



Revisão sistemática sobre o emprego e cultivo da microalga *Scenedesmus* sp. na produção de biodiesel

Witter Duarte Guerra¹; Flávia Costa Oliveira²; Jaqueline Elise Garcia Chiesa³; Karolinne Gomes Albuquerque⁴; Alexandre de Matos Martins⁵; Lucas Matheus da Rocha⁶; Antônio Carlos Ferreira Batista⁷

Como Citar:

GUERRA; Witter Duarte, OLIVEIRA; Flávia Costa, CHIESA; Jaqueline Elise Garcia, ALBUQUERQUE; Karolinne Gomes, MARTINS; Alexandre de Matos, DA ROCHA; Lucas Matheus, BATISTA; Antônio Carlos Ferreira. Revisão sistemática sobre o emprego e cultivo da microalga *Scenedesmus* sp. na produção de biodiesel. Revista Sociedade Científica, vol.7, n.1, p.942-979, 2024. <https://doi.org/10.61411/rsc202426717>

DOI: [10.61411/rsc202426717](https://doi.org/10.61411/rsc202426717)

Área do conhecimento: Biotecnologia

Sub-área: Biocombustíveis

Palavras-chaves: Microalgas; Biodiesel; *Scenedesmus* sp.; Cultivo.

Publicado: 20 de fevereiro de 2024

Resumo

Espécies de microalgas, como a *Scenedesmus* sp., possuem um elevado potencial de acumulação lipídica em suas células, tornando-as alvo de estudos para explorar esses organismos como matéria-prima na produção de biodiesel. Inúmeras microalgas apresentam-se como matérias-primas para essa produção, devido à sua notável taxa de crescimento, elevados rendimentos de lipídios e à sua versatilidade para prosperar em diversos ambientes. Dentre as variáveis que podem influenciar no cultivo, os fatores biológicos, físicos e químicos desempenham papel crucial no armazenamento metabólico das reservas nutricionais da microalga. Ao desenvolver um meio de cultura otimizado para a produção de bio-óleo extraído de microalgas, é essencial investigar metodologias que aprimorem os sistemas de cultivo e colheita de biomassa.

¹Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, Brasil. ✉

²Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, Brasil. ✉

³Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, Brasil. ✉

⁴Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara, Itumbiara, Brasil. ✉

⁵Universidade Federal dos Vales de Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Brasil. ✉

⁶Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, Brasil. ✉

⁷Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba, Brasil. ✉



Systematic review on the use of microalgae *Scenedesmus* sp. In biodiesel production

Abstract

Species of microalgae, such as *Scenedesmus* sp., have a high potential for lipid accumulation in their cells, making them the target of studies to explore these organisms as raw material in the production of biodiesel. Numerous microalgae are presented as raw materials for this production, due to their remarkable growth rate, high lipid yields and their versatility to thrive in different environments. Among the variables that can influence cultivation, biological, physical and chemical factors play a crucial role in the metabolic storage of microalgae's nutritional reserves. When developing an optimized culture medium for the production of bio-oil extracted from microalgae, it is essential to investigate methodologies that improve biomass cultivation and harvesting systems.

Keywords: Microalgae; Biodiesel; *Scenedesmus* sp.; Cultivation

1. Introdução

A persistente dependência dos combustíveis fósseis como a principal fonte de energia em várias atividades humanas representa um dos maiores desafios enfrentados pela humanidade. Dada a natureza dos recursos limitados, a inevitável escassez dos combustíveis fósseis impulsiona a busca por fontes alternativas de energia que causem um impacto ambiental reduzido. [1]

Dessa forma, emerge o biocombustível, frequentemente descrito como uma forma de combustível derivada de materiais biológicos. Isso inclui matéria orgânica não fossilizada, bem como produtos metabólicos de organismos vivos, como, por exemplo, o uso de óleo vegetal na produção de biodiesel. [2]

Assim, os biocombustíveis derivados de algas (ou microalgas) emergem como uma nova alternativa, conquistando espaço no mercado devido a benefícios como



sustentabilidade, facilidade de reprodução e propriedades favoráveis ao cultivo. Por meio da biotecnologia, a implementação de produção e metodologias eficazes contribuirá para que os biocombustíveis demonstrem sua maturidade como fonte sustentável. Nesse contexto, a cultura de algas está intrinsecamente vinculada à eficiência na conversão da luz solar em biomassa e lipídeos. [3]

É relevante destacar também a importância de enfatizar as vantagens ambientais, uma vez que o cultivo desses organismos não requer competição por terras agrícolas. Além disso, as microalgas apresentam uma notável capacidade de capturar CO₂, minimizando os impactos do efeito estufa na atmosfera. Adicionalmente, elas revelam um potencial significativo, uma vez que não são propensas a causar problemas como desmatamento, erosão do solo e poluição da água, quando comparadas a outras fontes de matéria-prima para a produção de biocombustíveis. [4]

A fundamentação principal deste estudo reside na urgência de substituir os combustíveis fósseis, que são recursos limitados, por alternativas renováveis. A perspectiva de gerar novos combustíveis, como o biodiesel, pode se concretizar no futuro por meio da utilização de microalgas. Onde essas microalgas têm o potencial de apresentar elevada concentração lipídica, o que pode ser aproveitado na produção de biocombustíveis.

O propósito deste artigo é conduzir uma extensa revisão bibliográfica que englobe as informações mais significativas sobre a produção de biodiesel a partir da microalga *Scenedesmus* sp., incluindo suas principais características de cultivo, bem como os estudos relevantes sobre o tema. Com a compilação desses fundamentos, busca-se contribuir de maneira significativa para a disseminação do conhecimento científico.

2. Metodologia



O objetivo deste estudo é conduzir uma revisão bibliográfica sistemática, envolvendo uma pesquisa minuciosa e detalhada da literatura existente sobre a utilização das microalgas na produção de biocombustíveis. O escopo abrange suas aplicações, técnicas de cultivo e diversos usos associados.

A investigação foi conduzida em bases de dados científicas pertinentes, incluindo PubMed, Scopus, Web of Science, ResearchGate e Cochrane Library. Foram utilizados termos de busca específicos e filtros pré-estabelecidos para a seleção dos artigos mais relevantes. Os temas abordados incluíram o histórico, a contextualização, as condições atuais e as aplicações relacionadas ao estudo.

Foram considerados estudos científicos originais, revisões sistemáticas, meta-análises e diversas outras publicações que exploram a utilização das microalgas na produção de biodiesel e biocombustíveis em geral. As temáticas abordadas incluíram combustíveis fósseis, biocombustíveis, cultivo de microalgas, biotecnologia de microalgas, entre outros tópicos relacionados.

A escolha dos artigos foi baseada em critérios como relevância, data de publicação e alinhamento com o tema da pesquisa. Adicionalmente, foi realizada uma verificação da veracidade das informações encontradas.

3. Combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis são provenientes de recursos minerais e classificados como não renováveis, uma vez que exigem anos para sua formação. Nesse contexto, diversos pesquisadores se dedicam à busca por alternativas visando substituir os combustíveis fósseis por outras fontes de energia. [5]

Tecnicamente, os biocombustíveis são definidos de acordo com a Lei Federal nº 9.478, de 06 de agosto de 1997, como “(...) todo combustível derivado de biomassa renovável, tal como biodiesel e etanol, para uso em motores de combustão interna; ou, conforme regulamento da Agência Nacional de Petróleo, Biocombustíveis e Gás



Natural (ANP), para outro tipo de geração de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil”. [6]

Segundo algumas projeções, as reservas de petróleo se esgotarão em um futuro muito próximo. Isso se deve ao fato de que, desde o final do século passado, o petróleo tem desempenhado um papel central como fonte primária de energia global. Contudo, o esgotamento das reservas e as crescentes preocupações com os impactos ambientais resultantes da queima de combustíveis fósseis têm ressaltado a urgência na busca por fontes de energia limpas e renováveis. [6], [7]

Atualmente, a demanda global por energia é significativa, sendo a maior parte proveniente de petróleo, carvão e gás natural. No entanto, essas fontes são limitadas e prevê-se que se esgotem em um futuro próximo. Diante dessa perspectiva, torna-se imperativo explorar fontes alternativas de energia, com o biodiesel emergindo como uma promissora opção para atender a essa demanda mundial por energia renovável. [8] Outros pesquisadores destacam que, com o rápido crescimento populacional e industrial, a demanda por energia está projetada para aumentar de maneira constante, atingindo 50% ou mais até 2030. [9]

O esgotamento de recursos como petróleo e carvão tem motivado investigações em busca de combustíveis provenientes de fontes renováveis. Um exemplo notável é o biodiesel, um combustível não derivado de fósseis que tem a capacidade de substituir integral ou parcialmente o diesel de petróleo em motores de ciclo diesel, sem exigir adaptações. [10]

O consumo mundial total de energia deverá aumentar até 49% em 2035. Este cenário mostra que é necessário a busca e diversificação da matriz energética do mundo por meio e uso de fontes renováveis de geração de energia limpa, através de processos que possam ter um desenvolvimento econômico e sustentável. [11]

Atender à demanda global por energia representa um desafio significativo para a sociedade contemporânea. O constante aumento no preço do barril de petróleo e as



preocupações ambientais relacionadas à queima de combustíveis fósseis têm intensificado a necessidade de buscar novas fontes energéticas. [12] Como resposta a essa urgência, observam-se vigorosas iniciativas de pesquisa direcionadas ao desenvolvimento de biocombustíveis alternativos renováveis, que apresentam potencial para serem recursos energéticos alternativos sólidos, líquidos e gasosos, de forma potencialmente neutra [13].

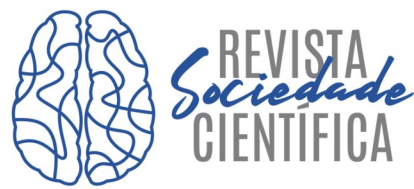
4. Biocombustíveis

Os biocombustíveis emergem como uma solução promissora para os desafios relacionados à potencial deficiência energética global no futuro, uma vez que sua produção é baseada em biomassa. Portanto, são considerados uma alternativa viável, contribuindo positivamente para a mitigação de questões ambientais e energéticas. Além disso, constituem uma opção favorável ao evitar a redução das emissões de poluentes, dado que são provenientes de fontes renováveis. [14]

Biocombustíveis são derivados de materiais orgânicos e destinados a motores de explosão. Esses combustíveis têm experimentado uma crescente aceitação tanto no Brasil quanto globalmente, uma vez que álcoois e ésteres podem servir como substitutos diretos dos combustíveis fósseis, sendo passíveis de produção em larga escala. Os biocombustíveis mais comuns utilizados em escala mundial incluem o etanol proveniente da cana-de-açúcar, milho e beterraba, além do biodiesel obtido a partir de óleos vegetais. [14]

A crescente preocupação com as questões ambientais reflete a constatação de que os processos produtivos atuais estão exaurindo incessantemente os recursos naturais. Essa inquietação é motivada pelo impacto prejudicial ao meio ambiente e pela consequente escassez desses recursos. [7]

Especialistas afirmam que os biocombustíveis representam uma excelente alternativa para substituir os combustíveis convencionais. Esses biocombustíveis podem



ser classificados em três gerações distintas, cada uma dependendo da tecnologia empregada em sua produção. A primeira geração (1G) é caracterizada pela produção a partir de culturas como milho, cana-de-açúcar e soja. A segunda geração (2G) utiliza matérias-primas lignocelulósicas ou resíduos de petróleo e óleo de cozinha residual. Por sua vez, a terceira geração (3G) é representada por biocombustíveis que não dependem de solo e envolvem a utilização de microrganismos fotossintetizantes, como as microalgas. [15], [16]

Atualmente, diversas culturas são empregadas na produção de biocombustíveis, incluindo soja, mamona, milho, girassol, entre outras (conforme apresentado na Tabela 1). Entretanto, devido ao crescente aumento na demanda por insumos destinados à produção de biocombustíveis e à competição com a produção de alimentos (para consumo humano ou animal), os preços tendem a aumentar. Isso destaca a atual busca por fontes renováveis não alimentares para a produção de combustíveis renováveis. [17]

Tabela 1: Biocombustíveis e as principais fontes de matérias-primas.

Biocombustível	Matéria-prima	Redução na emissão de gases de efeito estufa	Custo de produção	Produção de biocombustível por hectare	Terras utilizadas
Bioetanol	Grãos (trigo, milho)	Moderado a baixo	Moderado	Moderado	Terras férteis
Bioetanol	Cana-de-açúcar	Alto	Baixo	Alto	Terras férteis
Biodiesel	Óleos de sementes (canola, soja, etc.)	Moderado	Moderado	Baixo	Terras férteis
Biodiesel	Óleo de palma	Moderado	Moderado a baixo	Moderado	Terras litorâneas e úmidas

Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008).

Desde então, têm sido dedicados consideráveis recursos e esforços a estudos visando o desenvolvimento de técnicas que visem a redução das emissões de gases do efeito estufa. Uma das alternativas exploradas pelos pesquisadores envolve a obtenção



de energia a partir de plantas ou organismos capazes de fixar o CO₂, resultando na produção de produtos com valor agregado próprio. Um exemplo desses produtos é o bio-óleo, que, por meio de um processo bioquímico, pode ser convertido em biodiesel. [18]

4.1 Biodiesel

O biodiesel é gerado a partir de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais, destinado ao uso em motores de ignição por compressão, também conhecidos como motores diesel. [8]

O biodiesel é definido como um combustível renovável, biodegradável e ecologicamente correto. Sua composição consiste em uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos de ácidos graxos, obtidos por meio da transesterificação de triglicerídeos com álcoois de cadeia curta, como metanol ou etanol. Os óleos utilizados para sua produção podem ser de origem animal, incluindo gorduras animais, resíduos industriais e domésticos, ou de fontes vegetais, como os óleos de soja, girassol, amendoim, colza, canola, algodão, entre outros.[19]

Atualmente, a aplicação de biomassa na produção de energia por meio do biodiesel já está em vigor, destacando-se por suas vantagens em relação ao diesel de petróleo. O biodiesel, derivado de fontes renováveis, oferece benefícios significativos, pois é não tóxico e possui uma menor taxa de emissão durante o processo de combustão. Apesar de apresentar aproximadamente 10% menos energia do que o diesel de petróleo, o biodiesel mantém um desempenho praticamente equivalente no motor em termos de potência e torque. [20]

No contexto da produção agrônômica brasileira, algumas culturas-chave incluem soja, algodão, palma, mamona, amendoim e milho, sendo este último destinado integralmente à alimentação. As demais oleaginosas mencionadas têm sido consideradas elegíveis para a produção de biodiesel. [19]



Atualmente, a soja é a principal matéria-prima para a produção de biodiesel, mas sua produtividade de óleo é relativamente baixa, em torno de 20%. Isso sugere que, no futuro, seria prudente considerar a substituição dessa matéria-prima por outra mais viável, que proporcione retornos financeiros e químicos mais expressivos. Pesquisas realizadas no Brasil indicam que o óleo de dendê e o óleo de palma apresentam rendimentos consideravelmente superiores em termos de produção de óleo em comparação com a soja. Contudo, o obstáculo atual reside na falta de conhecimento agrônomo sobre essas espécies, bem como no longo período necessário para sua produção. [19]

É importante destacar que, atualmente, o custo de produção do biodiesel a partir de óleos vegetais supera o preço do diesel mineral ou fóssil no mercado. Isso se deve à explosão nos preços dos óleos vegetais. Consequentemente, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Observa-se que, mesmo com uma matéria-prima como a soja no Brasil, a produção em escala industrial de biodiesel ainda não é viável. [6]

A utilização do biodiesel como fonte de energia apresenta diversos benefícios, destacando-se especialmente a ausência de emissões de poluentes como enxofre e gases sulfídricos. Essa característica contribui significativamente para a redução dos problemas respiratórios e cancerígenos frequentemente associados à queima de combustíveis fósseis. [8], [21].

A preocupação com a poluição proveniente dos combustíveis tem sido uma questão de grande relevância ao longo de muitos anos. Com o contínuo aumento no consumo desses combustíveis, a elevação dos níveis de gases poluentes na atmosfera torna-se cada vez mais alarmante. Diante desse cenário, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) estabeleceu, a partir de 2005, a implementação de uma mistura de 2% de biodiesel no diesel.



O biodiesel é categorizado em três gerações. A primeira geração engloba plantas cultivadas na agricultura, a segunda geração compreende materiais lignocelulósicos, e na terceira geração, destacam-se espécies não comestíveis, como ilustrado na Figura 1. [22]

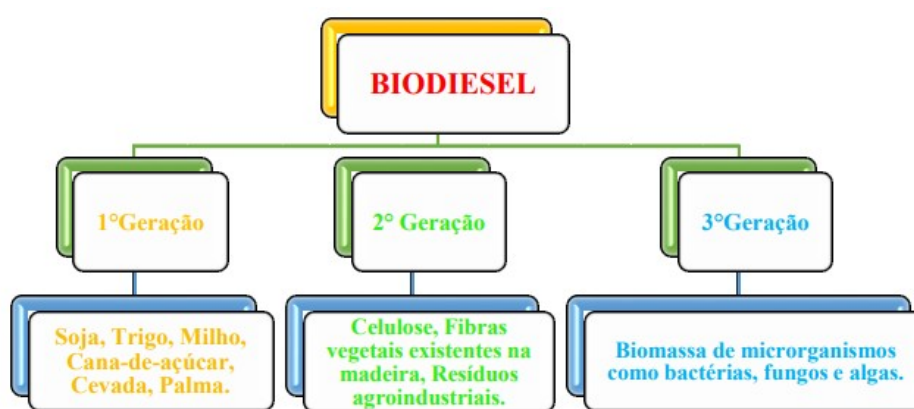


Figura 1 - Classificação do Biodiesel. Adaptado de Pena et al., (2017).

Os combustíveis utilizados em motores diesel têm a possibilidade de ser parcial ou totalmente substituídos por biocombustíveis. A designação B2, B5 e B10 refere-se ao diesel contendo 2%, 5% e 10% de biodiesel, respectivamente, enquanto o biodiesel puro é identificado como B100. O PNPB deu origem à lei 11097/2005, que estipula a inclusão do biodiesel na matriz energética brasileira. Além disso, o programa atribuiu à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) as responsabilidades de licenciamento e fiscalização. Inicialmente autorizativa em janeiro de 2005, a medida tornou-se obrigatória a partir de 2006. [23]

Atualmente, o custo do biodiesel é consideravelmente mais elevado em comparação ao diesel fóssil, indicando a necessidade de aprimoramento nas metodologias de produção, bem como de matérias-primas mais acessíveis e de alta produtividade. O valor do biodiesel é determinado por meio de leilões específicos,



realizados diversas vezes ao longo do ano. Esses leilões, baseados em lances e ofertas, estabelecem os valores e estratégias de aquisição para o biodiesel.

As empresas participam desses leilões para adquirir a quantidade ideal e legalmente estabelecida de biodiesel. Posteriormente, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), conforme indicado em 2018, encarrega-se de fiscalizar as empresas credenciadas para a compra de biodiesel, garantindo o cumprimento das regulamentações estabelecidas. [6]

5. **Microalgas**

As microalgas são organismos microscópicos, com dimensões que variam de 5 a 50 μm . São seres fotossintetizantes que utilizam a luz e compostos inorgânicos, como fosfato e nitrogênio, juntamente com o CO_2 , para a síntese de metabolitos de interesse. [24]

As algas apresentam características específicas, como a ausência de diferenciação em caule, folhas e raízes, sendo, portanto, talófitas. Além disso, geralmente não possuem órgãos reprodutores, exceto em casos de multicelularidade. Quanto ao habitat, podem ser encontradas em ambientes de água doce, salgada ou até mesmo no solo, muitas vezes associadas a fungos. São organismos fotossintetizantes que, em sua maioria, possuem o pigmento clorofila A. [25]

As algas são um conjunto extremamente diversificado de organismos, sejam eles simples, unicelulares ou pluricelulares, autotróficos e fotossintetizantes, que se manifestam em uma ampla variedade de habitats, com predomínio em ambientes de água doce ou salgada. Estas são reconhecidas como algumas das formas de vida mais antigas do planeta, sendo microrganismos fotossintetizantes com capacidade de crescimento rápido em diversas condições ambientais, atributo esse relacionado à sua estrutura celular simples. [26], [14]



Entretanto, outros autores afirmam que, as microalgas também podem ser definidas por características como a ocupação de habitats em solos e a variação fisiológica entre formas procarióticas e eucarióticas, incluindo variações em tamanho e forma. Ainda pode-se afirmar que as microalgas são predominantemente constituídas por proteínas, carboidratos, vitaminas e lipídeos. [27], [28]

Dentro do grupo de organismos fotossintetizantes presentes atualmente no meio ambiente, as algas se destacam por apresentarem características como um rápido crescimento celular. Estas têm a capacidade de absorver aproximadamente duas toneladas de CO₂ para gerar até uma tonelada de biomassa. [29]

A composição da biomassa das microalgas varia entre 7% e 23% de carboidratos, 5% e 23% de lipídeos, e 6% a 52% de proteínas. A modificação desses valores pode ocorrer devido à espécie analisada e às condições de cultivo, incluindo a privação de nutrientes. [30]

As algas, incluindo as microalgas, são categorizadas no domínio Procariota e subdividem-se em Glaucophyta, Rhodophyta, Chlorophyta, Charophyta, Ochrophyta, Dinophyta/Pyrrophyta, Cercozoa, Cryptophyta, Haptophyta e Euglenozoa. Existem mais de 50 classes distintas e mais de 4 milhões de espécies conhecidas atualmente. [25]

As microalgas fazem parte de um grupo notavelmente diversificado, apresentando características que as tornam propícias para a produção de diversos produtos em seu próprio metabolismo, como o bio-óleo. Entretanto, é crucial ressaltar que a considerável variação fisiológica e morfológica entre as diferentes espécies de microalgas terá impactos diretos nas aplicações específicas de cada uma delas. [31]

5.1 Classificação das microalgas

No presente, as algas são categorizadas em três grupos principais: microalgas, cianobactérias e macroalgas e seis classes. Contudo, a falta de um sistema de classificação totalmente claro persiste, pois a taxonomia está sujeita a revisões



constantes em todos os níveis, à medida que novas evidências genéticas e estruturais surgem. [32], [33]

As algas são objeto de estudo classificadas em seis classes, incluindo os grupos das Euglenófitas, Bacilariófitas (Diatomáceas), Dinoflageladas, Algas pardas ou feofíceas, Algas verdes ou clorofíceas e Algas vermelhas ou rodofíceas. [34]

Ao longo dos anos, diversos biólogos têm se dedicado à categorização das microalgas em uma ampla variedade de classes, baseando-se em critérios como pigmentação, ciclo de vida, reprodução, presença de tecidos verdadeiros e estrutura celular básica. Dentro dos três grupos mencionados, as microalgas destacam-se como o grupo mais amplamente estudado no contexto da produção de biocombustíveis. [33]

5.2 Os sistemas de cultivos de microalgas (Aberto/ fechado)

Os sistemas de cultivo de microalgas podem ser implementados em lagoas abertas (Figura 2 –A/B) ou em fotobiorreatores fechados (Figura 3), sendo a viabilidade de cada sistema condicionada à escolha da espécie a ser cultivada. As microalgas são comumente cultivadas em fotobiorreatores ou reatores, que são estruturas fechadas, proporcionando um ambiente mais protegido contra contaminações em comparação com as lagoas abertas. Esse método pode resultar em um rendimento mais elevado por área e volume, além de permitir cultivos com um maior grau de pureza. [35]

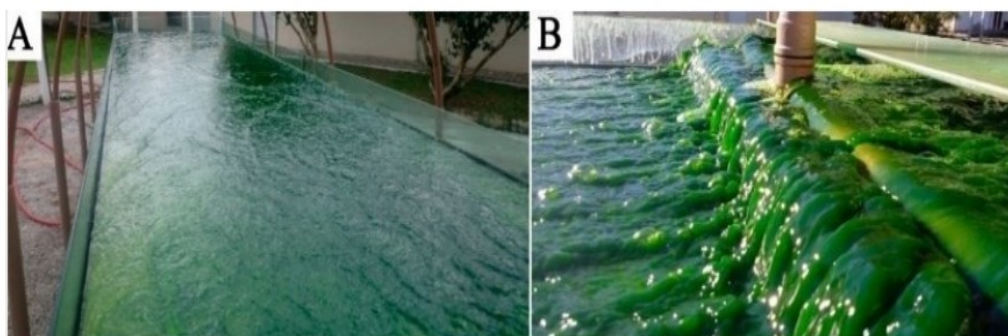


Figura 2 - Sistema laminar de cultivo: superfície de cultivo, (A) represa (B) reservatório (VENÂNCIO, 2016).

Um desafio significativo enfrentado pelos pesquisadores que empregam sistemas de cultivo fechados é garantir a exposição uniforme de todas as células à iluminação artificial. Portanto, torna-se necessário movimentar o meio de cultivo de forma a assegurar a iluminação homogênea de todas as células, como mostra a Figura 3. [36]



Figura 3 - Frascos com 5L de cultura de *Scenedesmus obliquus* (VENÂNCIO, 2016).

Dentre as vantagens, destacam-se o controle efetivo das atividades, uma adequada transmissão de luz e uma baixa taxa de contaminação. Por outro lado, as desvantagens associadas a esse tipo de cultivo incluem o acúmulo de biomassa nas paredes, o custo ainda elevado do sistema e a necessidade de equipamentos sofisticados. [14]

Segundo algumas pessoas, foram desenvolvidos diversos tipos de Fotobiorreatores (FBR) para o cultivo de microalgas, os quais podem ser categorizados como painel, tubulares, montados na vertical ou horizontal, confeccionados em materiais transparentes como vidro, acrílico ou plástico. Cada tipo apresenta vantagens e limitações específicas, variando de acordo com a espécie cultivada (Figura 4). [37]

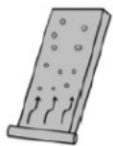
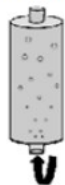
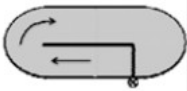
Fotobiorreatores Planos 	Relativamente econômicos Limpeza fácil Grande parte da superfície recebe iluminação Adequada para culturas ao ar livre Baixo consumo de energia Boa produtividade em biomassa Baixo acúmulo de oxigênio	Difícil de executar em larga escala Difícil controle de temperatura Algum grau de crescimento na parede Estresse hidrodinâmico para algumas espécies Baixa eficiência fotossintética
Fotobiorreatores de Coluna 	Baixo consumo de energia Alta transferência de massa Boa homogeneização Melhor exposição aos ciclos dia-noite Baixo nível de tensão de cisalhamento Fácil de esterilizar Fotoinibição reduzida Fotoxidação reduzida	Pequena área da superfície recebe iluminação Materiais de construção sofisticados Tensão de cisalhamento Diminuição da área de superfície iluminada em larga escala Custo alto comparado aos sistemas abertos Custos de manutenção Baixo potencial para produção em escala
Sistemas de Cultura	Vantagens	Limitações
Sistemas Abertos 	Relativamente econômicos Limpeza fácil Fácil manutenção Não utiliza terras agriculturáveis Necessita de pouca energia	Pouco controle das condições da cultura Pouca luz, homogeneização e utilização de CO ₂ Dificuldade de cultivar por longo período Pouca produtividade Limitados à algumas espécies Facilidade na contaminação
Fotobiorreatores Tubulares 	Relativamente econômicos Grande parte da superfície recebe iluminação Adequada para culturas ao ar livre Boa produtividade em biomassa	Gradientes de pH, oxigênio dissolvido e CO ₂ ao longo dos tubos Incrustação Algum grau de crescimento na parede Requer áreas de terra grandes Fotoinibição

Figura 4 - Vantagens e limitações dos sistemas de cultivo de algas. OLIVEIRA, 2019.

5.3 Fatores de crescimento de microalgas

Diversos fatores exercem influência no crescimento das microalgas, incluindo temperatura, luz, aeração, pH e nutrientes. A temperatura ideal para a fotossíntese aumenta proporcionalmente à intensidade luminosa. Quando esses fatores estão em



condições satisfatórias, as microalgas podem atingir sua máxima atividade metabólica e produção. [28]

5.3.1 **Luz**

Um dos elementos determinantes para o desenvolvimento das microalgas é a luminosidade, especialmente no que se refere ao comprimento de onda e à sua duração. Em cultivos laboratoriais, a intensidade luminosa é cuidadosamente regulada, sendo as lâmpadas fluorescentes do tipo "luz do dia" as mais recomendadas devido ao seu comprimento de onda situar-se entre 350 e 700 nm. [28]

A quantidade de energia luminosa disponível em cultivos laboratoriais de microalgas pode constituir um fator limitante para a produção de biomassa e o crescimento celular. Isso se deve ao fato de que uma elevada incidência luminosa pode resultar em fotoinibição, diminuindo o crescimento celular devido à exposição excessiva à luz, o que, por sua vez, reduz a taxa fotossintética. [38]. O sistema de iluminação em ambientes controlados costuma adotar um ciclo de 12 horas de luz seguidas por 12 horas de escuridão. [28], [34]

5.3.2 **Temperatura**

A temperatura exerce uma influência significativa no crescimento das microalgas, impactando a velocidade de diversas reações químicas, como a fotossíntese e a respiração celular. A faixa de temperatura ótima para o crescimento desses microrganismos situa-se entre 20°C e 35°C [39]. Sob condições específicas de nutrientes e luz, as microalgas podem alcançar uma taxa ideal de crescimento. O aumento da temperatura está associado a um aumento no teor de proteínas, acompanhado de uma redução nos teores de lipídios e carboidratos celulares. [40]



Além disso, a temperatura pode influenciar a morfologia das células em algumas espécies, como no caso do gênero *Chlorella*, que demonstra capacidade de suportar temperaturas de até 42°C, conforme apontado por [32]

5.3.3 **Aeração**

A seleção dos sistemas de cultivo representa outro aspecto fundamental que impacta de maneira significativa a eficiência e o custo-benefício do processo de produção de biocombustível a partir de microalgas. [41]

No contexto de um sistema de cultivo de microalgas, a aeração desempenha um papel crucial, contribuindo para a homogeneização do meio de cultivo com as microalgas. Esse processo é essencial para o controle da temperatura, transferência de gases e incidência luminosa, sendo considerado também um parâmetro fundamental para regular a atividade fotossintética. [32]

5.3.4 **pH**

O pH exerce uma influência direta no metabolismo das microalgas, visto que a maioria dos ambientes aquáticos mantém um pH situado entre 6 e 9. Variações de pH em um sistema de cultivo de microalgas podem alterar o estado químico de diversas substâncias cruciais para o seu desenvolvimento. Além disso, outras variáveis, como a permeabilidade da membrana, o transporte iônico e a velocidade das reações químicas, podem ser negativamente impactadas pela variação do pH. [42]

Alterações abruptas no pH, abaixo de 6 ou acima de 9, tornam o meio de cultivo inadequado para as microalgas, resultando na escassez de nutrientes. [43]

5.3.5 **Nutrientes (Macronutrientes e micronutrientes)**

Os nutrientes desempenham um papel crucial no cultivo de microalgas e algas em diversos tipos de reatores. Cada componente presente no meio de cultivo desempenha uma função específica no metabolismo desses organismos, destacando,



assim, a vital importância dos nutrientes para o desenvolvimento dessas culturas. Alguns elementos são considerados essenciais em praticamente todos os sistemas de cultivo com microalgas, incluindo carbono, nitrogênio, oxigênio, fósforo, magnésio, cobre, zinco e molibdênio. [44]

Os macronutrientes referem-se aos nutrientes essenciais para as biomoléculas, presentes tanto no meio intra quanto extracelular. Entre os principais macronutrientes utilizados em culturas de microalgas, destacam-se o oxigênio, que desempenha um papel nas atividades respiratórias, o fósforo, que está envolvido nas trocas gasosas, e o silício, responsável pela formação do esqueleto externo. Além desses, incluem-se também o carbono, nitrogênio, hidrogênio, oxigênio, enxofre, sódio, potássio e cálcio, conforme destacado por pesquisadores. [44]

Alguns micronutrientes desempenham um papel crucial no crescimento das microalgas, incluindo ferro, cobre, manganês, zinco, cloro, vanádio, molibdênio, boro, cobalto e silício. [44]

Algumas pesquisas relatam a importância de determinados micronutrientes e sua relação com o rendimento de bio-óleo em reatores fechados do tipo bandeja. Esses micronutrientes como manganês, zinco, cobre, molibdênio, cálcio e selênio foram identificados como de fundamental importância para o cultivo de microalgas. [34]

5.4 Concentração do inóculo

Cepas de microalgas cultivadas em água doce têm demonstrado a capacidade de produzir níveis elevados de lipídeos neutros, tornando-as ideais para a produção de biodiesel. Portanto, é crucial realizar a seleção cuidadosa do inóculo, optando por amostras que proporcionem o máximo teor lipídico extraído da biomassa algal, adaptadas de maneira otimizada aos padrões de cultivo. [45]

A determinação da concentração ideal de inóculo para o cultivo de microalgas é uma consideração importante. Algumas pesquisas relatam que otimizar seu processo de



cultivo em uma unidade experimental utilizando reatores de 3 litros, adicionando 10% e 20% de inóculo de *Scenedesmus* sp. em seus experimentos. Resultados revelaram uma concentração lipídica satisfatória (54%) ao utilizar menores concentrações de inóculo. Seus estudos indicaram que o teor de lipídeos não está diretamente ligado ao crescimento celular, mas sim à reserva nutricional do meio. [34]

Em escala laboratorial, conduzir cultivos a partir de cepas da microalga *Scenedesmus* sp., utilizando uma concentração de 25% de inóculo. Esses experimentos demonstraram um crescimento de biomassa suficiente para permitir a extração de óleo e, subsequentemente, a síntese de biodiesel. [46]

5.5 Tempo de cultivo

A partir de investigações conduzidas com estirpes da microalga *Scenedesmus*, concluiu-se que, entre o segundo e o décimo dia de cultivo, as microalgas entram em uma fase de adaptação ao meio e às condições de cultura. Durante esse período, buscam alcançar um equilíbrio fisiológico e bioquímico para otimizar seu desenvolvimento. [47]

A porcentagem de inóculo inicial pode influenciar a densidade celular final. Ao longo de um período de 16 dias, é possível alcançar uma produção de biomassa de 1,94 g/L. Observou-se que, após a fase de crescimento linear (dias 10-25), a microalga *Scenedesmus* pode experimentar uma redução na densidade celular. [48]

Ao concluir o cultivo no 22º dia, estudos apresentam uma biomassa microalgal de 0,244 g/L, isso demonstra a importância de maximizar a fase estacionária da cultura nos períodos de 10 a 16 dias e de 22 a 30 dias. Essa abordagem visa otimizar o acúmulo lipídico nas células da alga *Scenedesmus*, evitando que, após o consumo dos nutrientes do meio de cultivo, ela passe a utilizar suas reservas energéticas para sustentar seu crescimento contínuo. [34]



6. **Microalga *Scenedesmus* sp.**

O gênero *Scenedesmus* é amplamente empregado na área de bioenergia. Essa microalga é predominante em ambientes de água doce, embora ocasionalmente seja encontrada em águas salobras. Os indivíduos pertencentes a esse gênero são unicelulares e clorofilados, tendendo a formar colônias compostas por um agrupamento de 4 a 8 células, raramente ultrapassando essa quantidade. Sua relevância na bioenergia é notável devido à significativa produção de bio-óleo e à abundância de sua biomassa. [28] (Figura 5).

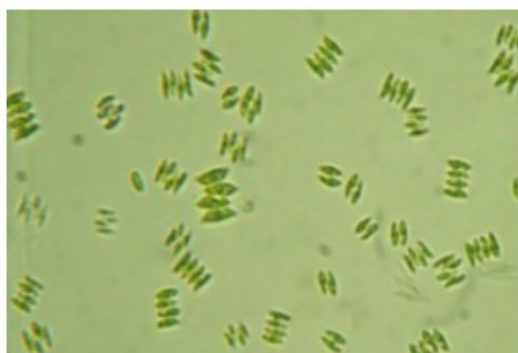


Figura 5: Microscopia óptica com aumento de 40 vezes da microalga *Scenedesmus* sp. (OLIVEIRA, 2013).

O gênero *Scenedesmus* é notável por apresentar um teor de lipídeos que varia de 10% a 20% em condições adequadas de cultivo, podendo ultrapassar 30% com a otimização dos padrões de cultivo. A característica distintiva desse alto teor de lipídeos na *Scenedesmus* sp. a torna uma candidata promissora para a produção em larga escala de biodiesel. Para atingir esse objetivo, é crucial que o cultivo ocorra em tanques, preferencialmente em sistemas fechados, a fim de evitar contaminações, conforme destacado por diversos pesquisadores. [34], [59].

7. Composição bioquímica das microalgas

A composição celular das microalgas é adaptada de acordo com os processos metabólicos (conforme ilustrado na Figura 6). Elas podem ser classificadas como autotróficas quando convertem compostos inorgânicos e energia luminosa em carbono orgânico, heterotróficas quando dependem de nutrientes na ausência de luz e mixotróficas quando ocorrem ambos os metabolismos. [4]

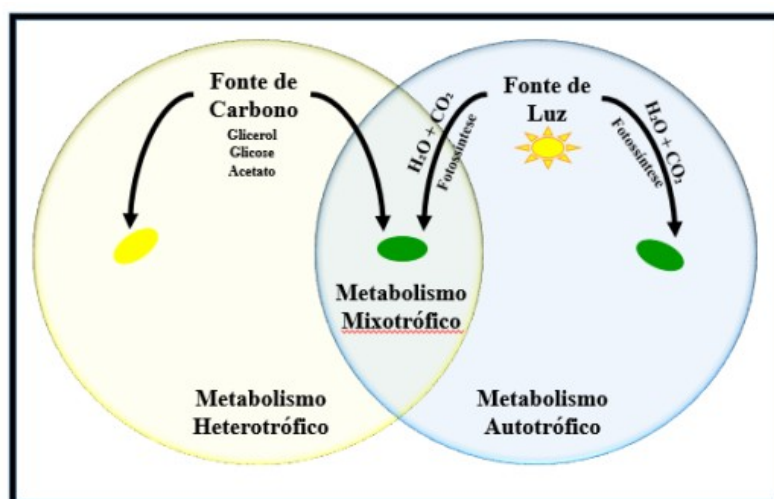


Figura 6 - Esquema metabólico das microalgas. OLIVEIRA, 2019.

A fotossíntese é um processo que proporciona a estrutura necessária para a formação de moléculas mais complexas por meio da biossíntese, incluindo carboidratos, proteínas e lipídeos. [50]

7.1 Carboidratos

Também conhecidos como glicídios, os carboidratos podem ser categorizados em monossacarídeos (do grego "monos", que significa único, e "sáccharon", que significa açúcar), dissacarídeos e polissacarídeos. A glicose, um monossacarídeo, é amplamente utilizada pelos organismos vivos como fonte de energia e é produzida por



meio do processo de fotossíntese. Além de desempenhar um papel fundamental como fonte de energia, os carboidratos também desempenham uma função na estrutura dos seres vivos, estando presentes na membrana plasmática e participando do revestimento celular. Considera-se um composto de alto valor agregado nas microalgas devido aos seus potenciais aplicações terapêuticas, nutricionais, cosméticas, têxteis, energéticas, entre outras. [34]

7.2 Proteínas

Amplamente presentes nos processos biológicos, as proteínas, formadas pela combinação de aminoácidos, constituem as moléculas orgânicas mais abundantes nas células das microalgas, representando cerca de 50% de seu peso. A sua composição pode variar consideravelmente entre as espécies, como indicado na Tabela 3. [51]

Tabela 3 - Composição de aminoácidos encontrada nas espécies de microalgas *Scenedesmus* sp.

Aminoácidos	(g · 100 g ⁻¹ de proteína)
Arginina	2,1
Asparato	8,4
Histidina	1,1
Lisina	1,5
Prolina	3,9
Triptofano	0,3
Fenilamina	4,8
Metioanina	1,5
Glutamato	11
Treonina	5,1
Leucina	7,3
Alanina	9
Isoleucina	3,6
Valina	6
Cisteína	0,6
Tirosina	3,2
Glicina	7,1
Serina	3,8

Fonte: Adaptado Santos (2013).



7.3 Lipídeos

Os lipídeos, derivados do termo "lipos" (gordura), desempenham, assim como as proteínas, um papel crucial na formação da membrana celular dos organismos. As células das microalgas destacam-se pela elevada concentração de ácidos graxos com teor lipídico significativo, apresentando cadeias de 14 a 20 carbonos com propriedades físico-químicas semelhantes aos óleos produzidos por outras plantas. Esses lipídeos mostram-se promissores para a produção de diversos biocombustíveis, como biodiesel, bioetanol e biometano. Ácidos graxos de cadeias mais extensas são utilizados em suplementos alimentares, bem como em aplicações farmacêuticas ou terapêuticas. [50]

A composição lipídica da biomassa algal fundamenta-se em glicerol, açúcares ou bases esterificadas em ácidos graxos saturados e insaturados. Essa composição pode variar entre as espécies, sendo influenciada pelas condições ambientais específicas de cada organismo e pelo seu ciclo de crescimento celular. O teor lipídico resultante pode variar consideravelmente, abrangendo valores entre 1% e 70%, conforme apresentado na Tabela 4. [50]

Tabela 4 - Composição de Proteínas, Carboidratos e Lipídeos de microalgas.

Espécie	Proteína (%massa seca)	Carboidrato (%massa seca)	Lipídeo (%massa seca)
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	18
<i>Scenedesmus</i>	21	15	21-43

Fonte: Adaptado de Cougo (2017).



O óleo encontrado nas microalgas exibe propriedades físico-químicas semelhantes às do óleo produzido por outras plantas, tornando-se, portanto, uma opção promissora para a produção de biodiesel. [52]

8. **Mercado para produtos derivados de microalgas**

Atualmente, os produtos derivados de algas desfrutam de um elevado valor agregado (conforme ilustrado na Figura 7), impulsionando setores como cosméticos, higiene pessoal, nutrição humana e animal, gerando uma movimentação econômica de bilhões de reais anualmente. [53]

No entanto, a viabilidade econômica do cultivo em larga escala de microalgas enfrenta desafios tecnológicos significativos para alcançar uma produção competitiva, necessitando de métodos eficazes para otimização do cultivo e processos de colheita. Embora estudos indiquem a viabilidade técnica da produção energética a partir de microalgas para biocombustíveis, essa integração ainda não apresenta custos de produção que concorram efetivamente com a indústria petroquímica. [54]



Figura 7 - Mercado para produtos derivados de algas. OLIVEIRA, 2019.

9. Biocombustíveis a partir de microalgas

O petróleo está gradualmente sendo considerado obsoleto como fonte de geração de energia. Após a utilização de recursos como milho, cana-de-açúcar, mamonas, entre outros, para a produção de biocombustíveis, os cientistas indicam que o futuro das fontes energéticas pode residir nos mares e rios. Algumas algas possuem a notável capacidade de naturalmente sintetizar a matéria-prima de combustíveis fósseis, como óleo e gasolina. [55]

Dentro das atuais opções para a produção de biocombustíveis, o uso de microalgas surge como uma fonte de biomassa considerada viável, gerando grandes expectativas no setor energético. Atualmente, as algas são empregadas na produção de



suplementos alimentares e na extração de compostos de alto valor agregado. Além disso, desempenham papéis cruciais em práticas como biorremediação e biofertilização, e são versáteis na produção de diversos biocombustíveis, como metano, biodiesel, bioetanol e bio-hidrogênio. [56]

As microalgas são utilizadas globalmente para uma variedade de propósitos. Além de possuírem alto teor de lipídios e carboidratos, são consideradas excelentes matérias-primas devido ao rápido crescimento e à alta eficiência na fixação de CO₂. Elas encontram aplicação na produção de biocombustíveis, na obtenção de pigmentos, no tratamento de efluentes industriais e esgoto. [27]

A utilização de microalgas na produção de biocombustíveis apresenta diversas vantagens, tais como a ausência de competição com alimentos e a capacidade de ser cultivada em diversos locais. Contudo, ainda é percebida como uma produção pouco competitiva e tecnologicamente dispendiosa. Nesse sentido, é essencial realizar mais pesquisas para aprimorar os processos relacionados à produção de biocombustíveis a partir de microalgas, buscando consolidar essa nova biotecnologia. [56]

A Figura 8 ilustra os processos aos quais a biomassa das microalgas pode ser submetida para a produção de bioenergia, assim como os produtos que podem ser gerados.

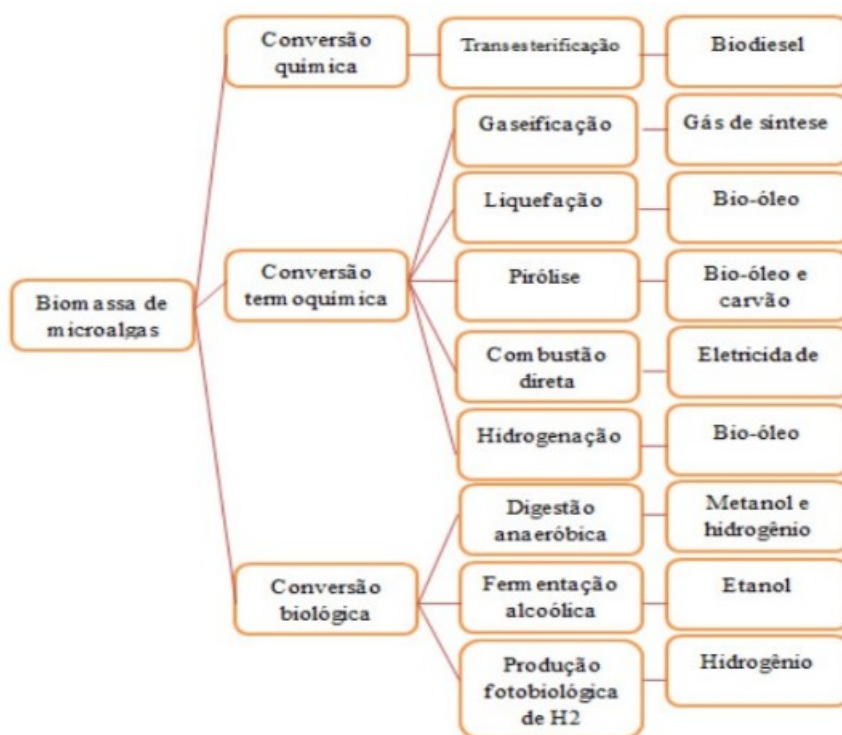


Figura 8 - Formação de produtos a partir da biomassa de algas. Fonte: Gris, 2011. Adaptado.

No que diz respeito ao metabolismo, algumas espécies de microalgas possuem a capacidade de ajustá-lo de acordo com as mudanças ambientais. O cultivo dessas algas pode assumir diferentes formas: fotoautotrófico, quando a luz é a única fonte de energia; heterotrófico, quando compostos orgânicos são utilizados como fonte de carbono e energia; e mixotrófico, quando tanto o metabolismo autotrófico quanto o heterotrófico podem ser empregados. [57]. De acordo com algumas pessoas, cada espécie requer condições específicas para o cultivo, sendo essencial otimizar fatores como temperatura, quantidade de luz, macro e micronutrientes para garantir condições ideais. [34]

Entre os gêneros mais empregados no cultivo e na produção de bio-óleo destacam-se *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirulina* e *Nannochloropsis*. Além das diversas aplicações na indústria, as microalgas conquistaram um espaço significativo no cenário



da bioenergia, sendo consideradas biocombustíveis de terceira geração devido ao seu grande potencial na produção de biodiesel, bioetanol e bio-hidrogênio. [58]

10. Considerações finais

Os processos biológicos derivados do cultivo de microalgas para a produção de biodiesel apresentam vantagens, pois são eficientes na fixação de carbono atmosférico, controlando e prevenindo a poluição. No entanto, para alcançar uma produção competitiva, é crucial reduzir os custos associados ao meio de cultivo, ao mesmo tempo em que otimiza os procedimentos de colheita e extração lipídica.

11. Biografias(s)

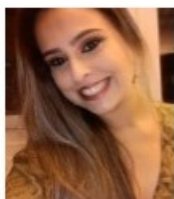


Witter Duarte Guerra

Doutorando em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis, possuindo também uma titulação de mestre na mesma área pela Universidade Federal de Uberlândia. Especialista em Genética de Microrganismos e Biotecnologia, além de possuir graduação em Ciências Biológicas pelo Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara.

<http://lattes.cnpq.br/8951821384232273>

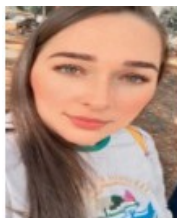
<https://orcid.org/0000-0002-9155-8047>



Flávia Oliveira Costa

Mestra em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis pela Universidade Federal de Uberlândia. Graduada em Ciências Biológicas pelo Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara.

<http://lattes.cnpq.br/2210096662159421>



Jaqueline Elise Garcia Chiesa

Mestra em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis pela Universidade Federal de Uberlândia. Graduada em Ciências Biológicas pelo Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara.

<http://lattes.cnpq.br/9771109665383009>



Karolynne Gomes Albuquerque

Graduada em Ciências Biológicas pelo Instituto Luterano de Ensino Superior de Itumbiara.

<http://lattes.cnpq.br/9771109665383009>



Alexandre Matos Martins

Engenheiro Agrônomo, graduado pela Universidade Estadual de Montes Claros; Doutorando em Biocombustíveis - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Mestre em Produção Vegetal - Universidade Federal de São João Del-Rey; Especialista em Gestão e Manejo Ambiental pela Universidade Federal de Lavras - UFLA.

<http://lattes.cnpq.br/7255938195800617>



Lucas Matheus da Rocha

Graduado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal de Juiz de Fora, com Mestrado em Ciências Biológicas pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e Doutorado em Ciências Biológicas pelo Programa de Pós-Graduação em Botânica do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (2011). Atualmente é Professor Associado do Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal - Campus Pontal da Universidade Federal de Uberlândia.

<http://lattes.cnpq.br/2684055663213328>



Antonio Carlos Ferreira Batista

Técnico em química Industrial pela UNAERP, graduação em Bacharelado em Química pela Universidade de São Paulo, graduação em Bacharelado em Química com Atribuições Tecnológica pela Universidade de São Paulo, graduação em Licenciatura em Química pela Universidade de São Paulo, mestrado e doutorado em Química pela Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor Associado do Instituto de Ciências Exatas e Naturais do Pontal - Campus Pontal da Universidade Federal de Uberlândia.

<http://lattes.cnpq.br/6037406255124458>

<https://orcid.org/0000-0001-6313-4565>

12. Declaração de direitos

Os autores declaram ser detentores dos direitos autorais da presente obra, que o artigo não foi publicado anteriormente e que não está sendo considerado por outra(o) Revista/Journal. Declaram que as imagens e textos publicados são de responsabilidade dos autores, e não possuem direitos autorais reservados à terceiros. Textos e/ou imagens de terceiros são devidamente citados ou devidamente autorizados com concessão de direitos para publicação quando necessário. Declaram respeitar os direitos de terceiros e de Instituições públicas e privadas. Declaram não cometer plágio ou auto plágio e não ter considerado/gerado conteúdos falsos e que a obra é original e de responsabilidade dos autores.

13. Referências

1. Nunes, M. S. Abordagem decolonial da contribuição nacionalmente determinada pelo Brasil para o cumprimento do acordo de Paris sobre mudanças climáticas: uma proposta de decrescimento ante insuficiências do compromisso local no setor energético. (Tese em Programa de Pós-graduação em Direito), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. (2021).
2. Chiesa, J. E. G. Avaliação dos efeitos causados pelas diferentes condições de cultivo nas microalgas *Scenedesmus* sp. e *Chlorella* sp. mediante a potencialização de teor lipídico. (Mestrado em Biocombustíveis: Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis), Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba. (2019).



3. Guerra, W. D. Avaliação do rendimento de biomassa e lipídeos empregando diferentes regimes de cultivo em *Scenedesmus* sp. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis: Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis), Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba. (2019).
4. Oliveira, F. C. (2019). Otimização de produção de biomassa para extração lipídica utilizando estirpes da microalga *Scenedesmus* sp. Dissertação (Mestrado em Biocombustíveis: Programa de Pós-Graduação em Biocombustíveis), Universidade Federal de Uberlândia, Ituiutaba. (2019).
5. GOLDENSTEIN, M.; AZEVEDO, R. L. S. Combustíveis alternativos e inovações no setor automotivo: Será o fim da era do petróleo? BNDES Setorial. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2531>.
6. ANP. Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/biocombustiveis> . Acesso em: 7 jun. 2019. (2017).
7. VILLELA, H. D. M. Utilização das técnicas de engenharia genética e bioquímica em *Chlamydomonas reinhardtii* visando o aumento da produção de lipídeos para obtenção de biocombustível. Dissertação (Mestrado em Ciências - Bioquímica: Instituto de Química), Universidade de São Paulo, São Paulo. (2014).
8. BATISTA, A. C. F.; SILVA, T. A.; VIEIRA, A. T.; OLIVEIRA, M. F. Biotechnological Applications of Lipases in Biodiesel Production. Taylor Francis Group, LLC. <https://doi.org/10.1201/b15247-13>. (2014).
9. FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. DA S.; SCABIO, A. Biodiesel de Soja – Taxa de Conversão em Ésteres Etílicos, Caracterização Físico-Química e consumo em gerador de energia. Química Nova, v. 28, n. 1, p. 19-23. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000100004> (2005).
10. ISLAM, M. A.; HEIMANN, K.; BROWN, R. J. Microalgae biodiesel: Current status and future needs for engine performance and emissions. Renewable and



- Sustainable Energy Reviews, v. 79, n. May, p. 1160-1170.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.041>. (2017).
11. GAMA, P. E.; GIL, R. A. DA S. S.; LACHTER, E. R. Produção de Biodiesel Através de Transesterificação In Situ de Sementes de Girassol Via Catálise Homogênea e Heterogênea. Química Nova, v. 33, n. 9, p. 1859-1862.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000900007>. (2010).
 12. U.S. EIA. Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050 Annual Energy Outlook 2019 with projections to 2050. Disponível em:
<https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf>. (2019).
 13. RUSCHEL, C. F. C. Avaliação das propriedades físico-químicas de blendas de óleo diesel e biodiesel. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial - Instituto de Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre). (2010).
 14. BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 2, p. 557-577.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>. (2010).
 15. SALOMÃO, I. L. Análise do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel no Brasil Entre os Anos 2005 e 2010: O Papel Dominante do Biodiesel de Soja. Tese (Doutorado em Planejamento Energético: Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. (2013).
 16. DOSHI, A.; PASCOE, S.; COGLAN, L.; RAINEY, T. J. Economic and policy issues in the production of algae-based biofuels: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 64, p. 329-337.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.027>. (2016).



17. ELRAYIES, G. M. Microalgae: Prospects for greener future buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 81, n. May 2017, p. 1175-1191, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.032>. (2017).
18. LEITE, R. C. DE C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. *Novos Estudos - CEBRAP*, n. 78, p. 15-21. <https://doi.org/10.1590/S0101-33002007000200003>. (2007).
19. OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio. XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia. Rio Branco. (2008).
20. LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C. Biodiesel: Parâmetros de Qualidade e Métodos Analíticos. *Química Nova*, v. 32, n. 6, p. 1596-1608. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000600044>. (2009).
21. DE BHOWMICK, G., SUBRAMANIAN, G., MISHRA, S., SEN, R. Raceway pond cultivation of a marine microalga of Indian origin for biomass and lipid production: A case study. [s.l.] Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.07.005>. (2014).
22. PENA, A. DE C. C., Fontoura, J. T. da., Trierweiler, L. F., Gutterres, M. Estudo de um consórcio de microalgas na remoção de nutrientes de efluentes de curtiúme. *Resumo. Revista Eletrônica Científica da UFRGS*, v. 4, p. 743–752. <https://doi.org/10.21674/2448-0479.34.743-752> (2017).
23. BATISTA, A. C. F.; RODRIGUES, H. S.; PEREIRA, N. R.; HERNANDEZ-TERRONES, M. G.; VIEIRA, A. T.; OLIVEIRA, M. F. Use of baru oil (*Dipteryx alata* Vog.) to produce biodiesel and study of the physical and chemical characteristics of biodiesel/petroleum diesel fuel blends. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, v. 48, n. 1, p. 13-16. <https://doi.org/10.1007/s10553-012-0329-0>. (2012).



24. YU, X.; CHEN, L.; ZHANG, W. Chemicals to enhance microalgal growth and accumulation of high-value bioproducts. *Frontiers in Microbiology*, v. 6, n. FEB, p. 1-10. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00056>. (2015).
25. LUBIANA, K. M. F. Microalgas: ecologia, biodiversidade e importância. IV Botânica no Inverno, n. July 2014 (2014).
26. HU, Q. SOMMERFELD, E. J.; GHIRARDI, M.; POSEWITZ, M.; SEIBERT, M.; DARZINS, A. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *The Plant Journal*, v. 54, n. 4, p. 621-639. <https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2008.03492.x>. (2008).
27. SANTOS, L. E. DA S. DOS. Minimização de emissões de óxidos de nitrogênio (Nox) pelo uso de fotocatalise e biofixação por microalgas. Dissertação (Pós Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial: Departamento de Engenharia Química), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. (2018).
28. OLIVEIRA, A. C. DE. Produção de biomassa de microalgas *Scenedesmus* sp. em efluente de bovinocultura biodigerido. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais: Setor de Tecnologia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. (2013).
29. MALLICK, N. MALLICK, N.; MANDAL, S.; SINGH, A. K.; BISHAI, M.; DASH, A. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 87, n. 1, p. 137-145. <https://doi.org/10.1002/jctb.2694>. (2012).
30. JUÁREZ, J. M. HERNANDO, A. L.; TORRE, R. M.; LANZA, S. B.; RODRÍGUES, S. B. Saccharification of microalgae biomass obtained from wastewater treatment by enzymatic hydrolysis. Effect of alkaline-peroxide pretreatment. *Bioresource Technology*, v. 218, p. 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.087>. (2016).



31. MENEZES, R. S.; LELES, M. I. G.; SOARES, A. T.; MELO FRANCO, P. I. B.; ANTONIASI FILHO, N. R.; SANT'ANA, C. L.; VIEIRA, A. A. H. Avaliação da potencialidade de microalgas Dulcícolas como Fonte e Matéria-Prima Graza Para a Produção de Biodiesel. *Química Nova*, v. 36, n. 1, p. 1-6. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000100003>. (2013).
32. CARTAS, L. C. Isolamento e cultivo de microalgas em resíduo líquido do processamento da mandioca: manipueira. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia: Programa de PósGraduação em Biotecnologia), Universidade Federal do Tocantins, Gurupi. (2018).
33. PIRES, J. C. M. COP21: The algae opportunity? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, n. May, p. 867-877. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.197>. (2017).
34. BORGES, W. DA S. Produção de bio-óleo empregando microalgas em diferentes meios de cultivo. Tese (Doutorado em Engenharia Química: Programa de Pós Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. (2014).
35. QIN, C.; LEI, Y.; WU, J. Light/dark cycle enhancement and energy consumption of tubular microalgal photobioreactors with discrete double inclined ribs. *Bioresources and Bioprocessing*, v. 5, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.1186/s40643-018-0214-8>. (2018).
36. VENÂNCIO, H. C. Produção da microalga *Scenedesmus obliquus* em um sistema laminar de cultivo de algas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Aquicultura), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. (2016).
37. KLEIN, A. P. Avaliação de diferentes fotobiorreatores para cultivo de microalgas. [s.l.] Trabalho de diplomação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (2015).



38. FRANCO, A. L. C., LÔBO, I. P., DA CRUZ, R. S., TEIXEIRA, C. M. L. L., DE ALMEIDA, N. J. A., MENEZES, R. S. Biodiesel from microalgae: Progress and challenges. *Química Nova*, v. 36, n. 3, p. 437–448.
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000300015>. (2013).
39. OHSE, S.; DERNER, R.; OZÓRIO, R. Á. Crescimento de microalgas em sistema autotrófico estacionário. *Biotemas*, v. 21, n. 2, p. 6-18.
<https://doi.org/10.5007/2175-7925.2008v21n2p7>. (2008).
40. SU, Y.; SONG, K. ZHANG, P. SU, Y.; CHENG, J. CHEN, X. Progress of microalgae biofuel's commercialization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 74, n. October 2015, p. 402-411.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.078>. (2015).
41. LI, Y. HORSMAN, M.; WU, N.; LAN, C. Q.; DUBOIS-CALERO, N. Biofuels from Microalgae. *Biotechnology Progress*, v. 24, n. 1, p. 815-820.
<https://doi.org/10.1021/bp.070371k>. (2008).
42. WOJCIECHOWSKI, J.; STRAUBE, A.; CAVALCANTE, K. P.; MIRANDA, F. E. Isolamento e cultivo de microalgas. *Thenical report*, n. September 2013, p. 85, (2013).
43. DERNER, R. B.; OHSE, S.; VILLELA, M.; CARVALHO, S. M.; FETT, R. Microalgas, produtos e aplicações. *Ciência Rural*, v. 36, n. 6, p. 1959-1967.
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000600050>. (2006).
44. SALAMA, E. S. HURADE, M. B.; ABOU-SHANAB, R. A.I.; EL-DALATONY, M. M.; YANG, I. S.; MIN, B.; JEON, B. H. Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, n. May, p. 1189-1211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.091>. (2017).
45. SILVA, G. C. DA., SANTOS, A. J. F. DOS., BREDDA, E. H., RÓS, P. C. M. DA. Otimização das condições de cultivo da microalga *Nannochloropsis*



- gaditana e caracterização do óleo obtido. Brazilian Journal of Development, v. 4, n. 6, p. 2730–2749. (2019).
46. TAHER, D. M. Biodiesel de microalgas cultivadas em dejetos suíno biodigerido. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - Setor de Tecnologia), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. (2013).
47. TOMAS, C. Cultivo de *Scenedesmus acuminatus* em água de maceração do milho e extração e quantificação de lipídeos. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Bioenergia: Centro de Engenharias e Ciências Exatas), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo. (2016).
48. RAMIREZ, N. N. V. Estudo do crescimento da microalga *Scenedesmus sp.* em vinhaça. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia: Departamento de Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. (2013).
49. VENDRÚSCOLO, J. B. G. Cultivo da microalga *Scenedesmus quadricauda* em efluentes de biodigestão de aves e suínos. Dissertação (Mestrado em Tecnologia em Aquicultura Continental: Mestrado Profissional - Tecnologia em Aquicultura Continental), Goiânia. (2009).
50. COUGO, C. D. G. utilização da técnica infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) para estimativa das concentrações de carboidratos e de lipídeos em *Scenedesmus sp.* [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia: Pesquisa e desenvolvimento de processos), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (2017).
51. SANTOS, B. redução do custo da produção de biomassa microalgal como matéria prima para biodiesel. [s.l.] Monografia (Ciências Biológicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. (2013).
52. ERAZO, R. G. T. P. Isolamento, seleção e cultivo em meio sintético e vinhaça de microalgas com potencial para a produção de biodiesel. [s.l.] Dissertação



- (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira. (2017).
53. Guerra, W. D., Oliveira, F. C., Chiesa, J. E. G., Dias, I. S., Vieira, A. T., Borges, W. S., Costa, A. S. V., Faria, A. M., & Batista, A. C. F. Avaliação do rendimento de biomassa e lipídeos empregando diferentes regimes de cultivo em *Scenedesmus* sp. Research, Society and Development. 11(1), e18411124565 <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24565>. (2019).
54. DURVASULA, R., HURWITZ, I., FIECK, A., RAO, D. V S. Culture, growth, pigments and lipid content of *Scenedesmus* species, an extremophile microalga from Soda Dam, New Mexico in wastewater. Algal Research, v. 10, p. 128–133. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.003>. (2015).
55. SALOMÃO, I. L. Análise do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel no Brasil Entre os Anos 2005 e 2010: O Papel Dominante do Biodiesel de Soja. Tese (Doutorado em Planejamento Energético: Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.
56. CARDOSO, A. DA S.; VIEIRA, G. E. G.; MARQUES, A. K. O uso de microalgas para a obtenção de biocombustíveis. Revista Brasileira de Biociências, v. 9, n. 4, p. 542. (2011).
57. ANGELO, E. A.; ANDRADE, D. S.; COLOZZI-FILHO, A. Cultivo não-fotoautotrófico de microalgas: uma visão geral. Ciências Biológicas e da Saúde, v. 35, n. 1, p. 115. <https://doi.org/10.5433/1679-0367.2014v35n2p125>. (2014).
58. SANTOS, C. S. DOS; COSTA, T. M. F. DA. Automação no cultivo de microalgas. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia e Controle de Automação), Faculdade de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba. (2016).