação.
Fotobiorreator tubular	<ul style="list-style-type: none"> - Necessita de grande área de iluminação; - Adequado para culturas ao ar livre; - Relativamente barato; - Boa produtividade de biomassa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Crescimento nas paredes; - Suscetível a incrustações; - Gradientes de pH e O₂ nos tubos
Fotobiorreator de placas	<ul style="list-style-type: none"> - Alta produtividade de biomassa; - Facilidade de esterilização; - Acúmulo reduzido de O₂; - Fácil ajuste; - Bom caminho para a luz; - Grande área de iluminação; - Redução de foto-inibição e foto-oxidação 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil escalonamento; - Maior custo em comparação com lagoas abertas; - Crescimento nas paredes; - Construção sofisticada
Fotobiorreator de coluna	<ul style="list-style-type: none"> - Compacto; - Alta transferência de massa; - Baixo consumo de energia; - Boa mistura com baixa tensão de cisalhamento; - Facilidade de esterilização; - Redução de foto-inibição e foto-oxidação. 	<ul style="list-style-type: none"> - Área pequena de iluminação; - Maior custo em comparação com lagoas abertas; - Tensão de cisalhamento; - Construção sofisticada.

Fonte: (BRENNAN; OWENDE, 2010; SILVA, G. 2013; DEBOWSKI, 2020)

Sintetizando as características apresentadas, lagoas abertas são menos eficientes quando comparadas aos fotobiorreatores fechados, e isto se deve a fatores como a perda por evaporação, que resultam em modificações iônicas do meio; variações na temperatura, pois geralmente não possuem controle e acompanham a temperatura ambiente; deficiência de CO₂ devido a difusão para atmosfera, resultando em redução de rendimento e produtividade; limitação da luz pela camada superior e ainda uma mistura ineficiente, pois os mecanismos de agitação tendem a ser ineficientes. Apesar do cultivo em fotobiorreatores fechados apresentarem maior custo, possuem melhor controle de parâmetros do processo, e mitigam boa parte dos problemas associados às lagoas, como cultura única por longos períodos, o que reduz os custos da etapa de colheita. Para uma cultura de *Scenedesmus obliquus*, um ambiente com controle de temperatura fornece uma boa produtividade e atinge concentrações elevadas de biomassa (HAKALIN, 2014; BAUMGARTNER, 2011; BRENNAN, OWENDE, 2010).

O acúmulo de ácidos graxos e lipídios em microalgas é fortemente influenciado pelo controle de várias condições de crescimento. Um dos fatores frequentemente manipulados é a concentração de nitrogênio, um nutriente essencial para o crescimento das microalgas. Limitar a disponibilidade de nitrogênio no meio de crescimento induz condições de estresse, promovendo o acúmulo de lipídios, já que as microalgas armazenam energia na forma de lipídios durante períodos de estresse. A privação de nitrogênio é, assim, uma estratégia conhecida para aumentar o teor de lipídios em microalgas (TRIVEDI, 2022; DEBOWSKI, 2020; GARCIA, 2019; BARBERA 2015; ZHANG et al., 2014).

Outro fator crítico é a luz, essencial para a fotossíntese. Maior intensidade e períodos prolongados de luz podem aumentar a fotossíntese e, conseqüentemente, a produção de lipídios. Contudo, a exposição excessiva à luz pode resultar em estresse foto-oxidativo (GUEDES, PALMA, HORTA, 2023; GUEDES, LOMBARDI, HORTA, 2023; DEBOWSKI, 2020; BARBERA, 2015).

ANURADHA (2021) otimizou as condições de cultivo da microalga *Scenedesmus obliquus* em um sistema de lagoa aberta de 5 litros, considerando a influência de NaNO_3 , K_2HPO_4 , NaCl e o pH inicial do meio no rendimento de biomassa e teor de lipídios. Utilizando um planejamento composto central, foi aplicado um método de otimização multiobjetivo para equilibrar a acumulação de biomassa e lipídios, visando à produção econômica de biocombustíveis. O sistema de lagoa aberta incluiu períodos de luz e escuridão, resultando em um rendimento final de $1275,8 \text{ mg L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de biomassa, com um teor de lipídios de 50,66% dcw.

Além da composição do meio e das características da iluminação, a temperatura também desempenha um papel importante no direcionamento das atividades metabólicas das microalgas. Condições de temperatura estressantes, tanto altas quanto baixas, podem desencadear o acúmulo de lipídios. Os perfis indutores de temperatura podem variar entre as diferentes espécies de microalgas. Aliado ao estresse térmico, a suplementação com dióxido de carbono (CO_2) pode ser essencial para acelerar a fotossíntese e acúmulo de produto. Elevados níveis de CO_2 têm o potencial de aumentar a biomassa e a produtividade de lipídios em microalgas, sendo algumas espécies capazes de utilizar eficientemente níveis elevados de CO_2 (DEBOWSKI 2020).

2.3 COLHEITA

Os métodos atuais de colheita de microalgas envolvem operações biológicas, químicas, mecânicas e, em menor medida, elétricas. Em geral, não há um único método comprovadamente melhor para a colheita, pois cada um apresenta suas vantagens e desvantagens, elencadas na Tabela 2. Após o ciclo de cultivo em fotobiorreatores abertos ou fechados, é necessário realizar a separação da biomassa do meio de cultura, e possibilitar sua utilização. O processo adequado para remover quantidades consideráveis de água e processar volumes significativos de biomassa de microalgas pode envolver várias etapas. Diversos métodos físicos, químicos e biológicos são empregados para alcançar a desejada separação sólido-líquido. Entre os métodos de coleta frequentemente utilizados estão a sedimentação, centrifugação, filtração, ultrafiltração, ocasionalmente combinados com etapas adicionais de floculação ou uma abordagem que une flotação e floculação (BRANIYKOVA, 2018; BRENNAN, OWENDE, 2010; MATA et al. 2010; MOLINA, 2004; GRIMA et al. 2003).

Os custos de colheita, que representam cerca de 20 a 30% dos custos totais de produção, são frequentemente abordados na literatura. No entanto, observa-se uma dificuldade em determinar os custos gerais ou específicos da separação da biomassa de microalgas por dois motivos principais. O primeiro decorre da falta de informações disponíveis, enquanto o segundo está relacionado à ampla variedade de processos indicados para cada biomassa específica, influenciada por fatores como o tipo de microalga utilizado (tamanho, carga superficial) e o método de separação empregado (WANG, 2019, BRANIYKOVA, I. 2018; CARDOSO, 2011).

Ao combinar diferentes métodos de colheita, é possível mitigar deficiências individuais de cada processo, aliando as vantagens de cada um e promovendo uma sinergia eficaz. A escolha dos métodos de colheita muitas vezes depende do tipo de produto desejado, requerendo considerações específicas para garantir que as técnicas não interfiram nos produtos finais, preservem a reprodutibilidade, extraiam produtos de alto valor agregado e forneçam biomassa para a ruptura celular e etapas seguintes, como a secagem. Torna-se crucial selecionar técnicas que assegurem uma separação celular eficiente, possibilitem a reciclagem de água e nutrientes, e mantenham o processo economicamente viável. Dessa forma, é essencial adotar abordagens que atendam a esses critérios, levando em consideração a eficiência na separação celular, a sustentabilidade do uso de recursos e a viabilidade econômica do processo (KUMAR, 2022; BRANIYKOVA, 2018; CHUTIA, 2017; CARDOSO, 2011).

Tabela 2: Métodos de colheita, suas vantagens e desvantagens.

Método	Considerações	Vantagens	Desvantagens
Sedimentação por Gravidade	Induzida pela velocidade, raio e densidade das células.	Reciclo de água; Econômico; Colheita em grande escala.	Partículas microalgais de baixa densidade não assentam adequadamente.
Centrifugação	Específico para extrair produtos valiosos com vida útil mais longa para aplicação em alimentos, aquicultura.	Eficiência de colheita; Tempo de operação curto; Biomassa de alto valor; Livre de contaminação.	Custos de investimento, operacional e de manutenção elevados.
Floculação	Células de algas com carga negativa flutuam no meio e não se depositam sob a gravidade.	Formação de partículas grandes facilita a colheita em grande escala.	Ruptura celular prejudica recuperação geral; Alto custo de floculante.
Filtração	Apropriado para colheita de microalgas maiores (>70 µm).	Não requer produtos químicos; Simples de operar com alta eficiência de separação.	Oclusão da membrana requer substituições frequentes; Bombeamento intensivo; Consumo de energia.
Flotação	A força iônica do meio, pH, formação de bolhas e tipo de coletor usado afetam a eficiência.	Colheita em grande escala; Baixo custo.	Agentes floculantes baratos podem causar contaminação.
Imobilização	Matriz de aprisionamento com fungos filamentosos; palletização imobiliza e cultiva microalgas de água doce.	Menor consumo de energia.	Taxa de crescimento baixa.
Eletroforese	Elimina a necessidade de usar produtos químicos para a colheita.	Ecologicamente correto, seguro, energeticamente eficiente e econômico.	-

Fonte: KUMAR 2022; BRANIYKOVA, I. 2018, CHUTIA, 2017.

Embora as abordagens elétricas para a colheita de microalgas não sejam amplamente difundidas, esses métodos demonstram versatilidade ao serem aplicáveis a diversas espécies de microalgas. Dado que as células de microalgas possuem carga negativa, a aplicação de um campo elétrico ao caldo de cultura permite a separação das células. Elas podem formar precipitações nos eletrodos, um processo conhecido como eletroforese, ou se acumular no fundo do recipiente, caracterizando a eletrofloculação. Por outro lado, o mecanismo de eletroflotação difere do método de flotação por ar dissolvido (DAF) apenas na forma como as bolhas são geradas. Bolhas de hidrogênio são produzidas por meio da eletrólise da água, uma abordagem potencialmente mais econômica que o DAF convencional. A geração dessas bolhas pode ocorrer no ânodo e ser combinada com a eletrocoagulação, que se desenvolve por meio da oxidação eletrolítica no cátodo. Esse processo é denominado eletrocoagulação-flotação (ECF) (CHUTIA, 2017).

2.4 SECAGEM

Os estudos indicam que após a colheita, o processo de secagem da biomassa é muito importante. Certos componentes celulares, como os óleos, tendem a apresentar maior complexidade de extração por solvente quando a biomassa está úmida. Nesse cenário, é necessário realizar a ruptura celular para facilitar a extração. No entanto, esses constituintes são mais facilmente extraídos quando a massa está liofilizada, conforme observado por Brennan e Owende (2010).

Por ser perecível, a biomassa colhida deve ser rapidamente processada. Neste caso, a desidratação e secagem são largamente utilizadas para estender a viabilidade do produto desejado (BRENNAN; OWENDE, 2010). O método mais empregado seria o tambor de secagem (*drum-drying*) que utiliza a transferência de calor através das paredes de um cilindro para secar a amostra. Outro processo promissor é a secagem com spray (*spray dry*) que pulveriza a amostra numa câmara com corrente de ar quente, apresentando esse custo energético a mais. Além do custo, esse processo deve ser bem avaliado, pois pode causar danos significativos a determinados produtos em função da alta temperatura. Para contornar o problema da elevada temperatura pode-se utilizar a liofilização. Este método remove a umidade por sublimação, congelando a amostra ao invés de aquecê-la. É um processo igualmente oneroso, principalmente ao considerar uma produção em larga escala, como é o caso analisado aqui para a extração de óleos para biocombustível. Neste sentido, o método mais barato seria a secagem ao sol. No entanto, requer longas superfícies com risco de perda de material e mais suscetível a contaminações (MOLINA, 2004; BRENNAN, OWENDE, 2010; CARNEIRO, 2017).

Dentre mais diversos tipos de secagem disponíveis, a Tabela 3 faz uma breve descrição dos mais empregados, contendo suas vantagens e desvantagens.

Tabela 3: Métodos de secagem com suas vantagens e desvantagens.

Método de Secagem	Vantagens	Desvantagens
Tambor de Secagem (Rotary/Drum Drying)	Facilita esterilização e ruptura celular	Alto custo energético
Secagem com Spray	Eficiente para consumo humano; Secagem rápida	Atomização em alta pressão pode reduzir a qualidade e aumentar custos
Secagem ao Sol	Apropriado para áreas com pouca energia	Dependente do clima, demorado, suscetível a contaminação e superaquecimento
Secagem a Vácuo (Vacuum-Shelf Drying)	Secagem eficiente e rápida	Alto custo de investimento e operacional
Secagem por Convecção (Secagem em Forno)	Teor lipídico próximo ao da biomassa fresca	Perda de 10-20% de proteína, suscetível ao calor
Liofilização	Preserva constituintes sem romper parede celular	Menos oxidação de carotenoides

Fonte: KUMAR, 2022.

2.5 EXTRAÇÃO DE LIPÍDIOS

Para obter resultados satisfatórios nas extrações de lipídios provenientes de microalgas, é crucial que o método de extração seja rápido e eficiente, minimizando a degradação. O conhecimento detalhado da microalga em relação à sua classe lipídica e constituintes é fundamental para alcançar esse objetivo (VIÊGAS, 2010). No processo de extração, é essencial encontrar um equilíbrio entre eficiência e viabilidade econômica, assegurando que os resultados sejam obtidos de maneira eficaz e economicamente sustentável (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Entre os métodos de extração de lipídios provenientes de microalgas, que em geral baseiam-se em uso de solventes, podem-se citar: prensagem mecânica, Soxhlet, método de Bligh and Dyer, ultrassom ou micro-ondas, fluido supercrítico e sonicação. Dentre estes, o método de Bligh and Dyer é o mais utilizado (FERREIRA, I., 2021; FERREIRA, M., 2021; BAUMGARDT, 2013). Os métodos e seus resultados possuem vantagens e desvantagens que se relacionam diretamente com os solventes utilizados, com os equipamentos e com seu consumo de energia (JARENKOW, 2014).

O método soxhlet, desenvolvido por Folch, tem uso amplo e baseia-se na utilização da mistura clorofórmio:metanol (2:1, em volume) e subsequente solução salina adicionada para maior separação de fases. A adaptação desta metodologia é o método conhecido como *Bligh e Dyer*, com adição de água na mistura, com relação de clorofórmio:metanol:água de 2:1:0,8 (em volume) e, ambos os métodos se mostraram eficientes, pois permitem extração de lipídios polares e apolares. O Soxhlet promove

a percolação do material pelo solvente constante e exaustivamente, potencializando a extração (MUSTAPHA, 2020; BAUMGARDT, 2013).

Ainda que o processo seja eficiente e rápido, utilizam-se solventes de alta toxicidade em proporções muito maiores que a massa amostral, sendo preciso, então, a utilização de solventes verdes e a diminuição da proporção de consumo biomassa:solvente (FERREIRA, I., 2021).

Os métodos de extração com solvente passam por diversas etapas. Inicialmente, ocorre o contato da célula com um solvente não polar, como clorofórmio ou hexano, que penetra na parede celular para alcançar o interior da célula. Nessa fase, estabelece-se a interação entre o solvente e os lipídios por meio das forças de van der Waals, formando um complexo orgânico. Esse complexo é movido pelo gradiente de concentração através da membrana celular, resultando na extração dos lipídios para fora das células. Os lipídios, então, são dissolvidos no solvente apolar, mantendo-se como um complexo intacto, resistente à ação de agitação ou fluxos de solventes (ZORN, et al., 2016).

Durante esse processo, os lipídios neutros permanecem próximos ao citoplasma, formando um complexo com lipídios polares. Esses lipídios polares estão ligados por pontes de hidrogênio às proteínas da membrana celular, o que impede que ligações fracas, como as de van der Waals, se conectem ao solvente não polar. Para romper essas ligações lipídios-proteínas, torna-se necessário o uso de solventes polares, os quais formam pontes de hidrogênio com os lipídios polares do complexo. A adição de solvente polar ao solvente apolar facilita a extração do complexo de lipídios neutros ligados à membrana, mesmo que os polares também sejam cooptados no processo (ZORN, et al., 2016).

A ocorrência de extração por solventes pressurizados se faz necessário quando tem-se misturas envolvendo substratos sólidos. Este processo possui duas etapas que compreendem obter o extrato e em sequência separar o solvente. Na primeira etapa, introduz-se no extrator um solvente que escorre em um leito fixo formado pela biomassa, que terá seus constituintes solubilizados. Para a etapa subsequente, faz-se necessário retirar-se do extrator o complexo soluto-solvente, pois os solventes se encontram em fase gasosa à temperatura ambiente (BAUMGARDT, 2013). Um ponto interessante neste tipo de extração é o uso de co-solvente, o mais frequente é

o etanol, que aumenta a polaridade do meio, aumentando o rendimento e/ou seletividade do processo (SILVA, G., 2013)

O emprego de fluidos pressurizados como solventes de extração pode ser benéfico ao lidar com amostras sensíveis química e termicamente, pois esses fluidos podem existir no estado supercrítico ou subcrítico. No estado supercrítico a extração apresenta um maior rendimento em comparação aos métodos tradicionais, não retém solvente nos sólidos e obtém-se um alto grau de pureza no soluto. Já no estado subcrítico requer pressão e temperatura mais baixas, isto diminui tempo e consumo de solventes (SILVA, G., 2013).

BAUMGARDT (2013) comparou os rendimentos de extração utilizando a técnica de fluidos pressurizados e obteve aumento na quantidade de óleos extraídos e no rendimento final utilizando etanol como co-solvente para extração, assim como propano e CO₂. O autor constatou que ao usar o conjunto solvente e co-solvente as extrações foram mais econômicas e rápidas. Apesar das extrações convencionais apresentarem melhores rendimentos, a utilização de fluido supercrítico diminuiu em dez vezes o consumo de etanol em relação ao método de Soxhlet e ainda produziu um extrato praticamente livre de solventes. Nos métodos tradicionais há a necessidade de remoção destes e posterior purificação.

Uma outra técnica usada para a extração de lipídios é a prensagem mecânica e homogeneização, que se utiliza de pressão para romper a parede celular e liberação do conteúdo lipídico do interior da célula. Esta técnica diminui a contaminação externa microalgal, preserva as substâncias químicas intracelulares e seu rendimento é dependente do grau de desintegração celular. Neste caso, a resistência da parede celular, a interação entre biomassa e grânulos e o tamanho destes grânulos, são variáveis que interferem na eficiência do processo. Esta operação, em geral, pode ser combinada com solventes para facilitar o processo de extração do óleo da biomassa (SILVA, G., 2013).

A técnica do banho de ultrassom, ou sonicador, apresenta-se promissora para extrair óleos de microalgas, pois melhora o processo de extração significativamente, possui baixo custo, diminui tempo de extração, possui elevada eficiência e elevados rendimentos. Esta técnica consiste no processo de cavitação que cria e implode microbolhas de gás em fase líquida e a variação da pressão produz fases alternadas de

compressão e descompressão, a rarefação. Esta cavitação sofre influência de parâmetros como os solventes utilizados, a temperatura, frequência e intensidade de radiação (SILVA, 2013; BARBOZA e SERRA, 1992).

Outro comparativo realizado com o método tradicional do Soxhlet foi o ultrassom utilizando a microalga *Cryptocodinium cohnii*, se mostrando mais eficiente na lise celular e aumentando o rendimento do óleo de 4,8% do método tradicional para 25,9%. Portanto, um método promissor, de baixo custo, de alta eficiência, reduzido tempo de extração e rendimento aumentado (SILVA, G., 2013, apud CRAVOTTO et al., 2008; WEI et al., 2008)

Na extração por micro-ondas, ao atingir a biomassa, é induzido um campo elétrico que oscila rapidamente e interage com a água, um material dielétrico/polar. Esse processo gera calor, levando à formação de vapores que promovem a lise celular de dentro para fora (KUMAR, 2022; JARENKOW, 2014).

Jarenkow (2014) apud Lee *et al.* (2010a) compararam métodos para ruptura celular e constataram que o pré-tratamento com micro-ondas mostrou melhor resultado dentre os testados, apresentando percentual mais elevado de extração de lipídios e sendo tecnicamente simples, fácil e eficiente para o trabalho proposto. A aplicação da técnica de micro-ondas expõe ao meio o conteúdo da célula, facilitando a extração por solvente e a tornando mais efetiva. No entanto, faz-se necessário a remoção dos resíduos sólidos após a aplicação da técnica e a mesma apresenta menor eficiência em solventes não polares ou voláteis (KUMAR, 2022; JARENKOW, 2014).

Zhou *et al.* (2019) utilizaram n-hexano/isopropanol como opção de solvente e realizaram extração de lipídios de uma cultura de *Scenedesmus Obliquus* na proporção de solvente n-hexano/isopropanol de 3:2 (V:V) e proporção de fase de co-solvente/biomassa de 50:1 (mL:g). Posteriormente, avaliaram a produção de biodiesel pela transesterificação destes lipídios com metanol. As taxas de extração de lipídios e ésteres metílicos de ácidos graxos assistidas por micro-ondas (MAE) foram de 88,25% e 95,58%, respectivamente. Os autores ainda realizaram análise por microscopia eletrônica de varredura indicando que a ruptura da parede celular de *Scenedesmus obliquus* por micro-ondas resultou em uma melhor penetração dos solventes e maior eficiência na extração de lipídios.

Kalsum *et al.* (2019) empregaram aquecimento por um micro-ondas devidamente projeto aos experimentos realizados e extraíram lipídios da microalga *Spirulina*

platensis utilizando como solventes metanol e n-hexano em diferentes proporções volumétricas: 1:2, 1:1 e 1:0 (v/v). Os autores obtiveram um rendimento de 12,5% de lipídios, enquanto na extração utilizando a metodologia Soxhlet, o rendimento foi de apenas 1,3%.

Na Tabela 4 faz-se uma comparação entre os principais métodos de extração, suas vantagens e desvantagens e algumas considerações.

Tabela 4 – Métodos de extração mais utilizados, vantagens, desvantagens e considerações.

Métodos	Considerações	Vantagens	Limitações
Prensagem	-	Fácil manipulação; Sem solventes.	Processo lento; Requer muita matéria-prima.
Extração com solvente	Solventes incluem n-hexano, etanol, metanol etc.	Custo acessível; Eficaz em pequena escala; Bem estabelecido.	Processo demorado e trabalhoso; Exige grandes volumes de solvente; Solventes inflamáveis e tóxicos; Recuperação dispendiosa.
Extração com fluido supercrítico	Operação depende de temperatura, pressão e taxa de fluxo.	Menos tóxico, Sem resíduos de solventes, substituição por CO ₂ . Economiza tempo.	Alto custo operacional; Alto custo de infraestrutura; Alto consumo de energia.
Ultrassom	Parâmetros como potência devem ser otimizados.	Baixo custo operacional; Tempo de extração curto; Ruptura celular melhorada.	Alto consumo de energia; Desafios em larga escala; Geração de poluentes não voláteis; Possíveis reações prejudiciais.
Extrações assistidas por micro-ondas (MAE)	Considerar temperatura, solvente, sólido-líquido, tempo.	Utiliza menos solvente; Aumento do rendimento de lipídios, menor custo operacional e tempo de extração.	Custos de manutenção limitam em escala comercial. Centrifugação/filtração essenciais. Eficiência reduzida com compostos não polares ou voláteis.

Fonte: (KUMAR, 2022; JURENKOW, 2014; SILVA, G. 2013)

Os métodos convencionais ainda são amplamente empregados devido ao baixo custo e à operação simplificada. Em um estudo recente, Ferreira, I. (2021) utilizou acetato de etila como solvente de extração, obtendo a extração de lipídios de uma cultura de *Scenedesmus obliquus* sem a necessidade de outros solventes, como o hexano, e empregando rompimento mecânico por maceração. O autor comparou diferentes solventes, incluindo clorofórmio: metanol (1:2 v/v), acetato de etila e hexano:etanol (1:1 v/v), observando que o primeiro requer apenas uma extração para extrair todo o óleo, enquanto os demais necessitam de duas ou mais extrações para alcançar rendimentos estatisticamente equivalentes no final do processo (Ferreira, I., 2021).

Wu (2017) realizou extração intracelular de lipídios da *Chlorella sp.* cultivada em lagoas de corrida ao ar livre; foi desenvolvido um método otimizado para a extração de lipídios totais e não polares utilizando uma combinação de acetato de etila e metanol como solventes. Os resultados demonstraram que o rendimento máximo de extração de lipídios foi de 18,1%, alcançado após 120 minutos de extração, a uma temperatura de 60 °C e uma razão metanol/acetato de etila de 2:1. Os perfis de ácidos graxos dos lipídios foram identificados e os mais prevalentes foram: palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), oleico (C18:1), linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3), evidenciando a considerável capacidade de extração de lipídios de microalgas para a produção de biodiesel.

Rathnam (2020) abordou a síntese de ésteres etílicos de ácidos graxos a partir de microalgas secas, utilizando etanol supercrítico e acetato de etila. As condições variaram em termos de temperatura, pressão e proporção de microalgas para agente etilante. Resultados indicaram elevada conversão em ambos os sistemas, com taxas de reação mais rápidas para o etanol.

Shin et al. (2014) empregaram hexano comprimido a quente (HCH) para investigar a extração de lipídios da microalga *Scenedesmus sp.* próximo ao seu ponto crítico, comparando-o com a extração em condições ambientais utilizando o método de Bligh e Dyer para quantificação. Os resultados revelaram melhorias significativas no rendimento e na taxa de extração de lipídios com o método HCH em comparação com o uso de hexano em condições normais de temperatura e pressão. Além disso, alcançaram elevados rendimentos de frações lipídicas conversíveis em biodiesel no ponto crítico do hexano, em comparação com o padrão do método de Bligh e Dyer.

2.6 MICROALGA *Scenedesmus obliquus*

A *Scenedesmus* compreende a mais comum das algas verdes, com colônias planas de 2 a 4 células no geral. Apresentam-se nos formatos ovóides, elipsóides, fusiformes ou lunadas, podendo ser todas iguais ou as mais periféricas se diferenciarem das internas. São comuns em águas doces de rios e lagoas. Esta microalga tem como produto armazenado o amido, composto por amilopectina e amilose, e de maneira oposta às demais microalgas, é formado no cloroplasto. Seu teor lipídico alcança até 40% num cultivo laboratorial a depender do meio nutricional, seu tamanho varia

entre 3 e 31 μm segundo a espécie (HAKALIN, 2014; RAMIREZ, 2013; BAUMGARTNER, 2011). A sua produção de biodiesel pode alcançar 94% dependendo do processo de conversão do lipídio (LOMEU, 2023).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica foi realizada buscas de artigos científicos publicados no portal de periódicos CAPES, Google Academics e site Elsevier. Utilizou-se como palavras chaves para pesquisa nestes portais microalgas, "Scenedesmus obliquus" e biodiesel.

Também foi realizada pesquisa na base Scopus usando como palavras-chave: algae AND biodiesel AND "Scenedesmus obliquus", restringindo o período entre 2014 e 2023.

A pesquisa baseou-se, primeiramente, em identificar e analisar artigos que continham técnicas e aplicações para a produção de biodiesel a partir de microalgas. Assim, criou-se uma planilha contendo os resumos e autores de cada artigo pesquisado e, a partir daí, seguiu-se com a leitura dos artigos que apresentaram conteúdo adequado para elaboração do presente trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na busca por uma produção eficiente de biodiesel a partir de microalgas, é imperativo considerar uma variedade de fatores. A composição bioquímica das células de cada espécie de microalga não é apenas intrínseca, mas também é influenciada pelos fatores do processo como temperatura, pH, nutrientes e intensidade de luz. O rendimento de biodiesel, como resultado desse processo, emerge como o aspecto mais significativo relacionado ao óleo de microalgas. Portanto, desde o meio de cultivo até as etapas finais, é crucial selecionar um método que seja não apenas simples, mas também economicamente viável.

O controle adequado das condições de crescimento tem como objetivo criar ambientes estressantes que direcionam as vias metabólicas das microalgas para a produção de lipídios, melhorando assim o seu potencial como matéria-prima para a produção de biodiesel.

Em recentes investigações, como evidenciado no estudo de Trivedi (2022), foram empregadas duas fases distintas de cultivo. A primeira, voltada para o crescimento celular, rica em nitrogênio, enquanto a segunda fase envolveu a privação desse nutriente. Os resultados revelaram um aumento no teor de lipídios, passando de 33,1% (em peso seco) em condições de controle para 45,1% (em peso seco) nas condições ótimas identificadas. Isso ressalta a viabilidade e promissora aplicação de diferentes configurações em fotobiorreatores.

Feng et al. (2014) evidenciaram que a microalga verde *Scenedesmus obliquus* demonstrou capacidade de crescimento acelerado e síntese lipídica superior em comparação com outras seis cepas de microalgas. *S. obliquus* apresentou um desempenho robusto tanto em ambientes internos quanto externos, registrando uma taxa de crescimento (μ_{max}) mais elevada em ambientes internos. Os autores apontam ainda que as células atingiram peso seco de 4,36 g L⁻¹, teor lipídico de 49,6%, e produtividade de 183 mg L⁻¹ dia⁻¹ em culturas externas. Realizando cultivo ao longo de 61 dias em método semi-contínuo ao ar livre, foram alcançadas elevadas produtividades de biomassa (450-550 mg L⁻¹ dia⁻¹) e μ_{max} (1,05-1,44 dia⁻¹). As células também apresentaram notáveis produtividades lipídicas (151-193 mg L⁻¹ dia⁻¹).

Dessa forma, evidencia-se a versatilidade da microalga em questão para ser cultivada tanto em métodos de cultivo abertos quanto fechados, inclusive em um sistema semi-contínuo. Contudo, visando um controle mais preciso, a adoção de fotobiorreatores surge como uma alternativa viável para monitorar variáveis, como intensidade de luz, controle de pH, temperatura e nutrientes e avaliar os resultados obtidos durante o cultivo.

Como foi apresentado na revisão da literatura, a eficácia do processo de colheita está condicionada às características da alga, como tamanho, densidade e valor econômico do produto desejado, exigindo máxima separação com eficiente recuperação de água e baixo custo. Quanto aos métodos disponíveis, a filtração é mais adequada para células grandes, o que não se aplica à *Scenedesmus obliquus*, de tamanho reduzido. Tanto a floculação quanto a sedimentação apresentam desvantagens notórias, mas podem oferecer boa recuperação de água e se mostram economicamente viáveis. Estes processos podem ainda ser combinados de modo a maximizar ainda mais a eficiência. Quanto à centrifugação, destaca-se pela eficiência na recuperação da biomassa, sendo uma escolha equilibrada, pois elimina o uso de floclulantes químicos e acelera o processo.

O método de colheita pode interferir nas características finais do produto, por isso deve ser meticulosamente escolhido. No estudo de Oliveira (2020), foram exploradas diferentes metodologias de coleta e secagem de uma cultura de *Scenedesmus obliquus*. O autor constatou que o método de secagem pode impactar o conteúdo microalgal, com a liofilização ou a secagem em forno resultando em um enriquecimento no teor de ácidos graxos poli-insaturados. Assim, a secagem em forno, apesar de ocasionar a perda de proteínas, mostra-se interessante, especialmente quando o foco não está na produção de proteínas. Além disso, esse método não é dependente das condições climáticas, como na secagem ao sol, sendo mais rápido, de menor complexidade e com custo mais acessível.

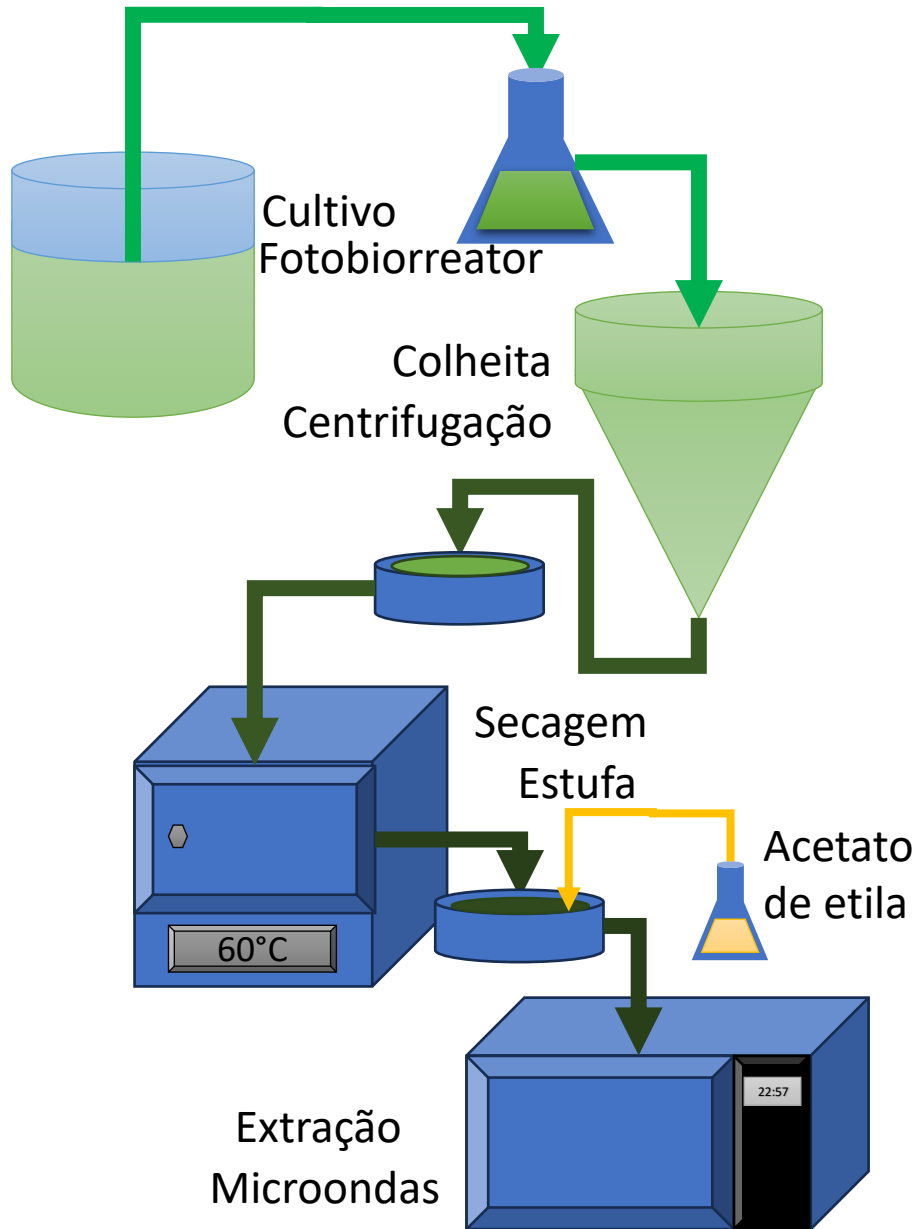
As técnicas mais comuns de extração de lipídios, como Bligh and Dyer e Folch, utilizam clorofórmio-metanol em proporções diversas. Apesar da eficácia dessas misturas para extrair lipídios de microalgas, persistem preocupações ambientais e de saúde quando aplicadas em escala industrial. Outros solventes menos tóxicos, embora menos eficientes, como diclorometano, etanol, hexano, n-hexano/isopropanol, entre outros, têm sido empregados por pesquisadores na extração de lipídios de microalgas. Vale ressaltar que a eficiência da extração varia conforme a espécie de microalga e a composição da mistura de solventes.

Quando se verifica os trabalhos analisados, o micro-ondas é um método interessante para ruptura da célula da microalga e que melhora a penetração dos solventes, proporcionando maior eficiência, diminuindo assim o uso destes solventes.

Uma opção promissora como solvente é o acetato de etila, por ser menos tóxico, mais econômico e potencialmente mais rápido para a extração. O desempenho da extração de óleo da microalga foi avaliado usando acetato de etila e comparado com misturas de solventes, como clorofórmio.

Dessa forma, foi delineado um caminho para a produção de biodiesel a partir de microalgas, como apresentado na Figura 4:

Figura 4: Fluxograma sugerido para produção de biodiesel de microalga em escala de bancada



Fonte: O autor, 2024.

A proposta de rota foi delineada com base nos artigos revisados, não sendo necessariamente uma escolha unânime em relação aos métodos. Portanto, é necessária sua aplicação para análise e experimentação. Sugere-se, assim, para futuros trabalhos, a exploração de variações em um ou mais métodos e a realização de experimentos para avaliar a aplicabilidade prática.

5 CONCLUSÃO

Na produção e extração de lipídios de biomassa de microalgas, incluindo a *Scenedesmus obliquus*, é crucial considerar cuidadosamente as etapas e as características do material utilizado, pois podem impactar a quantificação e obtenção desses lipídios, afetando o produto final. As técnicas de colheita e secagem variam conforme o tipo de microalga, influenciando diretamente o resultado final. Além disso, os procedimentos de extração geralmente demandam alta energia, têm baixa sustentabilidade ambiental e alto custo de processamento. A prevalência de solventes orgânicos na extração abre espaço para pesquisas em busca de substitutos mais sustentáveis, alinhando-se ao propósito ambientalmente amigável do biodiesel. Alternativas para a ruptura celular que reduzam o uso desses solventes também devem ser exploradas.

Foi possível esboçar uma rota potencial para a produção de óleos para fabricação de biodiesel a partir de microalgas. A revisão bibliográfica aprofundada gerou resultados que respaldam o fluxograma elaborado, oferecendo as características tanto de técnicas consolidadas quanto abordagens mais recentes que estão gradualmente sendo desenvolvidas e aplicadas.

Como continuidade deste trabalho, o processo aqui apresentado será validado no Laboratório de Desenvolvimento e Automação de Bioprocessos do Departamento de Engenharia Química da UFSCar pelo grupo de pesquisas que vem trabalhando com a produção de microalgas.

REFERÊNCIAS

- ANURADHA S.; et al. Open system for the autotrophic cultivation of *Scenedesmus obliquus* NCIM 5586: multiobjective optimization for the tradeoff between biomass and lipid. *Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 13, n. 3, p. 2113–2123, 19 jan. 2021.
- BARBERA, E.; SFORZA, E.; BERTUCCO, A. Maximizing the production of *Scenedesmus obliquus* in photobioreactors under different irradiation regimes: experiments and modeling. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 38, n. 11, p. 2177–2188, 20 ago. 2015.
- BARBOZA, J.C.S.; SERRA, A.A; **Ultra-som(I): influência do ultra-som na química**. *Química Nova*, 15, 302, 1992.
- BAUMGARTNER, T. R. DA S. **Cultivo e extração de óleo das microalgas *Scenedesmus sp.* E *Spirulina sp.* para a síntese de ésteres visando à produção de biodiesel**. Disponível em: <https://btdt.ibict.br/vufind/Record/UEM-10_7365616f3fe9bda00bad9e6856155a6e>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- BAUMGARDT, F. J. L. **Extração de óleo de microalgas com fluidos pressurizados e avaliação de sua conversão em monoésteres graxos**. Disponível em: <https://btdt.ibict.br/vufind/Record/UFPR_c61eebbfe6f2e472977b8ab7aa9a0669>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- BRANYIKOVA, I. et al. Harvesting of Microalgae by Flocculation. *Fermentation*, v. 4, n. 4, p. 93, 9 nov. 2018.
- BRENNAN, L., OWENDE, P. 2010. Biofuels from microalgae – A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14: 557-577
- CARNEIRO, G. A.; SILVA, J. J. R.; OLIVEIRA, G. A.; PIO, F. P. B. Uso de Microalgas para Produção de Biodiesel. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 5, p. 01-12, 2018.
- CARDOSO, A. da S.; VIEIRA, G. E. G.; MARQUES, A. K. O uso de microalgas para a obtenção de biocombustíveis. **Revista Brasileira de Biociências, [S. l.]**, v. 9, n. 4, p. 542, 2011. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/115473>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- CHUTIA, S.; KAKOTY, N. M.; DEKA, D. A Review on the Harvesting Techniques of Algae for Algal Based Biofuel Production. **Journal of Energy Research and Environmental Technology (JERET)**. Volume 4, Issue 1; p. 58-62, January-March, 2017
- DEBOWSKI, M. et al. Microalgae Cultivation Technologies as an Opportunity for Bioenergetic System Development—Advantages and Limitations. *Sustainability*, v. 12, n. 23, p. 9980, 29 nov. 2020.

ELOKA-EBOKA, A. C.; INAMBAO, F. L. Performance and Emission Profile of Micro-Algal Biodiesel in Compression Ignition Engine. **International Journal of Engineering Research in Africa**, v. 30, p. 110–124, maio 2017.

FENG, P. et al. Growth and lipid accumulation characteristics of *Scenedesmus obliquus* in semi-continuous cultivation outdoors for biodiesel feedstock production. **Bioresource Technology**, v. 173, p. 406–414, dez. 2014.

FERREIRA, Isabela Nascimento Tavares. Otimização da extração de lipídios da microalga *Scenedesmus obliquus* com acetato de etila. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2021.

FERREIRA, Millena Patrício do Nascimento. Extração e caracterização de extratos lipídicos obtidos da biomassa de *Tetradismus (Scenedesmus) obliquus* com propriedades antimicrobianas. 2021. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Ciências Biológicas) - Departamento de Biologia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

FRANCO, A. L. C.; LOBO, I.P.; CRUZ R. S. da; TEIXEIRA, C. M. L. L.; ALMEIDA NETO, J. A. de; MENEZES, R. S., Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, 2013; 36(3): 437-48. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300015> . Acesso em 15/12/2023.

GARCÍA, D.; et al. "Towards the production of microalgae biofuels: the effect of the culture medium on lipid deposition." *BioTechnology*, vol. 100, no. 3, pp. 273-278, 2019.

GUEDES, V.C., LOMBARDI, A.T., HORTA, A.C.L. Polychromatic controller of photosynthetically active radiation applied to microalgae. *Braz. J. Chem. Eng.* 40, 1089–1101 (2023). <https://doi.org/10.1007/s43153-022-00298-4>.

GUEDES, V.C., PALMA, G.M., HORTA, A.C.L. An evaluation of light wavelengths, intensity and control for the production of microalgae in photobioreactors. *Braz. J. Chem. Eng.* <https://doi.org/10.1007/s43153-023-00388-x>. 2023.

GRIMA, E.M., BELARBI, E.–H., FERNÁNDEZ, F.G A., MEDINA, A. R. & CHIST, Y. 2003. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20 : 491-515.

HUANG, G.; CHEN, F.; WEI, D.; ZHANG, X.; CHEN, G. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**. v. 87, p. 38–46; 2010.

HAKALIN, N. L. S. **Otimização das condições de cultivo da microalga *Scenedesmus sp.* para a produção de biodiesel**. Disponível em: <https://btdt.ibict.br/vu-find/Record/UNB_26079d644e069cc508967575c2cc5a87>. Acesso em: 10 nov. 2023.

JARENKOW, A. **Estudo da produção e extração de lipídios na microalga *Chlorella sp.*** Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_aa554d0843ebd7b3874df177fe0190e7>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KALSUM, U.; KUSUMA, H. S.; ROESYADI A.; MAHFUD, M. Lipid extraction from spirulina platensis using microwave for biodiesel production. **Korean Chemical Engineering Research**, v. 57, n. 2, p. 301–304, 2019.

KEYES, D. Aleph. 1. ed. São Paulo, 2018

KUMAR, L.; RAKSHA A.; SHAH, M. P.; BHARADVAJA, N. Microalgae biodiesel: A sustainable source of energy, unit operations, technological challenges, and solutions. **Journal of Hazardous Materials Advances**, p. 100145, ago. 2022.

LOMEU, A. A.; MENDONÇA, H. V. DE; MENDES, M. F. Microalgae as raw material for biodiesel production: perspectives and challenges of the third Generation chain. **Engenharia Agrícola**, v. 43, p. e20220087, 29 maio 2023.

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

MOLINA G. et al.; Downstream processing of cellmass and products. In: RICHMOND, A.; **Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology**. Oxford: Blackwell Science, p.215-251, 2004.

MUSTAPHA, S. I.; ISA, Y. M. Utilization of quaternary solvent mixtures for extraction of lipids from *Scenedesmus obliquus* microalgae. *Cogent Engineering*, v. 7, n. 1, 1 jan. 2020.

RAMIREZ, N. N. V. **Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus Sp.* em vinhaça**. Disponível em: <https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_fdbe3b2f3569b5f68da59d84a4a9cfce>. Acesso em: 24 nov. 2023.

OLIVEIRA, C.J. DE et al. PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DAS ALGAS: UMA REVISÃO. *Journal Of Agronomic Sciences*, Umuarama, v. 3, p.202-221, 2014.

OLIVEIRA, C. Y. B. DE et al. A comparison of harvesting and drying methodologies on fatty acids composition of the green microalga *Scenedesmus obliquus*. *Biomass and Bioenergy*, v. 132, p. 105437, jan. 2020.

RATHNAM, V. M.; MODAK, J. M.; MADRAS, G. Non-catalytic transesterification of dry microalgae to fatty acid ethyl esters using supercritical ethanol and ethyl acetate. *Fuel*, v. 275, p. 117998, set. 2020.

RICHMOND, A. *Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology*. Blackwell Science, 2004.

SHIN, H.Y.; RYU, J. H.; BAE, S. Y.; CROFCHECK, C.; CROCKER M. Lipid extraction from *Scenedesmus sp.* microalgae for biodiesel production using hot compressed hexane. *Fuel*, [s. l.], v. 130, n. April, p. 66–69, 2014

SILVA, Giselle de Souza. Extração do óleo de microalgas para produção de biodiesel. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2013.

SILVA, R. M. D; BACHOLSKY, R. G.; JERÔNIMO, C. E. de M. Produção de Biodiesel por Algas: Integração com Processos de Carcinicultura. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Santa Maria, v. 19, n. 3, p.713-724, 2015.

TRIVEDI, J. et al. Enhanced lipid production in *Scenedesmus obliquus* via nitrogen starvation in a two-stage cultivation process and evaluation for biodiesel production. *Fuel*, v. 316, p. 123418, maio 2022.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. Superintendência de Parcerias e Inovação. **Fotobiorreator Tubular para Tratamento Integrado de Efluentes Líquidos e Emissões**. Curitiba, 2021. Disponível em: <https://spin.ufpr.br/portfolio/propriedade-intelectual/patentes/br1020130263958/>
Acesso em: 05/01/2024.

VIÊGAS, C. V. Extração e caracterização dos lipídios da microalga *Chlorella pyrenoidosa* visando a produção de ésteres graxos. Dissertação de Mestrado em Química Tecnológica e Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande - RS, 2010.

WANG, S. et al. Microalgae harvest influences the energy recovery: A case study on chemical flocculation of *Scenedesmus obliquus* for biodiesel and crude bio-oil production. *Bioresource Technology*, v. 286, p. 121371, ago. 2019.

WU, J. et al. Enhanced extraction of lipids from microalgae with eco-friendly mixture of methanol and ethyl acetate for biodiesel production. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 71, p. 323–329, 1 fev. 2017.

YIN, Z.; ZHU, L.; LI, S.; HU, T.; CHU, R.; MO, F.; HU, D.; LIU, C.; LI, B. A comprehensive review on cultivation and harvesting of microalgae for biodiesel production: Environmental pollution control and future directions. *Bioresource Technology*, [s. l.], v. 301, n. January, p. 122804, 2020a.

ZHANG, C. et al. Strategic enhancement of algal biomass, nutrient uptake and lipid through statistical optimization of nutrient supplementation in coupling *Scenedesmus obliquus*-like microalgae cultivation and municipal wastewater treatment. v. 171, p. 71–79, 1 nov. 2014.

ZHOU, X. et al. Optimization of microwave assisted lipid extraction from microalga *Scenedesmus obliquus* grown on municipal wastewater. *Journal of Cleaner Production*, v. 221, p. 502–508, jun. 2019.

ZORN, S. M. F. E.; GONÇALVES, B. C. M.; CANILHA, L.; GUIMARÃES, D. H. P.; SILVA, M. B. Extração de óleo microalgal por solventes orgânicos: uma alternativa para a produção de biodiesel. Artigo. São Paulo, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/311698161_Extracao_de_oleo_microalgal_por_solventes_organicos_uma_alternativa_para_a_producao_de_biodiesel/stats . Acesso em 18/10/2023.