



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2024) v. 11, n. 2, p. 176–191
<https://doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n2.p176-191>

Microalgas e a produção de energia de baixo carbono: uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis

Microalgae and low carbon energy production: a sustainable alternative to fossil fuels

Glauccio Gualtieri Honorio^{1,*}, Alena Torres Netto¹, Natalia Costa Fagundes², Guilherme da Silva Amaral², Leonardo Cordeiro Paredes Chagas², Rebeca Pires Sant'Ana², Pedro Henrique Prado de Carvalho Vidal Parente², Marcos Gabriel Martins da Rocha Silva²

¹ Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, campus Maracanã, RJ, Brasil

² Aluno(a) de Graduação do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, campus Maracanã, RJ, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: glauccio.honorio@eng.uerj.br

Received: 27 November 2024 | Accepted: 18 December 2024 | Published online: 26 December 2024

Resumo: Devido à alta demanda energética mundial e os problemas ambientais derivados da queima de combustíveis fósseis, a sociedade atual lança-se na busca por novas fontes de energia mais sustentáveis, com destaque para a biomassa, merecendo especial atenção as microalgas. Além de fornecer metabólitos essenciais para a produção de biocombustíveis, as microalgas podem ser cultivadas em painéis fotovoltaicos, obtendo energia solar através da fotossíntese. Apesar do grande número de pesquisas, a obtenção de biocombustíveis de microalgas ainda esbarra em algumas limitações. O presente estudo busca avaliar a viabilidade técnica e econômica do uso de microalgas como matéria prima para obtenção de energia, além de apresentar alternativas para superar as limitações do processo.

Palavras-chave: biocombustíveis; bioenergia; microalgas; energia sustentável; energia de baixo carbono.

Abstract: Due to the high global energy demand and environmental problems resulting from the burning of fossil fuels, today's society is embarking on a search for new, more sustainable energy sources, among which biomass stands out, with special attention being paid to microalgae. In addition to providing essential metabolites for the production of biofuels, microalgae can be grown in photovoltaic panels, obtaining solar energy through photosynthesis. Despite the substantial number of studies, obtaining biofuels from microalgae still faces some limitations. This study seeks to evaluate the technical and economic viability of using microalgae as a raw material for obtaining energy, in addition to presenting alternatives to overcome the limitations of the process.

Keywords: biofuels; bioenergy; microalgae; sustainable energy; low carbon energy.

1 Introdução

Um dos maiores desafios da sociedade atual é o aumento da demanda energética mundial, impulsionado pelo crescimento da população. Segundo a ONU – Organização das Nações Unidas (2022) a população mundial deve chegar a 10,8 bilhões em 2080. A demanda por energia cresce aproximadamente 3,6 % ao ano segundo a *International Energy Agency* (IEA) (IEA, 2024). Associado a este crescimento do consumo energético estão os problemas ambientais associados, principalmente a queima de combustíveis fósseis (Lôbo et al. 2009). Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) o planeta vem aquecendo aproximadamente 0,2 °C a cada década, tendo os anos de 2023 e 2024 registrado recordes históricos de temperatura média global. Desse modo torna-se cada vez mais difícil atingir a meta de manter o aumento do aquecimento do planeta

em no máximo 1,5 °C em relação aos níveis pré-industriais até o ano de 2100 (meta firmada em 2015 por governantes de todo o mundo no Acordo de Paris) (IPCC, 2023).

Como consequências desse aquecimento, pode-se listar eventos climáticos extremos (como chuvas torrenciais e tempestades e longos períodos de seca, levando a maior incidência de incêndios florestais), aumento do nível dos mares devido ao degelo de calotas polares (colocando em risco cidades litorâneas), perda de espécies terrestres e marinhas (causada por clima extremo, incêndios florestais e doenças invasivas), maior risco a saúde (surgimento de novas epidemias e expansão de doenças já existentes, como a malária), insuficiência na produção de alimentos (o aumento de extremos climáticos pode tornar a pesca, agricultura e pecuária menos produtivas) e o aumento da pobreza e vulnerabilidade (estudos dão conta que desastres climáticos levam ao deslocamento de aproximadamente 23 milhões de pessoas por ano, deixando-as mais vulneráveis às desigualdades sociais) (ONU, 2024).

O desenvolvimento de fontes alternativas de energia surge como uma ferramenta no combate a emissão de gases do efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), dentre outros. Dentre essas fontes, estão a energia eólica, solar, maremotriz, hidrelétrica e biomassa, tecnologias com baixo impacto ambiental capazes de substituir com eficiência a produção de energia a partir de combustíveis fósseis (IPCC, 2023).

Segundo o relatório *Renewables 2024*, da IEA, quase metade da demanda energética do mundo será atendida por fontes renováveis até 2030, porém abaixo do estipulado pela COP 28 (Conferência das Partes, evento ocorrido em 2023, em Dubai), cuja meta era triplicar a capacidade de energia renovável global no mesmo período. Apesar deste aumento estar associado principalmente a ampliação da energia solar e da energia eólica, pesquisadores de todo o mundo vem obtendo avanços promissores na energia derivada da biomassa, os biocombustíveis (IEA, 2024).

Devido a menor emissão de GEE, os biocombustíveis são vistos como a principal alternativa aos combustíveis fósseis. Dentre os principais combustíveis obtidos a partir da biomassa, estão o biodiesel, o etanol (ou bioetanol), o biogás, o bio-óleo e até a energia solar, a partir da produção de painéis bifotovoltaicos (Cardoso et al., 2011).

De acordo com a matéria prima e o modo de produção os biocombustíveis são classificados em 4 tipos, chamados gerações. Biocombustíveis de primeira geração (1G) são obtidos da biomassa derivada de matéria prima alimentícia, como soja, cana de açúcar, milho, amendoim, dentre outros, destacando-se a produção de biodiesel (principalmente a partir da soja) e o etanol (derivado da cana de açúcar). Os biocombustíveis de segunda geração (2G) são derivados de resíduos de processamento de alimentos e de biomassa não comestível, como por exemplo a obtenção de biodiesel a partir de óleo de fritura residual. Os biocombustíveis de terceira geração (3G) são derivados da biomassa de algas e microalgas e os biocombustíveis 4G produzem biomassa a partir de tecnologias de captura e armazenamento de CO₂ (o que pode ser feito com qualquer biomassa e resíduos orgânicos) (da Silva et al., 2013).

Os biocombustíveis podem ser obtidos a partir de processos químicos como: transesterificação (biodiesel), digestão anaeróbia (biogás), fermentação (bioetanol) e pirólise (bio-óleo) (Adeniyi et al., 2018). A transesterificação consiste na esterificação de ácidos graxos e glicerídeos, obtendo uma mistura de ésteres, a qual é denominada biodiesel (Honorio et al., 2019). A digestão anaeróbia consiste na degradação de resíduos orgânicos pela ação de microorganismos que degradam a matéria orgânica na ausência de oxigênio (Manfron, 1991). Já a pirólise consiste na queima da biomassa a temperaturas elevadas (Cardoso et al., 2011).

Apesar das vantagens em relação aos combustíveis fósseis e do processo de produção bem estabelecido, os biocombustíveis 1G são alvos de crítica, principalmente devido a competição com a produção de alimentos, o que pode gerar insegurança alimentar e a necessidade de áreas extensas para plantio da matéria-prima. Dentre as principais alternativas para solucionar tais problemas está a produção de biocombustíveis a partir de microalgas, que não competem com a produção alimentícia e nem precisam de extensas áreas de cultivo e tem alto rendimento. Além disso, as microalgas são eficientes na retirada de CO₂ da atmosfera, através do processo de fotossíntese. Embora apresente vantagens ambientais, a produção de biocombustíveis 3G ainda enfrenta limitações econômicas (Nazary et al., 2021).

As microalgas possuem células com composição bioquímica bastante diversificada, contendo carboidratos, proteínas, lipídios, ácidos graxos, dentre outros. A variação ocorre de acordo com a espécie e com os fatores ambientais do meio onde são cultivadas. Para a produção de biocombustíveis, variáveis como uso de água, nutrientes, gastos de energia relacionadas ao cultivo das microalgas são importantes para a viabilidade do processo produtivo de forma sustentável etc. Para tornar o cultivo economicamente viável, o aproveitamento de efluentes domésticos, agropecuários e industriais tem sido uma alternativa

como meio de cultura e fonte de nutrientes. Além do cultivo, a obtenção de biomassa para produção de biocombustíveis está condicionada a etapas como secagem e extração dos bioprodutos, representando a parte mais cara do processo. A secagem é uma etapa importante para auxiliar o rompimento das células das microalgas, facilitando a extração dos bioprodutos de interesse. Para biomassas com baixa umidade, o mais aplicado é a secagem ao sol. A liofilização, retirada da umidade após o congelamento, pode ser utilizada, porém em escala comercial, eleva os custos. Para a extração dos bioprodutos é preciso que haja o rompimento das células, o que pode ser feito por prensagem ou por ultrassom, além do tratamento com substâncias alcalinas (Cardoso et al., 2011). Os metabólitos ainda podem ser extraídos por extração com solventes, extração fluida supercrítica, extração enzimática e choque osmótico (da Cruz et al., 2016).

Com base no exposto, esse estudo busca avaliar a viabilidade técnica e econômica da obtenção de biocombustíveis a partir de microalgas como uma alternativa aos combustíveis derivados de fontes fósseis.

2 Metodologia

Para confecção deste trabalho foi realizada uma pesquisa exploratória a partir do levantamento de dados através de uma pesquisa bibliográfica. Os seguintes bancos de dados foram utilizados: *Science Direct*, *Scopus*, *Scielo*, *Web of Science*, visando trabalhos nos idiomas português e inglês, concentrando a busca no período compreendido entre 2020 e 2024.

A pesquisa foi realizada a partir dos seguintes descritores: “microalga”, “biodiesel”, “biogás”, “biohidrogênio”, “biometano”, “bioetanol”, “bio óleo”, “biochar”, “energia biofotovoltaica”, “energia solar”, bem como seus correspondentes em inglês (“*microalgae*”, “*biodiesel*”, “*biogas*”, “*biohydrogen*”, “*biomethano*”, “*bioethanol*”, “*bio oil*”, “*biochar*”, “*biophotovoltaic energy*”, “*solar energy*”).

A fim de refinar os resultados, foi introduzida a palavra produção para cada descritor, excetuando “microalga” (ex. “produção de biodiesel”) bem como o correspondente em inglês (“*biodiesel production*”). Para otimizar a busca pelos bancos de dados foi utilizada também a técnica de truncagem, que corresponde na combinação dos descritores através da palavra AND (ex. “microalga” AND “produção de biodiesel”) com o intuito de se obter um maior número de resultados, além de resultados mais precisos. A fim de obter um panorama dos trabalhos produzidos no país, o descritor “Brasil” foi adicionado a pesquisa (ex. “microalga” AND “biodiesel” AND “Brasil”).

Do total de estudos encontrados, a seleção aconteceu de acordo com os chamados critérios de elegibilidade. Dentre os critérios de elegibilidade foram aceitos somente os idiomas português e inglês, artigos indexados e originais publicados em revistas científicas (processo por revisão por pares cegos), no período entre 2020 e 2024. A seleção dos artigos deu-se de acordo com as seguintes etapas:

1. Conferiu-se se o resumo possui informações importantes referentes ao uso de microalgas para a produção de biocombustíveis.
2. Quando o resumo não forneceu informações suficientes, foram analisadas as conclusões.
3. Não sendo suficiente, foi lido o trabalho completo.
4. Por fim, os trabalhos selecionados foram estudados integralmente para a confecção deste trabalho.

Os dados dos artigos selecionados foram analisados e a partir deles avaliou-se a viabilidade das microalgas como uma matéria prima alternativa para a produção de energia renovável.

3 Resultados e discussões

3.1 Seleção dos trabalhos

A busca bibliográfica retornou muitos artigos voltados à produção de bioenergia a partir de microalgas. Somente no período compreendido entre 2020 e 2024 obteve-se um total de 8352 manuscritos. O biodiesel foi o biocombustível mais citado nos trabalhos analisados (aproximadamente 70 % dos trabalhos em todo mundo). A figura 1 fornece informações quanto aos trabalhos publicados.

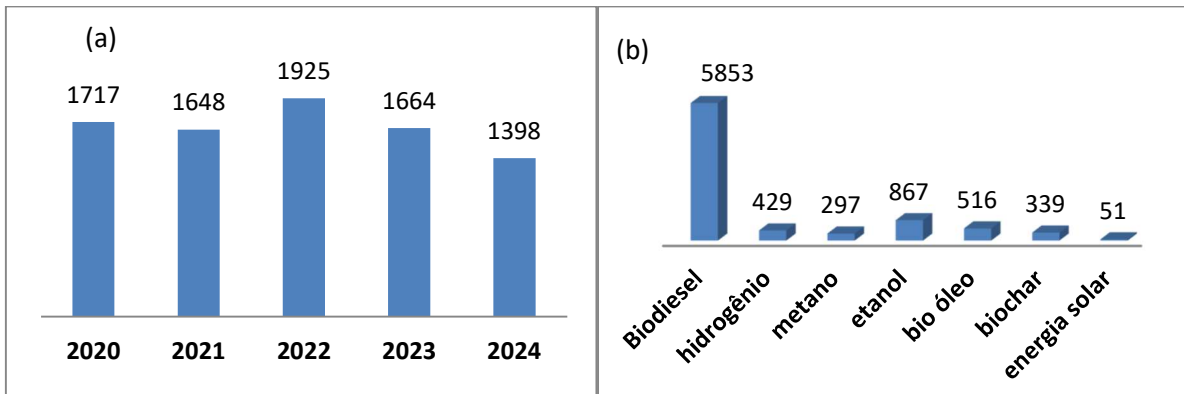


Figura 1. Gráficos com os trabalhos publicados: a) por ano, no período compreendido entre 2020 e 2024; b) por tipo de bioenergia produzida.

Quando a busca por trabalhos considerou somente publicações ocorridas em território nacional, foi obtido um total de 577 manuscritos, dos quais 272 visavam a produção de biodiesel a partir de algumas espécies de microalgas. A Figura 2 apresenta dados dos trabalhos produzidos no Brasil.

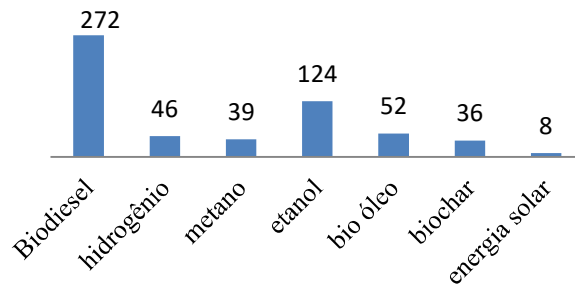


Figura 2. Gráficos com os trabalhos publicados no Brasil por tipo de bioenergia produzida.

Tanto no Brasil como nos demais países o biocombustível com maior número de publicações é o biodiesel. As principais razões apontadas são a alta produção deste biocombustível, bem como as rotas de reação para que o mesmo seja produzido. O etanol, biocombustível mais consumido em todo o mundo, vem logo em seguida no número de publicações. A figura 3 apresenta a porcentagem de trabalhos envolvendo os tipos de bioenergia estudados no Brasil e no mundo.

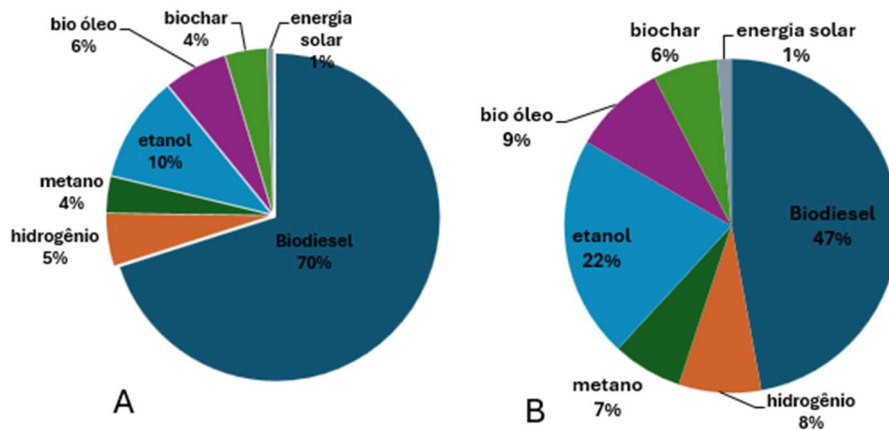


Figura 3. Porcentagem dos estudos relacionados a produção de bioenergia a partir de microalgas: a) no mundo; b) no Brasil.

3.2 Biocombustíveis obtidos de microalgas

3.2.1 Biodiesel

Principal biocombustível obtido a partir da biomassa de algas e microalgas, o biodiesel é um combustível composto por alquil ésteres de ácidos graxos produzidos através do processo de transesterificação de óleos e gorduras que apresenta a vantagem de não ser tóxico, além da melhor qualidade de suas emissões

(ANP, 2012). O processo de transesterificação é uma reação de óleos e gorduras com álcoois de cadeia curta, como o metanol, na presença de um catalisador ácido, básico ou enzimático. O produto da reação é uma mistura de ácidos graxos (o biodiesel) além de subprodutos, como o glicerol ou glicerina, de acordo com a reação abaixo (Knothe et al., 2006).

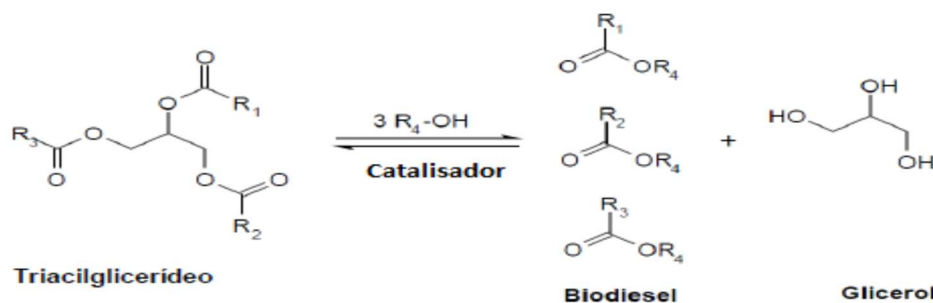


Figura 4. reação de transesterificação de um triglicerídeo. Fonte: Blatt (2014).

A principal rota para a produção de biodiesel é a partir de matérias primas de primeira geração como oleaginosas, com destaque para a soja. Além da soja, outras oleaginosas vêm sendo utilizadas, como algodão, macaúba, palma, dentre outras. Conforme já relatado, o uso de oleaginosas na produção de biocombustíveis gera algumas controvérsias, principalmente pela necessidade da utilização de grandes áreas para o cultivo, o que, de certa forma, compete com a produção de alimentos. Desse modo, a sociedade busca por fontes mais sustentáveis para a produção do biodiesel, com destaque para o uso de rejeitos ricos em lipídios como matéria prima, a exemplo da gordura animal residual (principalmente o sebo bovino) e o óleo de fritura (Rodrigues e Mistura, 2022).

Os estudos mais promissores estão voltados a produção de biodiesel a partir de algas e microalgas. Apesar de algumas limitações, principalmente relacionadas a fatores econômicos, os resultados obtidos apontam para uma forma mais sustentável de produção deste biocombustível. O que faz das microalgas importante matéria prima para produção do biodiesel é a quantidade de óleos presente nas células de algumas espécies. Franco et al. (2013) apresentaram um amplo estudo relacionando o conteúdo de óleo e a produtividade de algumas espécies. Segundo os autores, as microalgas da espécie *Chlorella sp* apresentam um maior teor de óleos em suas células, sendo as principais microalgas em estudo, conforme dados da Tabela 1:

Tabela 1. Conteúdo e produtividade de óleos de algumas espécies de microalgas do gênero *Chlorella*. Fonte: de Franco et al. (2013) adaptado.

Espécie	Conteúdo de óleo na matéria seca (%)	Produtividade (mg/L.dia)
<i>Chlorella protothecoides</i>	23-55	1214
<i>Chlorella vulgaris</i>	5-50	sem dados
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19-22	45

Araujo et al. (2020) apresentaram um estudo relacionado a produção de biodiesel a partir do cultivo de *Chlorella vulgaris* em um meio contendo ureia, fosfatos e algumas vitaminas. Os estudos apontaram uma influência negativa dos nutrientes na produção do biodiesel pois, apesar do aumento na taxa de crescimento das microalgas, foi observado que uma maior concentração dos nutrientes levou a uma redução na produtividade de óleos. Sousa et al. (2021) produziram um trabalho apresentando a possibilidade da obtenção de biomassa a partir de várias espécies de microalgas para a produção de biodiesel. Os estudos mostraram que as microalgas constituem matéria prima bastante promissora, porém é preciso que sejam efetuadas outras pesquisas a fim de otimizar a produção do biodiesel, principalmente quanto aos custos da produção. Segundo os autores, grande parte deste custo se deve a etapa de extração dos lipídios da biomassa produzida e com isso trabalhos vem buscando técnicas alternativas não apenas neste processo, mas também na tentativa de aumentar a produtividade de óleos a partir do estresse nutricional e do uso de catalisadores alternativos durante o processo de transesterificação.

Oguz et al. (2023) avaliaram em um estudo o rendimento de lipídios e de ácidos graxos além da qualidade do biodiesel produzido para duas espécies de microalgas: *Chlorella vulgaris* e *Botryococcus sudeticus*, sob condições de deficiência de nitrogênio. Apesar do impacto negativo na taxa de crescimento

das algas, a ausência de nitrogênio no meio aumentou o rendimento de lipídios e ésteres de ácidos graxos (crescimento de 21 a 28 %). Quanto ao biodiesel produzido, ele atendeu as normas de padrões europeus. O estudo é importante pois o aumento do teor de lipídios e ácidos graxos pode levar a produções mais econômicas.

Por serem ricas em nutrientes como fosfatos e nitratos, águas residuárias, principalmente derivadas de atividades agrícolas, constituem excelente meio para o cultivo de microalgas. Nestes casos, a produção de biodiesel é integrada a processos de remediação dessas águas, tornando o ciclo de produção mais sustentável.

Rana et al. (2024) utilizaram a espécie *Chlorella sp* para biorremediação de águas residuárias provenientes de escoamento agrícola e em um contexto de biorrefinaria integrada, produzir biodiesel a partir da biomassa de microalgas através de transesterificação enzimática. O biodiesel produzido apresentou um alto teor de ésteres de ácidos graxos (98,2 %). Além disso, a microalga *Chlorella sp* reduziu significativamente os teores de nitratos (95 %) e fosfato (91 %) do efluente avaliado. Além do biodiesel, obteve-se também biometano a partir da biomassa produzida.

Sudhanthiran e Perumalsamy (2022) avaliaram o cultivo de *Chlorella vulgaris* no tratamento de águas residuárias da indústria de laticínios com posterior produção de biodiesel. A espécie estudada apresentou um resultado promissor, com produtividade máxima de biomassa de 225 g/L por dia, obtendo um alto teor de lipídios e ésteres de ácidos graxos, adequados a produção do biodiesel. Quanto ao processo de biorremediação, houve a redução de 81,48 % da DQO (Demanda Química de Oxigênio) do efluente, 87,70 % do nitrogênio total e 93,5 % do fósforo total.

De Souza et al. (2022) utilizaram no estudo o chorume de aterro sanitário como meio de cultivo para a espécie *Scenedesmus sp*. A taxa de crescimento das microalgas no meio apresentou um crescimento de 80 % quando comparado a condições laboratoriais, resultando em uma produtividade de biomassa de 420 mg/L ao dia e de lipídios de 36 mg/L ao dia. Além da produção de biomassa rica em lipídios com proporção adequada de ésteres de ácidos graxos, que é desejável para a produção de biodiesel, a espécie estudada removeu diversos metais pesados como Cd, Cu, Al, entre outros, do efluente por meio de biossorção, indicando uma boa capacidade da espécie na remediação de águas residuárias com alto teor desses contaminantes.

O Brasil destaca-se como um dos líderes mundiais da produção de biodiesel, devido principalmente a sua grande extensão e condições climáticas, o que favorece o plantio de oleaginosas, como a soja. Outras oleaginosas, como dendê e a macaúba vem ganhando destaque nesse cenário, além do sebo bovino. Apesar de uma produção bem estabelecida de biodiesel 1G, o número de pesquisas visando a produção do biodiesel a partir de matérias primas alternativas é crescente, visando uma produção mais sustentável. Além da produção de biodiesel 2G (principalmente a partir do óleo de fritura e óleo residual de peixe), os estudos voltados a produção de biodiesel de terceira geração vem se intensificando. A Tabela 2 apresenta alguns estudos relacionados a produção de biodiesel a partir de microalgas realizados no Brasil no período entre 2020 e 2024 (Honorio, 2024).

A busca por catalisadores alternativos, como a casca de ovo, vem contribuindo para reduzir os custos e tornar o processo mais sustentável. A casca de ovo, rica em carbonato de cálcio (CaCO_3), quando calcinada a aproximadamente 800 °C produz óxido de cálcio, CaO. Esse composto funciona como um catalisador básico heterogêneo que, além de ser sustentável, apresenta longa vida útil no processo de catálise (Nadeem et al., 2021).

Importante frisar que os desafios econômicos relacionados à produção do biodiesel a partir de microalgas ainda são grandes. Por isso o desenvolvimento de pesquisas que promovam uma maior produção lipídica associada a processos de biorremediação e a geração de outros biocombustíveis, em um contexto de biorrefinaria integrada, se faz necessário. A cultura de microalgas em águas residuárias, por exemplo, permite a obter a produção de gases como hidrogênio e metano, além de combustíveis como o bio-óleo, obtido a partir da queima da biomassa residual da produção de biodiesel, o que torna o processo mais sustentável e econômico.

Tabela 2. Alguns trabalhos acadêmicos envolvendo a produção de biodiesel no Brasil a partir de microalgas no período entre 2020 e 2024. Fonte: Honorio (2024) adaptado.

Matéria prima	Estudo	Ref.
<i>Desmodemus sp</i>	Avaliaram o potencial biotecnológico das microalgas do gênero <i>Desmodemus</i> coletadas na represa do Irai, no Paraná.	Burgel et al., 2022
Diversas espécies	O estudo faz uma comparação dos biocombustíveis (biodiesel e etanol) 1G com obtidos por microalgas 3G	da Silva et al., 2021
Diversas espécies	Estudo de revisão avaliando a produção de biodiesel a partir da biomassa das seguintes espécies: <i>Chlorella sp.</i> , <i>Scenedemus sp.</i> , <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Botryococcus braunii</i> e <i>Spirulina sp</i>	Matos et al., 2021
<i>Scenedesmus obliquus</i> <i>Chlorella vulgaris</i>	Apresentaram dados do cultivo das espécies citadas em águas residuais, concluindo que necessitariam de áreas bem menores do que para o cultivo de oleaginosas para a produção da mesma quantidade de biodiesel.	Mendonça et al., 2022
Diversas espécies	Apresentaram um estudo corroborando que o país tem grande potencial para a produção de biodiesel 3G, com a produção em larga escala carecendo de mais estudos.	Lomeu et al., 2023
<i>Chlorella sp.</i>	Avaliou o rendimento da biomassa de microalgas em meio suplementado com glicerol, com a espécie estudada produzindo uma alta quantidade de lipídeos.	Amaral et al., 2022

3.2.2 Biogás

O biogás é um biocombustível produzido a partir da biodigestão anaeróbia, processo biológico que consiste na degradação de resíduos orgânicos que gera os gases hidrogênio e metano. A biodigestão anaeróbia envolve um estágio não metanogênico, no qual ocorre formação de ácidos orgânicos e hidrogênio, formado principalmente a partir da oxidação de álcoois a ácidos, e um estágio metanogênico, onde ácidos orgânicos formados no estágio anterior são catabolizados levando a formação de metano (Manfron, 1991). O processo de biodigestão anaeróbia apresenta um aspecto importante: como consiste no tratamento de resíduos orgânicos, diminui a carga poluidora destes, obtendo o biogás, além de biofertilizantes (Hughes, 1980). Dessa forma, obtém-se energia de forma sustentável, minimizando o impacto negativo de resíduos orgânicos no meio ambiente, proporcionando uma contribuição ecológica além da geração de energia (Giwa et al., 2020).

A composição do biogás é majoritariamente metano (CH₄), em torno de 60 a 70 %, e de 30 a 40 % de gás carbônico (CO₂). Além desses gases, pequena quantidade de hidrogênio (H₂), nitrogênio (N₂) e gás sulfídrico (HS) podem estar presentes (Souza e Rizato, 2022). A produção de hidrogênio e metano a partir de microalgas ocorre em biorreatores com condições de cultivo controladas, principalmente o pH, além da temperatura de cultivo e intensidade de luz, dentre outros (Benemann, 2000).

Satheesh et al. (2023) avaliaram a produção de hidrogênio a partir de algumas espécies de algas cultivadas em águas residuais domésticas ricas em nutrientes como nitrato, amônia, fosfato e nitrito. Um pré-tratamento ácido foi aplicado com a finalidade de desintegrar a biomassa das microalgas, fundamental para obtenção de biohidrogênio, seguido por um processo de fermentação. O pó de algas foi hidrolisado em ácido sulfúrico diluído (1,30 % p/p) por 15 minutos em uma temperatura de 160 °C, e em seguida transferido para reatores contendo nutrientes (NaCl, CaCl₂, MgCl₂, KH₂PO₄ e NH₄Cl), em pH 6,5, durante 15 dias. As espécies estudadas encontram-se na Tabela 3.

Os autores observaram que um aumento na quantidade de carboidratos produzida pelas microalgas aumenta a produção de biohidrogênio. A quantidade de carboidratos é aumentada quando as microalgas são colocadas em situação de estresse nutricional, como águas residuais, pois facilitaria a sobrevivência em um ambiente desfavorável. Os resultados mostram que o cultivo das espécies estudadas em águas

residuais como um meio nutriente levou a uma elevada produção de biomassa e a geração de biohidrogênio de forma sustentável (Satheesh et al., 2023).

Tabela 3. Microalgas cultivadas em águas residuais para a produção de biohidrogênio (Adaptado de Satheesh et al., 2023).

Espécie	Produção de biomassa (g/L)	Teor máximo de carboidratos (%)	Rendimento de biohidrogênio (mLH ₂ /g)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	0,71	33,21	45,50 ± 0,32
<i>Scenedesmus obliquus</i>	0,9	30,32	38,43 ± 0,43
<i>Chlorella sorokiana</i>	0,76	32,32	34,83 ± 1,82

Estudos apontam resultados promissores na produção de metano a partir de microalgas, onde as espécies analisadas apresentaram alto rendimento na geração do gás. Além disso, a redução de impactos ambientais negativos é relevante, devido à natureza sustentável do processo. Bohutsky et al. (2016) estudaram culturas de algas filamentosas (*Chlorella sorokiniana*) cultivadas em águas pluviais agrícolas, utilizando a remoção e reuso de nutrientes que, de outra forma, seriam escoados no meio ambiente. Já Klassen et al. (2020) avaliaram a produção de metano a partir de microalgas do gênero *Chalmydomonas* em condições xênicas atingindo alta eficiência na produção de metano, com 87 % da biomassa de algas convertida em metano. Ma et al. (2021) avaliaram a espécie *Nannochloropsis salina* em duas condições diferentes: um biodigestor alimentado com microalgas inteiras e outro biodigestor alimentado com biomassa residual das algas após extração de lipídios para produção de biodiesel. Apesar dos resultados apontarem uma maior obtenção de biometano a partir de células inteiras das microalgas estudadas (0.59 a 0.65 m³ CH₄/kg), o rendimento após a extração dos lipídios (0.29 a 0.42 m³ CH₄/kg) mostrou-se bastante relevante, visto que as microalgas serviram não apenas à produção de biometano, mas também ao biodiesel. Esse processo de reaproveitamento da biomassa residual das algas apresenta diversas vantagens ambientais e econômicas visto que a produção de biodiesel a partir de microalgas ainda é um processo considerado caro, e como o digestato obtido é rico em nutrientes, apresentou alto potencial para uso em fertilizantes.

Um das espécies mais estudadas é a *Chlorella vulgaris*. Dantie et al. (2021) cultivaram a espécie em água doce. O rendimento de biometano variou entre 250 e 300 mL CH₄/g, a depender do pré-tratamento aplicado (houve maior eficiência energética e liberação de nutrientes quando foi aplicado o pré-tratamento anaeróbico a uma temperatura de 55 °C, devido uma maior destruição de sólidos voláteis (SV), com uma redução de até 60 %. Já quando a temperatura de 85 °C foi aplicada durante o pré-tratamento, houve uma maior liberação de moléculas de proteínas e carboidratos. Ravi et al. (2024) obtiveram uma produção de 232.4 mL/g de biomassa de *Chlorella vulgaris*, em um estudo que avaliou tanto a eficiência energética quanto os parâmetros econômicos da produção do biometano, a partir da desintegração dupla da biomassa obtida após enfraquecimento da parede celular. Além do balanço energético positivo (uma taxa de energia de +0,12 GJ/dia) foi apresentado um lucro líquido de US\$ 9,6 por tonelada no processo. O estudo mostrou que, para produção de 1 kg de biomassa, aproximadamente 1.83 kg de CO₂ é fixado da atmosfera. Segundo os autores, o processo de desintegração dupla apresenta potencial para comercialização.

3.2.3 Bioetanol

A produção de etanol a partir de microalgas se dá pela conversão do amido e da celulose, por meio de processos de hidrólise, e é baseada na fermentação de açúcares. Como são ricas em polissacarídeos, as microalgas são fontes potenciais para a produção do etanol (Da Cruz et al., 2016). Este processo ainda apresenta custo elevado, pois é necessário que os lipídios sejam removidos antes da fermentação. A remoção dos lipídios se dá por rompimento das células via extração por solvente ou mecânica, deixando os carboidratos disponíveis para o processo de fermentação (Harun et al., 2009). Porém os custos podem ser reduzidos com o reaproveitamento desses lipídios na obtenção de outros biocombustíveis, como o biodiesel.

Müller et al. (2023) conduziram um estudo de revisão apresentando os principais desafios e oportunidades na produção de bioetanol a partir de macro e microalgas. A tabela 5 apresenta alguns dados representados pelos autores quanto a rendimento de diversas espécies para obtenção de bioetanol, dentre outras. Segundo os autores, o etanol obtido de algas e microalgas apresenta diversas possibilidades de aplicação, apresentando aspectos positivos.

Tabela 5. Obtenção de carboidratos e etanol a partir de espécies de algas. Fonte: Müller et al. (2023). Adaptado.

Espécie	Teor de carboidratos (%)	Teor de etanol (g/L)
<i>Gracilaria sp</i>	76,7	3,56
<i>Gelidium amansii</i>	77,2	13,27
<i>Ulva lactusa</i>	54,3	3,5
<i>Scenedesmus obliquus</i>	51,8	11,7

Banerjee et al. (2021) otimizaram o cultivo de *Chlamydomonas reinhardtii* para a produção de bioetanol com sequestro de CO₂, o que aumentou a biomassa de algas e a consequentemente produção de carboidratos, obtendo um rendimento de 0,49 gramas de etanol por grama de biomassa. A recuperação de energia obtida no processo foi de aproximadamente 41 % e, segundo os autores, o meio residual da fermentação do etanol é adequado para obtenção de metano. Sukwong et al. (2020) avaliaram a produção do bioetanol a partir da alga *Gracilaria verrucosa* obtendo um teor de 24,8 g/L de etanol após fermentação por *Saccharomyces cerevisiae*. Cardoso et al. (2020) obtiveram bioetanol a partir da biomassa de *Spirulina sp* em águas residuárias de aquicultura como meio de cultivo. A obtenção de alto teor de carboidratos (69,77 %) evidenciou um grande potencial para a produção de etanol.

Além das espécies apontadas, as microalgas do gênero *Chlorella* vem ganhando destaque nos estudos atuais. Condor et al. (2024) avaliaram a produção de etanol a partir da espécie *Chlorella vulgaris* cultivada em águas residuárias suínas como fonte de nutrientes. Foi obtida uma biomassa rica em carboidratos, teor máximo de 60 %, que foi hidrolisado em meio ácido e posteriormente fermentado por *Saccharomyces cerevisiae*, por 8 horas. Em uma escala ampliada (volume de 5 litros) foram produzidos 8,98 g/L de etanol em 8 horas. Os autores sugerem que estudos adicionais para a produção em escala ampliada sejam explorados, principalmente quanto a iluminação, aeração com CO₂ e teor de nutrientes. Em outro estudo conduzido pelo grupo, a espécie *Chlorella vulgaris* foi cultivada nas mesmas condições do estudo anterior, porém com alto teor de sólidos (200 g/L). A produtividade de etanol foi de 7,387 g/L.h, e a produtividade total, após 8 horas de fermentação foi de 43,9 g/L, dados que, segundo os autores, sugerem elevado potencial para produção do bioetanol de forma economicamente viável. A aeração do cultivo com CO₂ a uma concentração de 2 % elevou a concentração de biomassa em até 20 vezes, e sua influência foi considerada crucial, pois aumenta a biodisponibilidade de carbono para fixação fotossintética (Condor et al., 2022).

Megawati et al. (2022) desenvolveram um processo de hidrólise enzimática com glucoamilase atingindo um rendimento de 80 % de glicose em condições de 3 % em volume de enzima adicionada em pH 5 e temperatura de 80 °C por 5 horas, fermentada posteriormente por *Saccharomyces cerevisiae*. O rendimento de etanol foi de 4,80 g/L (foram utilizados 0,5 g de levedura em um tempo total de 30 horas de fermentação). Os estudos sugerem que as microalgas do gênero *Chlorella* apresentam grande potencial para obtenção do bioetanol.

Embora a produção de bioetanol a partir da biomassa de microalgas precise ser otimizada, principalmente quanto a viabilidade econômica, os estudos apresentam resultados bastante promissores quanto a sustentabilidade, principalmente pela utilização de resíduos como meio de cultivo, além de garantir segurança alimentar, podendo, no futuro, substituir grandes áreas de cultivo de cana e milho para produção de etanol.

3.2.4 Bio-óleo

O bio-óleo é um líquido de cor negra que pode ser obtido a partir da pirólise da biomassa, podendo ser utilizado em caldeiras, fornos e motores, além de servir de matéria prima para produtos químicos. A pirólise consiste na queima e degradação da biomassa em temperaturas que variam entre 350 °C e 700 °C (Cardoso et al., 2011). Segundo estudos, o bio-óleo obtido a partir de microalgas apresenta uma qualidade superior ao bio-óleo obtido a partir de outros tipos de biomassa, como a madeira, serragem, bagaço de cana, resíduos agrícolas, dentre outros (Miao et al., 2004).

Devido ao baixo impacto ambiental e a elevada capacidade de produção, a biomassa de microalgas tem se tornado uma opção viável para obtenção do bio-óleo. A composição química da microalga é fator crucial para um bom rendimento, com os lipídios sendo os principais componentes, seguidos por proteínas e carboidratos (Ahmed et al., 2023). Uma alternativa para atingir exploração máxima da

biomassa de microalgas é a pirólise de todos os resíduos convertendo-os em bio-óleo após utilização dos lipídios para produção de biodiesel (Sahi et al., 2020).

Todas as espécies de microalgas apresentam elevado potencial para a produção de bio-óleo. Sahi et al. (2020) avaliaram a produção de bio-óleo a partir da biomassa residual da microalga *Dunaliella sp* após conversão dos lipídios em biodiesel, com pirólise a 350 °C por 60 minutos e pressão de 200 bar, obtendo um rendimento de 11,81 % p/p em produção de bio-óleo. Mustapha et al. (2023) obtiveram bio-óleo a partir da pirólise de microalgas da espécie *Scenedemus obliquus*, em condições com e sem estresse por nutrientes, e após a extração de lipídios para produção de biodiesel. Os autores afirmam que o estresse por nutrientes alterou a composição bioquímica das microalgas, e o rendimento de bio-óleo obtido foi de 46,37 % p/p, enquanto para o grupo que não passou pelo estresse de nutrientes o rendimento foi de 41,94 % em peso. O estudo mostrou que, além do maior rendimento, o estresse de nutrientes produziu um bio-óleo de melhor qualidade, com um maior teor de hidrocarbonetos e diminuição no teor de compostos nitrogenados.

Piloni et al. (2021) investigaram a pirólise das espécies *Botryococcus braunii*, *Spirulina platensis* e *Pithophora sp*. Apesar do alto rendimento de 45 %, o bio-óleo obtido a partir da pirólise da *Spirulina platensis* apresentou alto teor de compostos contendo nitrogênio, sobretudo aminas, o que diminui consideravelmente a qualidade do combustível. Já a espécie *Botryococcus braunii* apresentou um alto teor de lipídios em sua composição, sendo uma excelente matéria prima para obtenção de biodiesel, fornecendo um óleo após a pirólise rico em hidrocarbonetos e derivados de álcoois, com rendimento máximo de 65 %. Segundo os autores, o óleo produzido possui um valor de aquecimento de 45 MJ/Kg, podendo ser usado como fonte para obtenção de outros combustíveis.

Priharto et al. (2020) investigaram a pirólise de duas espécies de microalgas *Nannochloropsis gaditana* e *Scenedesmus almeriensis*. A pirólise foi seguida por um hidrotreatamento catalítico com NiMo em alumina, produzindo óleos ricos em hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, com rendimentos de aproximadamente 31 % de bio-óleo.

Além do aproveitamento de lipídios para a obtenção de biodiesel, o bio-óleo pode também ser produzido a partir de biomassa residual de algas para a produção de etanol. Li et al. (2021) propuseram uma metodologia para a coprodução de bioetanol e bio-óleo a partir da biomassa de três espécies de macroalgas: *Enteromorpha prolifera*, *Undaria pinnatifida* e *Gelidium amansii* por hidrólise e fermentação para obtenção do bioetanol e conversão dos resíduos em bio-óleo por liquefação. O estudo mostrou uma grande produtividade em açúcares, principalmente a partir da espécie *Gelidium amansii*, obtendo um teor de até 9,09 g/L de bioetanol. Quanto ao bio-óleo produzido, todos apresentaram menor teor de oxigênio e maior valor de aquecimento (até 45,12 MJ/Kg), evidenciando um grande potencial para a coprodução de bioetanol e bio-óleo de alta qualidade.

Além do bio-óleo, a pirólise da biomassa algal leva também a produção de biochar. O biochar ou biocarvão é um composto sólido rico em carbono, obtido a partir da pirólise em altas temperaturas na ausência de oxigênio, podendo ser utilizado também como fertilizante para sumidouro subterrâneo de carbono (Adeniyi et al., 2018).

Costa et al. (2023) avaliaram a importância da produção de biochar a partir da biomassa de microalgas cultivadas em águas residuárias e listaram a partir de levantamento bibliográfico diversas espécies de microalgas com potencial para obtenção de biochar, com destaque para a microalga *Chlorella sp*, que apresentou rendimento de até 57 %, segundo estudo conduzido por Amin e Chetpattananondh (2019). Em outro trabalho do grupo, foi produzido biochar a partir de resíduos sólidos marinhos de *Chlorella sp*, obtendo rendimento de 45 % de biochar com pirólise a 450 °C. O biochar obtido possui estrutura porosa com a superfície contendo grupos como OH, Mg, Al, K e P, tornando-os adsorventes altamente adequados para tratamento de águas residuárias (Amin et al., 2020).

Zhang et al. (2020) otimizaram condições de cultivo da espécie *Scenedesmus acuminatus* em fermentadores de bancada (7,5 litros) e em escala piloto (1000 litros), obtendo até 283,5 g/L de biomassa. Já Yu et al. (2020) estudaram a coprodução de biochar e açúcar, aproveitado para produção de bioetanol, a partir da biomassa de *Chlorella sp*, obtendo rendimento de até 74,6 % de biochar.

3.2.5 Energia biofotovoltaica

Apesar de pouco exploradas, pesquisas envolvendo a produção de painéis fotovoltaicos para obtenção de energia solar a partir de microalgas vem fornecendo resultados promissores. A energia proveniente da luz pode ser aproveitada através da fotossíntese, podendo levar a produção de combustíveis e insumos químicos (Anderson et al., 2016).

A produção de painéis biofotovoltaicos ocorre a partir da utilização de organismos fotossintetizantes, como algumas espécies de algas, que capturam energia solar gerando corrente elétrica (Zhu et al., 2023). Quando comparada à energia fotovoltaica, a energia biofotovoltaica apresenta grandes vantagens ecológicas, devido os materiais fotossintéticos serem atóxicos e renováveis. Além disso, os painéis biofotovoltaicos podem gerar energia elétrica à noite, através da oxidação de metabólitos intracelulares, ao contrário dos painéis fotovoltaicos, que produzem corrente elétrica a partir da conversão direta de energia solar. Outra vantagem é o fato do painel biofotovoltaico ser capaz de armazenar energia, o que é uma grande vantagem em termos de sustentabilidade (Anderson et al. 2016).

Fong-Lee et al. (2021) utilizaram cultura de *Chlorella sp* no processo de biorremediação de efluentes gerados no processamento do óleo de palma, gerando bioeletricidade diretamente da fotossíntese realizada pela cultura de algas. Após um período de 12 dias as microalgas apresentaram uma densidade de potência máxima de 0,45 mW/m². Segundo os autores, além do tratamento dos resíduos gerados e da remoção de carbono da atmosfera para realização da fotossíntese, o sistema desenvolvido apresenta potencial para geração de energia sustentável neutra em carbono.

Raja et al. (2022) avaliaram as espécies de microalgas *Coelastrella sp* para geração de bioeletricidade simultaneamente ao tratamento de efluentes de laticínios. Além do alto potencial para remoção de nutrientes das águas residuárias, foram observadas redução significativa nos teores de N, P, DBO e DQO, a espécie foi capaz de produzir eletricidade, obtendo uma densidade de corrente de 31,4 mW/m².

Petrova et al. (2024) rastream cepas da alga verde *Parachlorella kessleri* para produção de bioeletricidade, obtendo resultados bastante promissores, porém carecendo de mais estudos. Abdulla et al. (2024) estudaram a captura de CO₂ aliada à produção de eletricidade a partir de algas marinhas em malha de cobre, que atuou como um material anódico. O sistema apresentou uma eficiência de 89,1 % na captura de CO₂, além de uma elevada descarga de elétrons. Os autores relatam obstáculos técnicos na produção de painéis biofotovoltaicos, sendo necessários mais estudos para que sejam de fato efetivados.

Segundo Zhu e Li (2023) a tecnologia baseada em painéis biofotovoltaicos representa a mais sustentável conversão de energia solar em eletricidade. Alguns obstáculos limitam a saída de energia desses painéis, o que demanda estudos para elucidar os mecanismos de produção de bioeletricidade, aumentando assim o interesse e a aceitabilidade desta tecnologia.

3.2.6 O conceito de biorrefinarias integradas como alternativa econômica a produção de biocombustíveis

Os estudos evidenciam que os principais problemas para a produção em escala comercial de biocombustíveis de terceira geração estão associados a fatores econômicos, embora a viabilidade técnica dessa produção esteja confirmada. Há algumas formas de superar os entraves econômicos, uma delas está relacionada ao meio de cultivo. Microalgas podem ser cultivadas em efluentes domésticos, agropecuários e industriais, retirando destes meios nutrientes para o seu crescimento. Além da remoção de nutrientes, essa técnica de cultivo tem se mostrado eficiente no tratamento de efluentes, conforme apresentado em diversos estudos. Esses efluentes, quando não tratados causam graves problemas ambientais como poluição dos corpos hídricos, eutrofização, entre outros, que tornam o seu tratamento é imprescindível. No processo de degradação do efluente, ocorre a digestão do material orgânico presente, gerando o biogás como subproduto.

Outra forma de amenizar os custos da produção de biocombustíveis 3G está na produção simultânea de duas ou mais formas de energia. O conceito de biorrefinaria integrada reduz gastos com insumos químicos, materiais e energia, minimizando a geração de efluentes. As microalgas podem ser cultivadas em condições para a produção de um biocombustível, por exemplo, o etanol, e a biomassa residual servir a produção de bio-óleo. A pirólise pode ser realizada após os processos de transesterificação, fermentação ou digestão anaeróbia, integrando a produção de bio-óleo aos outros biocombustíveis produzidos. Algumas espécies de microalgas, como a *Chlorella sp* mostram-se eficientes tanto na produção de biodiesel quanto na produção de bioetanol, além da obtenção de biogás quando cultivadas em efluentes agropecuários.

A otimização através de estudos das biorrefinarias microalgais integradas para a produção de biocombustíveis pode tornar a obtenção de energia mais eficiente e sustentável, contribuindo assim para minimizar um dos maiores problemas do planeta na atualidade.

4 Conclusões

Estudos indicam que a produção de biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas é uma realidade promissora na redução à emissão de gases causadores do efeito estufa. Além da produção de substâncias necessárias à obtenção de combustíveis, o cultivo de microalgas contribui para a remoção de CO₂ da atmosfera durante o processo de fotossíntese. Estudos evidenciam a viabilidade técnica da utilização de microalgas na geração de diversos tipos de bioenergia.

- a) Muitas espécies possuem elevado potencial para a produção de biomassa, o que favorece a produção de biocombustíveis. Técnicas para o aumento da produtividade da biomassa podem ser aplicadas, como o estresse por nutrientes, levando a ganhos não somente no crescimento das algas, mas no rendimento de lipídios, carboidratos, e produção de gases;
- b) Apesar de tecnicamente viável, a produção de biodiesel ainda esbarra na barreira econômica e as biorrefinarias integradas surgem como uma alternativa a tal limitação. A produção de biocombustíveis diferentes a partir de uma mesma cultura de microalgas pode reduzir consideravelmente os custos da produção e aumentar a sustentabilidade do processo também reduzindo resíduos. A queima da biomassa residual da produção de biodiesel ou bioetanol pode, por exemplo, produzir o bio-óleo, matéria prima na produção de outros biocombustíveis;
- c) O crescimento de microalgas junto a águas residuárias, principalmente originadas de processos agrícolas, pode aumentar a produção de substâncias como lipídios, carboidratos e proteínas, usados na produção de biocombustíveis. Paralelo a produção, as microalgas apresentam grande capacidade de remediação das águas residuárias onde são cultivadas;
- d) Além da remediação de águas residuárias, o crescimento de microalgas em tal meio pode levar a produção de gases como o biohidrogênio e o biometano, obtidos por degradação anaeróbia de resíduos orgânicos presentes nesses efluentes;
- e) As microalgas são capazes de produzir bioenergia não somente na forma de biocombustíveis, mas de energia solar. A produção de painéis biofotovoltaicos que utilizam a fotossíntese desses organismos para produção de corrente elétrica vem sendo estudada como uma alternativa promissora aos painéis atuais.

Em vista do apresentado, as microalgas apresentam-se como matérias primas promissoras para a produção de bioenergia sendo atraente do ponto de vista econômico e tornando o processo, mais verde e sustentável, contribuindo para a redução das emissões de carbono e sem competir com a produção de alimentos no campo, o que pode contribuir para a segurança alimentar.

Agradecimentos

Os autores agradecem: FAPERJ – Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro. UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Referências bibliográficas

- Al Abdulla, S.A., Al Hammadi, K., Al-Ali, H., Alami, A.H., Abdelkareem, M.A., Olabi, A.G. (2024), “Experimental development of a biological photovoltaic cell (BPV) for energy conversion and simultaneous CO₂ capture by utilizing marine microalgae on copper mesh”, *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 223, doi: 10.1016/j.renene.2024.120096.
- Adeniyi, O.M., Azimov, U., Burluka, A. (2018), “Algae biofuel: Current status and future applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier Ltd, 1 July, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.067.
- Ahmed, S.F., Rafa, S.J., Mehjabin, A., Tasannum, N., Ahmed, S., Mofijur, M., Lichtfouse, E., Almomani, F., Braduddin, I., Kamangar, S. (2023), “Bio-oil from microalgae: Materials, production, technique, and future”, *Energy Reports*, Vol. 10, pp. 3297–3314, doi: 10.1016/j.egy.2023.09.068.
- Alves de Souza Panta, D., Pessôa Diniz da Silva, M., Da Silva Gloria, J., Eliza Gama Vieira, G. (2021), “Microalgas como uma alternativa sustentável na produção de biocombustíveis 3G”, *Desafios - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins*, Universidade Federal do Tocantins, Vol. 8 No. 3, pp. 58–76, doi: 10.20873/uftv8-11171.

- Amin, M., Chetpattananondh, P. (2019), “Biochar from extracted marine *Chlorella* sp. residue for high efficiency adsorption with ultrasonication to remove Cr(VI), Zn(II) and Ni(II)”, *Bioresource Technology*, Vol. 289, p. 121578, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121578.
- Amin, M., Chetpattananondh, P., Khan, M.N. (2020), “Ultrasound assisted adsorption of reactive dye-145 by biochars from marine *Chlorella* sp. extracted solid waste pyrolyzed at various temperatures”, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8 No. 6, p. 104403, doi: 10.1016/j.jece.2020.104403.
- Anderson, A., Laohavisit, A., Blaby, I.K., Bombellii, P., Howe, C.J., Merchabt, S.S. (2016) “Exploiting algal NADPH oxidase for biophotovoltaic energy”, *Plant Biotechnology Journal*, Vol. 14, n. 1, pp. 22-28. doi: doi.org/10.1111/pbi.12332
- Araujo, G.S., Lopes, D.N.M., da Silva Santiago, C., da Silva, J.W.A., Fernandes, F.A.N. (2020), “Influence of nutrients on biomass and oil yield from microalgae *Chlorella vulgaris* for biodiesel production”, *Revista Ciencia Agronomica*, Universidade Federal do Ceara, Vol. 51 No. 1, pp. 1–8, doi: 10.5935/1806-6690.20200008.
- Banerjee, S., Ray, A., Das, D. (2021), “Optimization of *Chlamydomonas reinhardtii* cultivation with simultaneous CO₂ sequestration and biofuels production in a biorefinery framework”, *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., Vol. 762, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143080.
- Bariloche, F. (n.d.). *SCIENCE AND ACADEMIA AEE-Institute for Sustainable Technologies (AEE-INTEC) Council on Energy, Environment and Water (CEEW)*.
- BLATT, G. G. Utilização de cromatografia líquida em coluna, em camada delgada e de alta eficiência na separação, isolamento e identificação dos mono-, di- e triacilgliceróis do biodiesel. 2014. Tese de Doutorado — Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- Bohutskyi, P., Chow, S., Ketter, B., Fung Shek, C., Yacar, D., Tang, Y., Zivojnovich, M., Betenbaugh, M., Bouwer, E. (2016), “Phytoremediation of agriculture runoff by filamentous algae poly-culture for biomethane production, and nutrient recovery for secondary cultivation of lipid generating microalgae”, *Bioresource Technology*, Vol. 222, pp. 294–308, doi: 10.1016/j.biortech.2016.10.013.
- BRASIL. ANP - Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis. Resolução nº 14, de 18 de maio de 2012. Especificação do Biodiesel.
- Burgel, G., Ribas, P.G., Ferreira, P.C., Passos, M.F., Santos, B., Savi, D.C., Ludwig, T.A.V., Vargas, J., Galli-Terasawa, L., Kava, V. (2022), “Morphology, molecular phylogeny and biomass evaluation of *Desmodesmus abundans* (Scenedesmaceae-Chlorophyceae) from Brazil”, *Brazilian Journal of Biology*, Instituto Internacional de Ecologia, Vol. 82, doi: 10.1590/1519-6984.265235.
- C, S.M., Perumalsamy, M. (2024), “Bioremediation of dairy industry wastewater and assessment of nutrient removal potential of *Chlorella vulgaris*”, *Biomass Conversion and Biorefinery*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, Vol. 14 No. 9, pp. 10335–10346, doi: 10.1007/s13399-022-03068-x.
- Cardoso, A.S., Vieira, G.E.G., Marques, A.K. (2011) “O uso de microalgas para obtenção de biocombustíveis”, *Revista Brasileira de Biociências*, v.9, n.4, pp. 542-549.
- Cardoso, L.G., Duarte, J.H., Andrade, B.B., Lemos, P.V.F., Costa, J.A.V., Druzian, J.I., Chinalia, F.A. (2020), “Spirulina sp. LEB 18 cultivation in outdoor pilot scale using aquaculture wastewater: High biomass, carotenoid, lipid and carbohydrate production”, *Aquaculture*, Elsevier B.V., Vol. 525, doi: 10.1016/j.aquaculture.2020.735272.
- Condor, B.E., de Luna, M.D.G., Chang, Y.-H., Chen, J.-H., Leong, Y.K., Chen, P., Chen, C., Lee, D., Chang, J. (2022), “Bioethanol production from microalgae biomass at high-solids loadings”, *Bioresource Technology*, Vol. 363, p. 128002, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128002.
- Condor, B.E., de Luna, M.D.G., Lacson, C.F.Z., Acebu, P.I.G., Abarca, R.R.M., Nagarajan, D., Lee, D., Chang, J. (2024), “Effects of carbon dioxide concentration and swine wastewater on the cultivation of *Chlorella vulgaris* FSP-E and bioethanol production from microalgae biomass”, *Applied Energy*, Vol. 369, p. 123617, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123617.
- Costa, J.A.V., Zapparoli, M., Cassuriaga, A.P.A., Cardias, B.B., Vaz, B. da S., Morais, M.G., Moreira, J.B. (2023), “Biochar production from microalgae: a new sustainable approach to wastewater treatment based

- on a circular economy”, *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 169, p. 110281, doi: 10.1016/j.enzmictec.2023.110281.
- Damtie, M.M., Shin, J., Jang, H.M., Cho, H.U., Wang, J., Kim, Y.M. (2021), “Effects of biological pretreatments of microalgae on hydrolysis, biomethane potential and microbial community”, *Bioresource Technology*, Vol. 329, p. 124905, doi: 10.1016/j.biortech.2021.124905.
- Fong-Lee, N., Phang, S., Thong, C., Periasamy, V., Pindah, J., Yunus, K., Fisher, A.C. (2021) “Integration of bioelectricity generation from algal biophotovoltaic (BPV) devices with remediation of palm oil mill effluent (POME) as substrate for algal growth”, *Environmental Technology & Innovation*, vol. 21, pp. 1-18. doi: doi.org/10.1016/j.eti.2020.101280
- Honório, G.G., da Cunha, J.N., dos Santos Castro Assis, K.L., de Aguiar, P.F., de Andrade, D.F., de Souza, C.G., d’Avila, L.A., Archanjo, B., Achete, C., Pradelle, R., Turcovic, F., Neto, R., D’Elia, E. (2019), “Free glycerol determination in biodiesel samples using palladium nanoparticles modified glassy carbon electrode associated with solid phase extraction”, *Journal of Solid State Electrochemistry*, Springer New York LLC, Vol. 23 No. 11, pp. 3057–3066, doi: 10.1007/s10008-019-04387-2.
- Honorio, G. G. Panorama da produção de biodiesel no Brasil. In: ANAIS DO V COBICET - Congresso Brasileiro Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia, 2024. Anais do V COBICET - Congresso Brasileiro Interdisciplinar de Ciência e Tecnologia. [S. l.: s. n.].
- IPCC – International Panel Climate Change. 2023: Summary for Policymakers. Geneva: [s. n.]. 182 p.
- IEA – International Energy Agency. Sumário executivo – World Energy Outlook 2024 – Analysis. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024/executive-summary?language=pt>. Acesso em: 26 out. 2024.
- Jin, H., Zhang, H., Zhou, Z., Li, K., Hou, G., Xu, Q., Chuai, W., Zhang, C., Han, D., Hu, Q. (2020), “Ultrahigh-cell-density heterotrophic cultivation of the unicellular green microalga *Scenedesmus acuminatus* and application of the cells to photoautotrophic culture enhance biomass and lipid production”, *Biotechnology and Bioengineering*, John Wiley and Sons Inc., Vol. 117 No. 1, pp. 96–108, doi: 10.1002/bit.27190.
- Kannah Ravi, Y., Kavitha, S., Al-Qaradawi, S.Y., Rajesh Banu, J. (2024), “Dual disintegration of microalgae biomass for cost-effective biomethane production: Energy and cost assessment”, *Bioresource Technology*, Vol. 399, p. 130630, doi: 10.1016/j.biortech.2024.130630.
- Klassen, V., Blifernez-Klassen, O., Bax, J., Kruse, O. (2020), “Wastewater-borne microalga *Chlamydomonas* sp.: A robust chassis for efficient biomass and biomethane production applying low-N cultivation strategy”, *Bioresource Technology*, Vol. 315, p. 123825, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123825.
- Li, C., Liu, Z., Ning, D., Pan, J., Li, J. (2021), “Co-Production of Bio-Ethanol and Bio-Oil from Different Species of Macroalgae”, *ChemistrySelect*, John Wiley and Sons Inc, Vol. 6 No. 9, pp. 2424–2427, doi: 10.1002/slct.202004518.
- Lôbo, I.P., Luis, S., Ferreira, C., Serpa Da Cruz, R. (1996), *BIODIESEL: PARÂMETROS DE QUALIDADE E MÉTODOS ANALÍTICOS*, *Quim. Nova*, Vol. 32.
- Lomeu, A.A., de Mendonça, H. V., Mendes, M.F. (2023), “Microalgae as raw material for biodiesel production: perspectives and challenges of the third generation chain”, *Engenharia Agrícola*, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v43nepe20220087/2023.
- Luiz Custódio Franco, A., Pinheiro Lôbo Rosenira Serpa da Cruz, I., Maria Luz Lapa Teixeira, C., Adolfo de Almeida Neto, J., Silva Menezes, R. (2013), Biodiesel de Microalgas: Avanços e Desafios, *Quim. Nova*, Vol. 36.
- Ma, J., Li, L., Zhao, Q., Yu, L., Frear, C. (2021), “Biomethane production from whole and extracted algae biomass: Long-term performance evaluation and microbial community dynamics”, *Renewable Energy*, Vol. 170, pp. 38–48, doi: 10.1016/j.renene.2021.01.113.
- Manfron, M.P. (1991), “Biodigestão Anaeróbica: uma alternativa para usina de laticínios”, *Ciência Rural*, v.21, n.1, pp. 145-152. doi: 10.1590/S0103-84781991000100015
- Manual do Biodiesel. Curitiba: Editora Blucher, 2006. 340 p. ISBN 978-85-212-0405-3.

- Matos, Â.P. (2021), “Advances in Microalgal Research in Brazil”, *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Instituto de Tecnologia do Parana, Vol. 64, pp. 1–15, doi: 10.1590/1678-4324-2021200531.
- Megawati, Bahlawan, Z.A.S., Damayanti, A., Putri, R.D.A., Triwibowo, B., Prasetiawan, H., Aji, S.P.K., Prawisnu, A. (2022), “Bioethanol production from glucose obtained from enzymatic hydrolysis of *Chlorella* microalgae”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 63, pp. S373–S378, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.551.
- de Mendonça, H.V., Otenio, M.H., Marchão, L., Lomeu, A., de Souza, D.S. and Reis, A. (2022), “Biofuel recovery from microalgae biomass grown in dairy wastewater treated with activated sludge: The next step in sustainable production”, *Science of the Total Environment*, Elsevier B.V., Vol. 824, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153838.
- Miao, X., Wu, Q., Yang, C. (2004), “Fast pyrolysis of microalgae to produce renewable fuels”, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 71 No. 2, pp. 855–863, doi: 10.1016/j.jaap.2003.11.004.
- Müller, C., Scapini, T., Rempel, A., Abaide, E.R., Camargo, A.F., Nazari, M.T., Tadioto, V., Bonato, C., Tres, M., Zabot, G., Colla, L., Treichel, H., Alves, S. (2023), “Challenges and opportunities for third-generation ethanol production: A critical review”, *Engineering Microbiology*, Elsevier Inc., 1 March, doi: 10.1016/j.engmic.2022.100056.
- Mustapha, S.I., Mohammed, U.A., Rawat, I., Bux, F., Isa, Y.M. (2023), “Production of high-quality pyrolytic bio-oils from nutrient-stressed *Scenedesmus obliquus* microalgae”, *Fuel*, Vol. 332, p. 126299, doi: 10.1016/j.fuel.2022.126299.
- Nadeem, F., Bhatti, I.A., Ashar, A., Yousaf, M., Iqbal, M., Mohsin, M., Nisar, J., Taman, N., Alwadai, N. (2021), “Eco-benign biodiesel production from waste cooking oil using eggshell derived MM-CaO catalyst and condition optimization using RSM approach”, *Arabian Journal of Chemistry*, Elsevier B.V., Vol. 14 No. 8, doi: 10.1016/j.arabjc.2021.103263.
- Nazari, M.T., Mazutti, J., Basso, L.G., Colla, L.M., Brandli, L. (2021), “Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review”, *Environment, Development and Sustainability*, Vol. 23 No. 8, pp. 11139–11156, doi: 10.1007/s10668-020-01110-4.
- Ng, F.L., Phang, S.M., Thong, C.H., Periasamy, V., Pindah, J., Yunus, K., Fisher, A.C. (2021), “Integration of bioelectricity generation from algal biophotovoltaic (BPV) devices with remediation of palm oil mill effluent (POME) as substrate for algal growth”, *Environmental Technology and Innovation*, Elsevier B.V., Vol. 21, doi: 10.1016/j.eti.2020.101280.
- ONU – Organização das Nações Unidas. Causas e efeitos das mudanças climáticas. Disponível em: <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change>. Acesso em: 26 out. 2024.
- Oğuz, A., Köker, L., Ozbayram, E.G., Akcaalan, R., Albay, M. (2024), “Biodiesel Production from *Botryococcus sudeticus* and *Chlorella vulgaris*: Assessment of Nitrogen Deficiency on Lipid, Fame Yield and Biodiesel Properties”, *Waste and Biomass Valorization*, Springer Science and Business Media B.V., Vol. 15 No. 5, pp. 2757–2768, doi: 10.1007/s12649-023-02359-2.
- Petrova, N.Z., Tóth, T.N., Shetty, P., Maróti, G., Tóth, S.Z. (2024), “Enhancing biophotovoltaic efficiency: Study on a highly productive green algal strain *Parachlorella kessleri* MACC-38”, *Bioresource Technology*, Elsevier Ltd, Vol. 394, doi: 10.1016/j.biortech.2023.130206.
- Piloni, R. V., Daga, I.C., Urcelay, C., Moyano, E.L. (2021), “Experimental investigation on fast pyrolysis of freshwater algae. Prospects for alternative bio-fuel production”, *Algal Research*, Elsevier B.V., Vol. 54, doi: 10.1016/j.algal.2021.102206.
- Priharto, N., Ronsse, F., Prins, W., Carleer, R., Heeres, H.J. (2020), “Experimental studies on a two-step fast pyrolysis-catalytic hydrotreatment process for hydrocarbons from microalgae (*Nannochloropsis gaditana* and *Scenedesmus almeriensis*)”, *Fuel Processing Technology*, Elsevier B.V., Vol. 206, doi: 10.1016/j.fuproc.2020.106466.
- Raja, S.W., Thanuja, K.G., Karthikeyan, S., Marimuthu, S. (2022), “Exploring the concurrent use of microalgae *Coelastrella* sp. for electricity generation and dairy wastewater treatment”, *Bioresource Technology Reports*, Elsevier Ltd, Vol. 17, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100889.

Rana, Q. ul ain, Latif, S., Perveen, S., Haq, A., Ali, S., Irfan, M., Gauttam, R., Shah, T., Dawoud, T., Wondmie, G., Bourhia, M., Badshah, M. (2024), “Utilization of microalgae for agricultural runoff remediation and sustainable biofuel production through an integrated biorefinery approach”, *Bioresources and Bioprocessing*, Springer, Vol. 11 No. 1, doi: 10.1186/s40643-023-00720-w.

Satheesh, S., Pugazhendi, A., Al-Mur, B.A., Balasubramani, R. (2023), “Biohydrogen production coupled with wastewater treatment using selected microalgae”, *Chemosphere*, Vol. 334, p. 138932, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138932.

Schenk, P.M., Thomas-Hall, S.R., Stephens, E., Marx, U.C., Mussgnug, J.H., Posten, C., Kruse, O., Hankamer, B. (2008), “Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production”, *BioEnergy Research*, Springer Science and Business Media LLC, Vol. 1 No. 1, pp. 20–43, doi: 10.1007/s12155-008-9008-8.

Shahi, T., Beheshti, B., Zenouzi, A., Almasi, M. (2020), “Bio-oil production from residual biomass of microalgae after lipid extraction: The case of *Dunaliella* Sp”, *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, Vol. 23, p. 101494, doi: 10.1016/j.bcab.2020.101494.

Sousa, A.L. and Rizzatto, M.L. (2022), “Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão”, *Scientific Electronic Archives*, Scientific Electronic Archives, Vol. 15 No. 2, doi: 10.36560/15220221511.

de Souza, L., Lima, A.S., Matos, Â.P., Wheeler, R.M., Bork, J.A., Vieira Cubas, A.L., Moecke, E.H.S. (2021), “Biopolishing sanitary landfill leachate via cultivation of lipid-rich *Scenedesmus* microalgae”, *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, Vol. 303, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127094.

Sukwong, P., Sunwoo, I.Y., Jeong, D.Y., Kim, S.R., Jeong, G.T., Kim, S.K. (2020), “Improvement of bioethanol production by *Saccharomyces cerevisiae* through the deletion of *GLK1*, *MIG1* and *MIG2* and overexpression of *PGM2* using the red seaweed *Gracilaria verrucosa*”, *Process Biochemistry*, Elsevier Ltd, Vol. 89, pp. 134–145, doi: 10.1016/j.procbio.2019.10.030.

Torres Amaral, E., Alves, G., Julich, J., Da Silva, M.B., De Souza, C. G., Hoeltz, M., De Souza, S. R. Britez, B.L. (2022), “Sanitary Wastewater Supplemented with Glycerol to Obtain Lipid-Rich Microalgal Biomass”, *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, doi: 10.18502/jehsd.v7i4.11431.

Varaprasad, D., Narasimham, D., Paramesh, K., Sudha, N.R., Himabindu, Y., Keerthi Kumari, M., Parveen, S.N., Chandrasekhar, T. (2021), “Improvement of ethanol production using green alga *Chlorococcum minutum*”, *Environmental Technology (United Kingdom)*, Taylor and Francis Ltd., Vol. 42 No. 9, pp. 1383–1391, doi: 10.1080/09593330.2019.1669719.

Yu, K.L., Chen, W.H., Sheen, H.K., Chang, J.S., Lin, C.S., Ong, H.C., Show, P.L., Ng, E.P., Ling, T.C. (2020), “Production of microalgal biochar and reducing sugar using wet torrefaction with microwave-assisted heating and acid hydrolysis pretreatment”, *Renewable Energy*, Elsevier Ltd, Vol. 156, pp. 349–360, doi: 10.1016/j.renene.2020.04.064.

Zhu, H., Wang, H., Zhang, Y., Li, Y. (2023), “Biophotovoltaics: Recent advances and perspectives”, *Biotechnology Advances*, Elsevier Inc., 1 May, doi: 10.1016/j.biotechadv.2023.108101.