

MICROALGAS E A TERCEIRA GERAÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS: DESAFIOS ATUAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS



Revista
Desafios

Artigo Original
Original Article
Artículo Original

Microalgae and the Third Generation of Biofuels: current challenges and future perspectives

Las microalgas y la tercera generación de biocombustibles: retos actuales y perspectivas futuras

Mirella Pessôa Diniz da Silva ^{*1}, Jodson da Silva Glória ¹, Daniel Alves de Souza Panta ¹, Glaucia Eliza Gama Vieira ²

¹Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas/TO, Brasil.

²Docente do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas/TO, Brasil.

*Correspondência: Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustível - LEDBIO, Av. NS 15, 109 Norte. Prédio do PPGA. Universidade Federal do Tocantins - UFT, Palmas, Tocantins, Brasil. CEP:77.010-090. E-mail mirella.diniz@mail.uft.edu.br.

Artigo recebido em 07/12/2020 aprovado em 20/09/2021 publicado em 22/10/2021.

RESUMO

A busca por biomassas alternativas potencializou a exploração das microalgas, consideradas a terceira geração de biocombustíveis. Em comparativo ao etanol e ao biodiesel oriundos, por exemplo, da fermentação do caldo da cana-de-açúcar e da transesterificação do óleo extraído da soja (primeira geração), além da biotransformação de materiais lignocelulósicos (segunda geração), a biomassa algal apresenta elevada eficiência fotossintética, maior produtividade por hectare e não apresenta sazonalidade em comparação às culturas terrestres convencionais. Além disso, podem ser cultivadas em águas salinas e residuais, um fator bastante positivo para a sustentabilidade da produção. Diversos estudos sobre o cultivo, extração e conversão dos biocombustíveis obtidos por microalgas, reportam melhorias na eficiência energética do processo ao longo do tempo. No entanto, muito se deve evoluir até a implementação de projetos em escala industrial, com o desenvolvimento de novas tecnologias e melhorias genéticas, visto que, o custo da produção é uma preocupação, principalmente quando falamos em alcance de mercados que necessitam de grandes volumes e preços baixos, como o de biocombustíveis. Nessa perspectiva, este estudo revisa o papel transformador das microalgas como um recurso renovável potencial, e o que tem sido feito para atingir o uso pleno desta matéria-prima na matriz energética mundial.

Palavras-chave: Terceira geração; Conversão Energética; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The search for alternative biomass boosted the exploitation of microalgae, considered the third generation of biofuels. Compared to ethanol and biodiesel from, for example, the fermentation of sugarcane juice and the transesterification of oil extracted from soybeans (first generation), in addition to the biotransformation of lignocellulosic materials (second generation), algal biomass presents high photosynthetic efficiency, higher productivity per hectare and has no seasonality compared to conventional terrestrial crops. In addition, they can be grown in saline and waste water, a very positive factor for the sustainability of production. Several studies on the cultivation, extraction and conversion of biofuels obtained by microalgae report improvements in the energy efficiency of the process over time. However, much must evolve until the implementation of projects on an industrial scale, with the development of new technologies and genetic improvements, since the cost of production is a concern,

especially when we talk about reaching markets that need large volumes and low prices, such as biofuels. From this perspective, this study reviews the transforming role of microalgae as a potential renewable resource, and what has been done to achieve the full use of this raw material in the global energy matrix.

Keywords: *Third generation; Energy Conversion; Sustainability.*

RESUMEN

La búsqueda de biomasa alternativa impulsó la explotación de microalgas, consideradas la tercera generación de biocombustibles. En comparación con el etanol y el biodiesel de, por ejemplo, la fermentación del jugo de caña de azúcar y la transesterificación del aceite extraído de la soja (primera generación), además de la biotransformación de materiales lignocelulósicos (segunda generación), la biomasa de algas presenta alta eficiencia fotosintética, mayor productividad por hectárea y no tiene estacionalidad en comparación con los cultivos terrestres convencionales. Además, se pueden cultivar en agua salada y residual, un factor muy positivo para la sostenibilidad de la producción. Varios estudios sobre el cultivo, extracción y conversión de biocombustibles obtenidos por microalgas reportan mejoras en la eficiencia energética del proceso a lo largo del tiempo. Sin embargo, mucho debe evolucionar hasta la implementación de proyectos a escala industrial, con el desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras genéticas, ya que el costo de producción es una preocupación, especialmente cuando hablamos de llegar a mercados que necesitan grandes volúmenes y bajos precios, como como biocombustibles. Desde esta perspectiva, este estudio revisa el papel transformador de las microalgas como potencial recurso renovable, y lo que se ha hecho para lograr el pleno aprovechamiento de esta materia prima en la matriz energética global.

Descriptores: *Tercera generación; Conversión de energía; Sostenibilidad.*

INTRODUÇÃO

Dados divulgados no *Global Energy Review 2021* pela *International Energy Agency - IEA* indicam que a demanda global de energia deverá aumentar 4,6% até o fim de 2021, maior do que a contração de 4% observada em 2020 que, por sua vez, esteve 0,5% acima da demanda registrada durante 2019. Dentre as energias renováveis, as energias solar e eólica são esperadas a contribuir com 2/3 do crescimento energético previsto para 2021 que, somadas as demais energias renováveis em uso, serão responsáveis por cerca de 20% de toda a energia elétrica produzida no mundo (IEA, 2021).

Apesar do cenário promissor, o uso de energias não-renováveis e de origem fóssil ainda representa cerca de 84% do total (*The British Petroleum Company*, 2020). Por isso, ainda há uma crescente preocupação com o futuro energético do planeta e as consequências que a continuidade do uso de matérias-primas de origem fóssil trazem ao meio ambiente em geral.

Junto às demais energias renováveis em crescente demanda, os biocombustíveis produzidos a partir de biomassas diversas são vistos, atualmente, como uma alternativa viável para redução da dependência por combustíveis fósseis e, também, uma rota alternativa às demais dificuldades enfrentadas com o uso de energias solar e/ou eólica, como custo tecnológico, eficiência, disponibilidade de espaço etc. (DHAR et al., 2020). Esse destaque atribuído aos biocombustíveis tem como base as várias vantagens que apresenta como, por exemplo, biodegradabilidade, menor concentração de enxofre, menor emissão de gases de efeito estufa, independência energética, entre outros (SINGH et al., 2020).

Atualmente, os biocombustíveis são divididos em quatro gerações distintas: (I) a 1ª geração, derivada da cana-de-açúcar e soja, (II) a 2ª geração, derivada da celulose, (III) a 3ª geração, derivada de microalgas, e (IV) a 4ª geração, em que se produz biomassa para captura, armazenamento e conversão de CO₂ em energia (MAT ARON et al., 2020).

No entanto, o uso de biocombustíveis de primeira, segunda e quarta gerações causa um incessante debate devido a problemas como: competição global por alimentos, desequilíbrio dos ecossistemas dada a necessidade por extensas áreas aráveis para a produção de uma quantidade suficiente de culturas, a capacidade reduzida que matérias-primas não-alimentares tem em manter a demanda de energia suprida visto que resíduos agrícolas podem ser limitados em várias regiões do mundo, e o lento progresso na produção de maquinários ou reflorestamentos capazes de retirar consideráveis quantidades de CO₂ da atmosfera para que seja produzida energia significativamente suficiente em escala global (NAZARI et al., 2021).

As microalgas, que são a face da 3ª geração de biocombustíveis, recebem um crescente interesse nesse contexto de energia renovável visto o potencial que apresentam como matéria-prima para esse fim. Tal potencial é pautado em vantagens como, por exemplo, elevada taxa de crescimento, elevado teor de lipídios e carboidratos, pouca demanda por água doce e terras aráveis, elevada eficiência fotossintética, e, ainda, elevado grau de tolerância ambiental (CHOWDHURY e LOGANATHAN, 2019). Nessa prerrogativa, a biomassa de microalgas convertida em biocombustível poderia trazer eficiência na mitigação de problemas ambientais associados às emissões de CO₂ e poluição causados tanto pelo uso de energias de origem fóssil como o uso de energias renováveis de 1ª e 2ª geração (CRUZ et al., 2018).

No entanto, ainda há vários desafios econômicos e logísticos para o desenvolvimento comercial de microalgas destinadas a produção sustentável de biocombustíveis em larga escala, os quais são devidos ao alto custo dos sistemas de cultivo,

métodos de colheita, e as atuais técnicas de extração do bio-óleo (CHOWDHURY e LOGANATHAN, 2019).

Dado o potencial das microalgas como matéria-prima sustentável para a produção de biocombustíveis, e os desafios econômicos e logísticos ainda enfrentados, esse estudo traz uma revisão do papel transformador das microalgas como matéria-prima para a produção de biocombustíveis de 3ª geração, e o que tem sido feito para alcançar o pleno uso desse recurso na matriz energética mundial.

MICROALGAS E PRODUÇÃO ENERGÉTICA

Os biocombustíveis de 3ª geração, oriundos de microalgas, são considerados hoje uma solução viável e sustentável para a demanda futura de energia, superando deficiências das gerações anteriores de biocombustíveis (BATHIA et al., 2020), visto que tecnologias para processos de conversão de biomassa de microalgas em energia têm sido estudados por anos, e plantas em escala-piloto têm sido construídas para testes de geração comercial de biocombustíveis a partir desta fonte (DALENA et al., 2017).

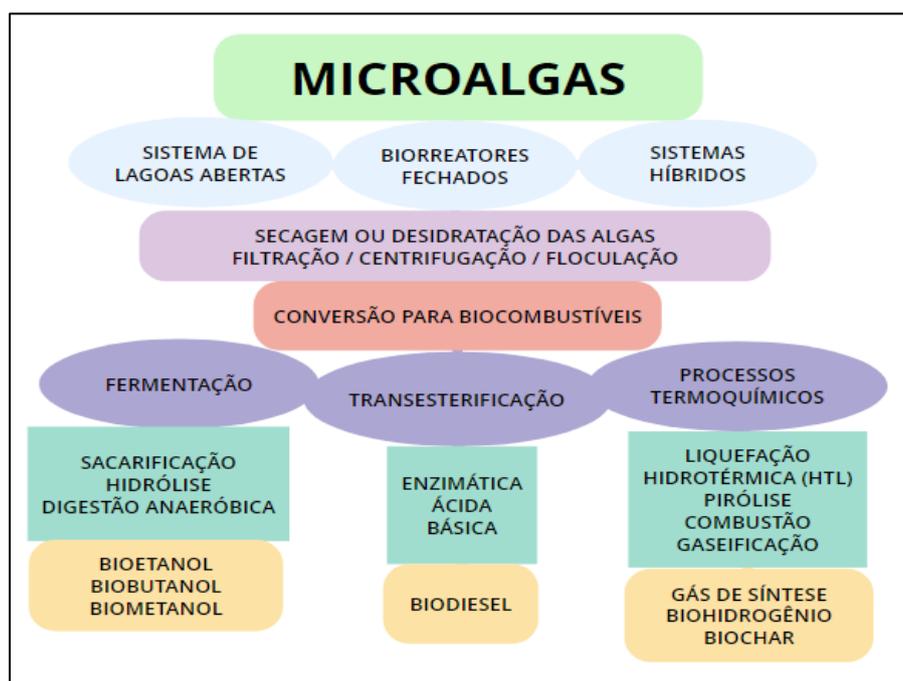
A produção de biomassa a partir de culturas de microalgas apresenta várias vantagens se comparada à biomassa tradicional de culturas terrestres, em que se destaca, dentre elas, a taxa de crescimento que, segundo estudos como o de Alalwan et al. (2019) e Leong et al. (2018), pode ser até 100 vezes superior à de plantas terrestres, com capacidade de dobrar o seu volume de biomassa em menos de um dia (PAL et al., 2019). Outra grande vantagem do uso de microalgas é a possibilidade de cultivo em áreas inférteis, como regiões desérticas e costeiras, além da possibilidade de cultivo em águas salinas, salobras, e residuárias, a depender da espécie cultivada (JANKOWSKA et al., 2017).

Estudos recentes revelaram que o cultivo de microalgas permite, também, incorporar o dióxido de carbono gerado em processos industriais no processo de fotossíntese e, assim, contribuir com o aumento do volume de biomassa das microalgas que, por sua vez, proverá mais volume de matéria-prima para extração do bio-óleo (SADATSHOJAEI et al., 2020). Essa inovação baseia-se na capacidade das microalgas autotróficas de consumir CO₂ e produzir carboidratos, hidrogênio, proteínas e lipídios que podem ser posteriormente convertidos em biocombustíveis (BENEMANN et al., 2018).

No geral, dadas às características comuns de biomassa que as microalgas também compartilham a

produção de biocombustíveis, nesse aspecto, segue tendências similares quanto aos tipos de produtos que podem ser obtidos. Dentre aqueles passíveis de obtenção, pode-se citar o biodiesel, biogás, bioetanol, biohidrogênio, butanol, bio-óleo, biocarvão, dentre outros (KIM et al., 2017; CHU et al., 2017; KHANDELWAL et al., 2018; BAJPAI, 2019; CHOWDHURY et al., 2019; NETO et al., 2019). A forma de obtenção, por sua vez, também pode ser variada e difere conforme o tipo de biocombustível desejado, como observado a seguir no fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1. Etapas e técnicas envolvidas na produção de biocombustíveis a partir de microalgas.



OS BIOCOMBUSTÍVEIS DE MICROALGAS

Segundo Chowdhury et al. (2019), diversos estudos levaram a distinção de biomassa de microalgas quanto à aplicação ideal para a conversão em biocombustíveis. Nesse estudo cita-se, por exemplo, a espécie *C. protothecoides* como ideal para produção

de biodiesel, *S. obliquus* para produção de biohidrogênio, *Nannochloropsis salina* para produção de biogás, *Chlorococum* sp. para produção de bioetanol, e a espécie *Spirulina* sp. para produção de biometanol. Nesse sentido, o progresso no estudo da biomassa de microalgas tem se afunilado no que diz

respeito a espécies e o potencial que essas apresentam quanto ao tipo de biocombustível almejado.

Biodiesel

O biodiesel tem atraído atenção por ser uma das mais importantes novas fontes alternativas de energia para substituição do diesel de origem fóssil, por apresentar vários benefícios como a baixa toxicidade, biodegradabilidade, menor emissão de dióxido de carbono comparado ao diesel, dentre outras, a depender da geração (OGUNKUNLE e AHMED, 2019). O biodiesel é composto de ésteres metílicos ou etílicos derivados de ácidos graxos de cadeia longa (principalmente grupos C12 - C18) presentes em uma variedade de matérias-primas naturais, como as oleaginosas, microalgas e gordura animal (PATEL et al., 2017).

Além das vantagens do uso de microalgas para a produção de biodiesel, conhecer o perfil dos lipídeos presentes nas microalgas também é vital dado que a qualidade do biodiesel produzido é diretamente dependente da composição bioquímica que, também, influencia fortemente a eficiência de combustão, a potência de aquecimento dos motores, a estabilidade oxidativa e o teor de água (DESHMUKH et al., 2019).

O biodiesel à base de microalgas é geralmente obtido por meio de três etapas: (1) preparo e secagem da biomassa de microalgas, (2) extração os lipídios das células, e (3) conversão em biodiesel por meio de esterificação seguida de transesterificação na presença de álcool de cadeia curta e catalisador de natureza básica ou ácida (MOFIJUR et al., 2020). No geral, as espécies de microalgas primárias usadas para a produção de biodiesel são dos gêneros *Botryococcus* (PRATHIMA e KARTHIKEYAN, 2017), *Chlorella* (CHI et al., 2019), *Scenedesmus* (PUGAZHENDHI et al., 2020), *Chlamydomonas* (SCRANTON et al., 2015), *Dunaliella* (PATEL et al., 2021) e *Nannochloropsis* (CANCELA et al., 2019). Algumas

espécies de microalgas podem proporcionar elevados volumes de biocombustíveis direcionados como, por exemplo, a espécie *Chlorella protothecoides*, que é considerada uma matéria-prima excelente para a produção de biodiesel por poder acumular 55% de lipídios quando cultivada de forma heterotrófica perante limitação de nitrogênio (PARSAEIMEHR et al., 2017; BATISTA et al., 2018).

Em comparação, o biodiesel oriundo de matérias-primas de 1ª e 2ª geração traz consigo sérias desvantagens, atreladas principalmente a competição por terras aráveis e suprimentos de água potável, que, por isso, se tornam uma problemática em relação a continuidade e aplicabilidade futura (MISHRA e GOSWAMI, 2018). O estudo publicado por Jeswani et al. (2020) atualiza e estima que mais de 50% da terra arável total dos Estados Unidos da América seria necessária para o cultivo de oleaginosas suficientes para atender apenas à demanda de biodiesel destinada ao transporte no país, algo que levaria em uma grave crise global de alimentos caso ocorresse. Em proporção, Jeswani e colaboradores sugerem também que apenas 6% da área agrícola dos EUA seria necessária para esse propósito se a demanda fosse atendida por meio da produção de biodiesel à base de microalgas.

Bioetanol

O bioetanol também é um biocombustível de grande destaque mundial, produzido principalmente a partir de alimentos à base de açúcar e amido (por exemplo, milho e cana-de-açúcar) pela aplicação de processos de fermentação biológica. Embora o equivalente energético do etanol/bioetanol seja cerca de 68% menor do que o petróleo combustível, a combustão do etanol é mais limpa e, portanto, é reconhecida como uma alternativa à gasolina (MEDINA e MAGALHÃES Jr., 2020).

No setor de transportes, o bioetanol é o biocombustível mais importante do mundo, com 70,5% das participações totais e 142,6 bilhões de litros produzidos em 2019. Nesse mesmo ano, os Estados Unidos e o Brasil foram os maiores produtores de bioetanol com cerca de 84% da produção total mundial. A União Europeia, por outro lado, foi a terceira colocada com 5443 milhões de litros (5% da produção global) em 2019 (DUQUE et al., 2021).

Ao considerar o aumento da população global e o aumento da demanda por safras como fontes de alimentos, os materiais lignocelulósicos (por exemplo, resíduos agrícolas) são dados como matérias-primas alternativas de melhor aplicação à produção de bioetanol, visto que produzi-las não resulta em competição por terras aráveis e suprimentos alimentares (SINGH et al., 2020). No entanto, o maior obstáculo para a produção eficiente e econômica de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica é o alto teor de lignina, uma vez que essa requer pré-tratamento difícil e oneroso (ZHAO et al., 2020).

Em contraste às biomassas lignocelulósicas, algumas microalgas podem acumular grandes quantidades de carboidratos na forma de amido ou celulose durante períodos de estresse ambiental extremo (NIPHADKAR et al., 2018; RAHEEM et al., 2018; DAVE et al., 2019; DA MAIA et al., 2020). Nesse sentido, há, atualmente, um crescente interesse sobre o uso de microalgas como matéria-prima alternativa para a fermentação e produção de bioetanol. As espécies de microalgas pertencentes aos gêneros *Scenedesmus*, *Chlorella* e *Chlamydomonas*, podem acumular uma quantidade considerável de carboidratos (>50% do peso total de células secas) como biomassa (ONAY, 2018; VELAZQUEZ-LUCIO et al., 2018; ÖZÇIMEN et al., 2020). Além disso, os carboidratos encontrados nas microalgas são compostos principalmente de amido e celulose (com a ausência de lignina), que são de conversão mais fácil

em açúcares simples para fermentação se comparado a biomassa lignocelulósica (LAKATOS et al., 2019).

Para tanto, a produção de bioetanol a partir de microalgas requer pré-tratamento, ou seja, requer a quebra dos carboidratos ou polímeros de amido em monômeros, como a glicose, de modo que açúcares fermentáveis sejam metabolizados pelos microrganismos por meio de fermentação (EL-DALATONY et al., 2017). Esse processo de quebra pode ser conduzido por via química, enzimática, mecânica, ou pela combinação dessas vias (NAGHSHBANDI et al., 2019).

Biometano

A produção de biometano pode ocorrer por meio da conversão bioquímica de biomassa em estado sólido, com possibilidade de controle da temperatura, a depender dos tipos de microrganismos envolvidos no processo digestório (MILTNER et al., 2017). A via de conversão bioquímica, nesse sentido, pode decorrer por meio da digestão aeróbia ou anaeróbia, na presença ou não de substratos que são geralmente líquidos ou pastosos, digeridos por fungos, protozoários e, principalmente, bactérias que, durante a digestão, produzem diversos tipos de gases mas majoritariamente compostos por CH₄, CO₂, vapor d'água e, ainda, algumas impurezas (ADNAN et al., 2019).

Pesquisas mais recentes têm utilizado o termo “biogás” para se referirem ao biometano por conta tanto do método de limpeza, como do condicionamento do gás bruto (KHAN et al., 2021). Nesse contexto, o aproveitamento das algas é possível como substrato, uma vez que uma vantagem geral da digestão é a possibilidade de alimentação de biomassa úmida. Por isso, a biomassa de algas não precisa, na prática, ser seca, mas apenas concentrada, dado que em sistemas de fermentação úmida as concentrações não devem exceder 5% em peso de biomassa (PASSOS et

al., 2018). Estudos recentes sugerem que a digestão de algas, em geral, é adequada, e que a produção de biogás depende, majoritariamente, da cepa de algas utilizada e do pré-tratamento das células (MATEESCU e ZAHARESCU, 2019; NGUYEN et al., 2021).

Para o aumento, otimização e diminuição dos custos de produção de biometano com microalgas, muitos estudos têm optado pelo método da co-digestão com outros substratos (VARGAS-ESTRADA et al., 2021). Por isso, o processo se autocompensa e, como consequência, aumenta-se o rendimento do biogás, com a vantagem de uso de microalgas de baixa-qualidade advindas de tratamento de águas residuais ou florações (SOLÉ-BUNDÓ et al., 2019). A adição de substratos se deve, também, ao elevado teor de proteína das algas que, por sua vez, resulta em elevadas concentrações de NH_4^+ no biogás que podem levar a reações tóxicas e inibidoras. Por isso, ao adicionar substratos orgânicos com baixo teor de NH_4^+ compensa-se o efeito inibitório e potencialmente tóxico desse subproduto e, ainda, a utilização do meio de crescimento enriquecido com substrato como “purificador” de CO_2 e, assim, condicionar *in situ* de do biometano (TABATABAEI et al., 2020).

Biohidrogênio

A literatura sugere que existem muitas espécies de microalgas com potencial de produção de H_2 mas que essa produção depende de diversas condições específicas como método de digestão, tratamento de impurezas do gás bruto, processos de separação de H_2 , dentre outros (GOSWAMI et al., 2021).

A partir da biomassa de microalgas, a forma mais comum de obtenção de biohidrogênio se dá pelo processo indireto em que, primeiro, se produz a biomassa de microalgas por meio da fotossíntese e substratos para, em seguida, seja convertida

(particularmente os carboidratos) em biohidrogênio por fermentação e/ou foto-fermentação (SHOW et al., 2019), enquanto que, na forma tradicional e direta, quebra-se a molécula de água presentes na microalga em hidrogênio e oxigênio por meio de processos de biofotólise direta ou indireta (NAGARAJAN et al., 2017).

MÉTODOS DE CULTIVO DE MICROALGAS

O cultivo de microalgas, hoje, pode ocorrer de diferentes formas; no entanto, as duas principais são os sistemas abertos (que incluem os canais de lagoas reatoras, lagoas centro-circulares, e lagoas abertas sem mistura) e os sistemas fechados que designam os fotobiorreatores (JERNEY e SPILLING, 2018).

Sistemas Abertos

Dentre os sistemas abertos, os canais de lagoas reatoras abertas são as mais utilizadas e assemelham-se às lagoas anaeróbias utilizadas para o tratamento de efluentes, com metragens que chegam a até 300 m de comprimento, 15 m de largura e profundidade de 0,5 m, dotadas de roda de pás para manutenção do fluxo e disseminação dos substratos. As principais vantagens desse tipo de sistema são os custos reduzidos e a facilidade de manuseio que, todavia, podem se tornar menos atrativos pela desvantagem da influência ambiental no sistema (temperatura externa, vaporização, chuvas, invasão por outras espécies e predadores, incidência de luz etc.) (BANERJEE e RAMASWAMY, 2017).

Sistemas Fechados

Por outro lado, os sistemas fechados designados de fotobiorreatores são estruturas complexas em forma tubular ou de placas planas construídas para produção de água reutilizável e vários produtos de valor agregado, como as microalgas, com uso de efluentes como substrato. A ideia dos

fotobiorreatores é que tenham funcionamento simples e econômico, com elevada produtividade, energeticamente eficiente e aplicável em escala industrial (NWOBA et al., 2020). Em outras palavras, construir fotobiorreatores significa permitir uma alta capacidade de captura de luz como garantia de canalização, transporte e distribuição entre espécies de microalgas para produção de biomassa, manutenção viável dos parâmetros operacionais de modo a proporcionar para as células elevada incidência luminosa; menores investimentos e custos operacionais a longo prazo, e menor utilização de energia (XIAOGANG et al., 2020).

FATORES INFLUENTES NA PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM SISTEMAS ABERTOS

Configuração e Sistema de Mistura

A estrutura de construção de sistemas abertos influencia diretamente a produção de biomassa e a eficiência de absorção de nutrientes, dado que a profundidade dessas lagoas pode variar até 50 cm para permitir a penetração da luz no meio líquido para o crescimento de microalgas (APEL e WEUSTER-BOTZ, 2015). Por sua vez, o sistema de mistura também é de fundamental importância, por promoverem a transferência de massa que viabiliza a passagem de luz até o fundo da lagoa para que as células tenham crescimento otimizado e, ainda, servem para evitar gradientes de temperatura ou nutrientes, aglomerado de células e sedimentação (CHEW et al., 2018).

Concentração de CO₂ e Mudanças de pH

A absorção de CO₂ proveniente da atmosfera não é suficiente para suprir a exigência de carbono para o crescimento de microalgas em sistemas abertos, especificamente em intervalos diferentes de melhor irradiação (JO et al., 2020). Com isso, em sistemas

abertos, o fornecimento de CO₂ depende de vários fatores como o pH, coeficiente de transferência de massa, existência de sistema de mistura, tipo de aspersor, e tempo de contato gás-líquido (BANERJEE e RAMASWAMY, 2017). Em sistemas abertos, o oxigênio dissolvido se acumula devido à menor transferência de oxigênio produzido na fotossíntese para o ecossistema. Este acúmulo de oxigênio pode também levar à inibição da fotossíntese em muitas espécies de microalgas que resulta em foto-oxidação quando sob altas faixas de irradiação (HOFFMAN et al., 2017). Por sua vez, o pH é um fator eminente que define a produtividade da biomassa em sistemas abertos, de modo que diferentes meios podem variar de pH 6 a 8,76, que é a faixa preferida por espécies de microalgas para crescerem (JERNEY e SPILLING, 2018). Nessa faixa, um pH intracelular de 7,5 mantém viável o crescimento ideal de microalgas, no entanto, valores elevados de pH resultam em variações nos processos celulares que causam o colapso das culturas de células. Para tanto, o sistema de aeração deve ser compilado com controle de pH pela adição de produtos químicos alcalinos nas microalgas (TABATABAEI et al., 2020).

Intensidade da Luz

Sistemas abertos devem absorver luz eminente para garantir que cultivo de microalgas aloque a luz de forma constante e assim as células de microalgas cresçam para conversão eficiente em biomassa (VUPPALADADIYAM et al., 2018). Fatores como a profundidade da lagoa e a dispersão de sólidos também afetam a disponibilidade de luz, do mesmo modo que elevadas intensidades de luz também podem causar fotoinibição e diminuir o crescimento de microalgas (RAEISSADATI et al., 2019). No estudo conduzido por Sivakaminathan et al. (2020), a aplicação de guias de luz em lagoas de alta taxa levou a um aumento na produtividade de biomassa de

microalga por área de lagoa em 3,9 vezes e, segundo esses autores, os principais efeitos observados depois do fornecimento das guias luminosas foram uma maior distribuição de luz, um aumento na eficiência de conversão de fótons, uma diminuição em zonas escuras e, ainda, menores perdas respiratórias.

Temperatura

A análise das variações de temperatura e seleção de espécies tolerantes para sistemas abertos se faz importante ao processo, visto que a temperatura é um fator importante para o crescimento de microalgas, com crescimento ideal entre 25 e 35 °C (ZHUANG *et al.*, 2018). Estudos apontam que, temperaturas além da faixa indicada levam a danos celulares e inibição do crescimento, e que as espécies marinhas de microalgas são as mais suscetíveis a esses danos (DOLGANYUK *et al.*, 2020). Por conta das configurações estruturais dos sistemas abertos, a temperatura se torna um fator de difícil controle por depender da taxa de evaporação local, do período de luz solar, das condições do ar circundante, da localização geográfica e da estação do ano (CHEW *et al.*, 2018). Baixas temperaturas em decorrência desses fatores ambientais se tornam desfavoráveis para a atividade da ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase oxigenase (RuBisCo) – a enzima mais abundante em plantas que influencia diretamente na taxa de fotossíntese. Em comparação, temperaturas mais elevadas tendem a impedir a taxa metabólica e a solubilidade de CO₂ no meio, situação que leva a enzima RuBisCo a se ligar ao O₂ livre e, por isso, causar processos de fotorrespiração que podem reduzir de 20 a 30% a taxa de bioconversão de carbono no sistema (SCHADE e MEIER, 2019).

Disponibilidade de Nutrientes

O desenvolvimento de microalgas requer certos nutrientes inorgânicos, como N, C, P, K, Mg e S, bem como a presença de sais a depender da espécie

de microalga. Assim, a indisponibilidade de nutrientes é um fator de estresse que leva a diminuição da produção e do acúmulo de lipídios, bem como a diminuição da divisão e crescimento celular (ISHIKA *et al.*, 2017; ZHUANG *et al.*, 2018). Em outras palavras, se faltam nutrientes no meio de cultivo, mas há luz e CO₂ suficientes, as microalgas passam a produzir mais ácidos graxos que, por sua vez, são convertidos em acilgliceróis ao invés de indesejáveis lipídios em membrana ou outros compostos (VERMA e SRIVASTAVA, 2018).

FATORES INFLUENTES NA PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM SISTEMAS FECHADOS

Configuração do Reator e Sistema de Mistura

A configuração de fotobiorreatores é um fator importante que define a produtividade da biomassa e o potencial de remoção de poluentes das espécies de microalgas (LUO *et al.*, 2017). Na literatura, tem-se o consenso de que reatores com tubos com 0,1 m de diâmetro resultam em maiores rendimentos de biomassa. Nesse sentido, os diferentes projetos de fotobiorreatores existentes hoje apresentam vários benefícios em relação aos outros (MAZZELLI *et al.*, 2020).

Segundo Nwoba *et al.* (2020), esses benefícios são vistos em fotobiorreatores como, por exemplo, os reatores com colunas borbulhantes que têm transferência de massa satisfatória e alta área de superfície em relação ao volume; ou os fotobiorreatores de tubo horizontal que oferecem elevado consumo de CO₂, controle de temperatura e transferência de massa; ou os reatores de tanque agitado, que têm mistura adequada e fornecimento de luz; ou, ainda, os reatores em formato de painéis planos, que possuem área de superfície com alta iluminação e produtividade da biomassa.

Com os avanços na área, esses fotobiorreatores também foram sujeitos a modificações no intuito de otimizar a performance e aumentar a produtividade de microalgas. Segundo Vo et al. (2019), modificar esses fotobiorreatores levou ao aumento da utilização da luz, maior agitação de nutrientes e, ainda, a possibilidade de controle da temperatura ao longo do crescimento das microalgas. Por sua vez, o sistema de mistura em fotobiorreatores pode ser categorizado como do tipo não-mecânico (coluna de bolha, tubular, ou de transporte de ar) e mecânicos (lagoas com canaletas de ar ou tanques agitados) (PIRES et al., 2017). A mistura nesse tipo de sistema é fundamental, também, para a estabilidade operacional, ao passo que essa pode influenciar na prevenção da entrada de espécies estranhas no sistema e, ainda, contribuir com a limpeza do reator (ACIÉN et al., 2017). A limpeza do fotobiorreator é importante para prevenção da formação de biofilme nas paredes do reator por interferir na transmissão de luz e, ainda, para a redução do risco de contaminação do sistema. Com condições ideais de mistura, a capacidade de limpeza do fotobiorreator pode ser aumentada se a superfície interna do sistema for lisa, isto é, de menor rugosidade, e sem muitas canaletas ou passagens internas (SOLIMENO et al., 2017).

Intensidade da Luz

A eficiência de fotobiorreatores pode ser afetada pela combinação fatores associados à emissão de luz como, por exemplo, a transferência, a distribuição, e a utilização de luz pelas espécies de microalgas durante a fotossíntese. Nesse sentido, o crescimento celular de microrganismos fototróficos não deve se estabelecer quando houver impedâncias como saturação, limitação, ou inibição de luz (NZAYISENGA et al., 2020). Um estudo conduzido por El-Sheekh et al. (2017) com uso da espécie de microalga *Scenedesmus obliquus* mostrou que a

produtividade de biomassa sob intensidade de luz de $160 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ aumentou em cerca de 66.7% (de 0.06 g por L ao dia para 0.1 g L ao dia) comparada a uma intensidade de luz de $80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. O controle da intensidade da luz em alguns experimentos se baseia na capacidade das células de microalgas de se adaptarem a alterações de luz, de modo que essas células utilizam uma quantidade suficiente de luz, mediante essas flutuações, ao ponto de produzir complexos de antenas centrais para a reação fotossintética que, por sua vez, também evita danos oriundos da desse processo caso situações extremas (baixa intensidade ou alta intensidade) ocorram (SCHNURR e ALLEN, 2015).

Concentração de CO₂ e Mudanças de pH

A concentração de CO₂ e o pH são fatores que também desempenham importante função ao longo do crescimento de microalgas em fotobiorreatores, visto que, assim como em sistemas abertos com condições adversas de nutrientes, mas com pleno CO₂ e luz disponíveis, microalgas tendem a produzir lipídios de menor interesse, mas crescem de forma considerável (ALMOMANI et al., 2019). O valor de pH, por sua vez, também um parâmetro que afeta diretamente o crescimento de microalgas em fotobiorreatores, e, por isso, existe um consenso na literatura de que a faixa ótima para cultivo dessa biomassa é entre pH 7 e 9 (EL SHENAWY et al., 2020). Contudo, há espécies que apresentam crescimento favorável em condições ácidas ou alcalinas (ASSUNÇÃO e MALCATA, 2020).

Temperatura

Assim como os demais parâmetros influentes em fotobiorreatores, a temperatura, por sua vez, é o fator que define a taxa fotossintética para crescimento das microalgas e, ainda, desempenha papel importante na fixação de CO₂ dentro do sistema. Por isso, dentre

os papéis da temperatura em fotobiorreatores, pode-se citar o funcionamento regular de enzimas, a divisão celular e, também, a taxa de absorção de nutrientes (LEGRAND et al., 2021). No estudo de Xu et al. (2019) é reportado que o crescimento de diferentes espécies sob mudanças de temperatura depende majoritariamente do tipo de espécie; no entanto, o efeito no perfil de ácidos graxos produzidos segue uma tendência similar independente da espécie. Os autores sugerem que os ácidos graxos insaturados tendem a diminuir com a diminuição da temperatura de cultivo, juntamente com a eficiência de sequestro de CO₂ e produtividade de biomassa.

CO-FATORES INERENTES A PRODUÇÃO DE MICROALGAS

Embora as microalgas sejam fontes viáveis, o cultivo ainda enfrenta algumas limitações em termos de aumento da taxa de crescimento e os processos envolvidos na síntese dos produtos, que devem ser superadas para haver um real avanço da fase piloto para a industrial. Para tanto, como indicado na Tabela 1, o processo de cultivo de microalgas tem sido adaptado de diferentes formas pelo uso de recursos externos como gases de combustão, efluentes, métodos alternativos de mistura, entre outros, com impactos significativos no processo (KHAN et al., 2018).

Tabela 1 - Comparação de possíveis alternativas e algumas técnicas de otimização de cultivo.

Alternativa	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Efluentes	Água descartada após o uso (as fontes incluem agricultura, indústria, município).	Reduz ou elimina a dependência da mídia; Menor custo; Contêm nutrientes prontamente disponíveis; Reduz o uso de água doce;	Risco de contaminação ou instabilidade da cultura; Pode conter produtos químicos tóxicos; Maiores limitações para efluentes de origem industrial;
Gases de combustão	Emissões industriais que contêm grandes quantidades de CO ₂ .	Uma forma barata de CO ₂ concentrado; Pode promover o crescimento mais rápido de microalgas; Capacidade de redução de poluição atmosférica; Melhoria de impacto ambiental da produção	A elevada temperatura dos gases, se utilizados logo após a produção/emissão, podem prejudicar as microalgas; Pode conter produtos químicos tóxicos (por exemplo, NO _x ou SO _x); Requer mais pesquisas para compreender os impactos nos custos e real eficiência;
Mistura	Agitação da cultura de microalgas para manter a uniformidade dentro do sistema.	Promove a transferência de massa (por exemplo, nutrientes); Evita gradientes de temperatura ou aglomerados de células; Promove o crescimento uniforme da cultura; Evita a sedimentação e o acúmulo de biofilmes;	Pode necessitar de investimentos adicionais em energia; Pode causar tensão de cisalhamento nas células quando em altas taxas; Requer mais pesquisas para compreender determinação de taxas de mistura ideais;

Fonte: KHAN et al. (2018).

Crescimento

Dado que as microalgas fototróficas requerem CO₂ para crescer, a junção de fontes de CO₂ alternativas no sistema de cultivo poderia, na prática, reduzir custos de aquisição de substratos e, ainda, o tempo de foto-exposição necessário para geração de CO₂ proveniente da fotossíntese (ZHENG et al., 2018). Nesse sentido, a concentração de CO₂ em gases de combustão poderia promover o crescimento de microalgas. Um estudo conduzido por Yadav et al. (2020) em que foi feita uma avaliação comparativa do ciclo de vida da produção de microalgas por sequestro de CO₂ de gases de combustão em lagoas de canal ao ar livre, em regime de batelada e semi-contínuo, no qual os autores revelam que, com esse sequestro, os canais de lagoas em modo semi-contínuo puderam resultar em um aumento de 3,5 vezes na produtividade por área comparado ao processo em batelada. Os autores sugerem, ainda, que os impactos positivos se correlacionam diretamente com a demanda de energia em diferentes processos do cultivo de microalgas e que, dentre esses processos, a fase de cultivo em si é o critério principal dentre todas as categorias de impacto com uma contribuição maior que 75%.

Fotossíntese

Quanto ao uso de águas residuais no cultivo de microalgas, podem-se obter resultados significantes quando o tipo correto de água residual é utilizado. Nesse sentido, o uso de águas residuais industriais tem maior limitação por conta da presença de íons e substâncias contaminantes e, ainda, a presença de coloração (ALI et al., 2021). Limitações também podem aparecer para o uso de efluentes domésticos como, por exemplo, a possibilidade de elevadas cargas de matéria orgânica. Assim, estudos têm sugerido o crescimento por de microalgas por heterotrofia ou

mixotrofia (CHAI et al., 2021). Tais limitações podem ser superadas, segundo Khan et al. (2018), se o cultivo for feito em forma de consórcio com diferentes espécies que tenham diferentes necessidades de crescimento e, assim, manter o equilíbrio do sistema e viabilizar a flexibilização dos custos operacionais.

Extração

Após o cultivo, as células de microalgas requerem coleta em soluções com diluição que variam entre 0,3 e 1 g L⁻¹ de densidade celular e, em sequência, passam por reconcentração para que a biomassa de microalgas seja processada (SINGH e PATIDAR, 2018). Esse processo de reconcentração, por sua vez, pode ser feito por meio de diferentes vias como a filtração, a centrifugação, a floculação ou, ainda, por meio de processos híbridos (ROY e MOHANTY, 2019). A colheita e processamento, juntos, podem corresponder a até 30% de todo o custo operacional total e, por isso, a otimização dessas etapas de faz fundamental para que se reduzam os custos e se alcance melhores resultados (CHOWDHURY e LOGANATHAN, 2019).

USO DA ENGENHARIA GENÉTICA PARA AUMENTO DE PRODUTIVIDADE

Embora as microalgas possam crescer mais rápido e render mais lipídios e/ou carboidratos em comparação a outras culturas energéticas, o alto custo dos sistemas de cultivo continua a impedir a nível comercial. Por isso, tem sido necessário desenvolver processos mais economicamente viáveis a fim de aumentar a produção de produtos energéticos e, assim, reduzir o custo de cultivo. Do ponto de vista da engenharia genética, alcançar alta produtividade geral de lipídios e/ou carboidratos a partir de microalgas será sempre a questão-chave ao avaliar o potencial de

comercialização (NG et al., 2020). O uso de técnicas de DNA recombinante tem oferecido uma maior gama de opções para melhorar o desempenho de espécies selvagens de microalgas e, por isso, avanços significativos em genômica e engenharia genética de algas têm sido alcançados durante as últimas décadas como forma inovadora de melhoria da biomassa de algas e, conseqüentemente, dos produtos específicos, como lipídios ou carboidratos (FAYYAZ et al., 2020).

Ainda, segundo Brar et al. (2021), com o advento das tecnologias de sequenciamento, a compreensão dos genomas das algas, especialmente dos genes envolvidos na resposta metabólica, tem melhorado rapidamente por permitir o controle direto sobre o funcionamento celular das algas por meio da mutagênese ou da introdução de transgênese.

Nesse contexto, até o presente momento, vários projetos de sequenciamento do genoma nuclear foram concluídos, a exemplo das espécies *Chlamydomonas reinhardtii*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Thalassiosira pseudonana*, *Cyanidioschyzon merolae*, *Ostreococcus lucimarinus*, *Ostreococcus tauri* e *Micromonas pusilla*, com outros projetos em andamento para as espécies *Fragilariopsis cylindrus*, *Pseudo-nitzschia*, *Thalassiosira rotula*, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Micromonas pusilla*, *Galdieria sulphuraria*, *Porphyra purpurea*, *Volvox carteri* e *Aureococcus anophagefferens* (SPROLES et al., 2021).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelo exposto, a produção de biocombustíveis de terceira geração a partir de microalgas seria o futuro desejável para as demandas energéticas mundiais. No entanto, como as microalgas ainda não são viáveis para a produção biocombustíveis em larga escala, a

literatura atual tem recomendado que mudanças em relação ao processo de cultivo sejam gradualmente adotadas para que se alcance, primeiro, uma menor dependência do uso de substratos e, também, a otimização da foto-exposição com novas técnicas de construção de sistemas de cultivo abertos ou fechados. Também tem sido ideal, o fomento à diversificação de espécies de microalgas por meio de estudos que analisem e contemplem o potencial que apresentam para biocombustíveis, bem como a diversificação de técnicas de coleta e extração dos produtos de interesse. Nesse contexto, outros biocombustíveis também podem ser derivados do que sobra do processo de extração, isto é, os resíduos de biomassa, com a aplicação de pirólise ou processos hidrotérmicos. Essa estratégia traz benefícios em relação à reutilização dos resíduos para produzir mais derivados com potencial energético e, com isso, promover a sustentabilidade dentro do cultivo e a diversificação econômica de todo o processo. Para tanto, esforços mútuos entre cientistas da área estão sendo feitos no que diz respeito à engenharia genética e a possibilidade de manipular o metabolismo por meio de informações genéticas capazes de aumentar, ainda mais, a eficiência da geração de biocombustíveis.

Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.

REFERÊNCIAS

- ACIÉN, F. G.; MOLINA, E.; REIS, A.; TORZILLO, G.; ZITTELLI, G. C.; SEPÚLVEDA, C.; MASOJÍDEK, J. Photobioreactors for the production of microalgae. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts**, p. 1 – 44, 2017.
- ADNAN, A. I.; ONG, M.Y.; NOMANBHAY, S.; CHEW, K. W.; SHOW, P. L. Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. **Bioengineering**, v. 6, n. 4, p. 92, 2019.

- ALALWAN, H. A.; ALMINSHID, A. H.; ALJAAFARI, H. A. S. Promising evolution of biofuel generations. Subject review. **Renewable Energy Focus**, v. 28, p. 127–139, 2019.
- ALI, S.; PAUL PETER, A.; CHEW, K. W.; MUNAWAROH, H. S. H.; SHOW, P. L. Resource recovery from industrial effluents through the cultivation of microalgae: A review. **Bioresource Technology**, v. 337, p. 125461, 2021.
- ALMOMANI, F.; AL KETIFE, A.; JUDD, S.; SHURAIR, M.; BHOSALE, R. R.; ZNAD, H.; TAWALBEH, M. Impact of CO₂ concentration and ambient conditions on microalgal growth and nutrient removal from wastewater by a photobioreactor. **Science of The Total Environment**, v. 662, p. 662–671, 2019.
- APEL, A. C.; WEUSTER-BOTZ, D. Engineering solutions for open microalgae mass cultivation and realistic indoor simulation of outdoor environments. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 38, n. 6, p. 995–1008, 2015.
- ASSUNÇÃO, J.; MALCATA, F. X. Enclosed “non-conventional” photobioreactors for microalga production: A review. **Algal Research**, v. 52, p. 102107, 2020.
- BAJPAI, P. **Third Generation Biofuels**. [S. l.]: Springer Singapore, 2019.
- BANERJEE, S.; RAMASWAMY, S. Dynamic process model and economic analysis of microalgae cultivation in open raceway ponds. **Algal Research**, v. 26, p. 330–340, 2017.
- BATISTA, F. R. M.; LUCCHESI, K. W.; CARARETO, N. D. D.; COSTA, M. C. D.; MEIRELLES, A. J. A. PROPERTIES OF MICROALGAE OIL FROM THE SPECIES *Chlorella protothecoides* AND ITS ETHYLIC BIODIESEL. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 4, p. 1383–1394, 2018.
- BENEMANN, J. R.; WOERTZ, I.; LUNDQUIST, T. Autotrophic Microalgae Biomass Production: From Niche Markets to Commodities. **Industrial Biotechnology**, v. 14, n. 1, p. 3–10, 2018.
- BRAR, A.; KUMAR, M.; SONI, T.; VIVEKANAND, V.; PAREEK, N. Insights into the genetic and metabolic engineering approaches to enhance the competence of microalgae as biofuel resource: A review. **Bioresource Technology**, v. 339, p. 125597, 2021.
- CANCELA, A.; PÉREZ, L.; FEBRERO, A.; SÁNCHEZ, A.; SALGUEIRO, J. L.; ORTIZ, L. Exploitation of *Nannochloropsis gaditana* biomass for biodiesel and pellet production. **Renewable Energy**, v. 133, p. 725–730, 2019.
- CHAI, W. S.; TAN, W. G.; HALIMATUL MUNAWAROH, H. S.; GUPTA, V. K.; HO, S.-H.; SHOW, P. L. Multifaceted roles of microalgae in the application of wastewater biotreatment: A review. **Environmental Pollution**, v. 269, p. 116236, 2021.
- CHEW, K. W.; CHIA, S. R.; SHOW, P. L.; YAP, Y. J.; LING, T. C.; CHANG, J.-S. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 91, p. 332–344, 2018.
- CHI, N. T. L.; DUC, P. A.; MATHIMANI, T.; PUGAZHENDHI, A. Evaluating the potential of green alga *Chlorella* sp. for high biomass and lipid production in biodiesel viewpoint. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 17, p. 184–188, 2019.
- CHOWDHURY, H.; LOGANATHAN, B. Third-generation biofuels from microalgae: a review. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 20, p. 39–44, 2019.
- CHOWDHURY, H.; LOGANATHAN, B.; MUSTARY, I.; ALAM, F.; MOBIN, S. M. A. **Algae for biofuels: The third generation of feedstock**. Second and Third Generation of Feedstocks. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 323–344.
- CHU, W.-L. Strategies to enhance production of microalgal biomass and lipids for biofuel feedstock. **European Journal of Phycology**, v. 52, n. 4, p. 419–437, 2017.
- DALENA, F.; SENATORE, A.; TURSI, A.; BASILE, A. **Bioenergy production from second- and third-generation feedstocks**. Bioenergy Systems for the Future. [S. l.]: Elsevier, 2017. p. 559–599.
- DAVE, N.; SELVARAJ, R.; VARADAVENKATESAN, T.; VINAYAGAM, R. A critical review on production of bioethanol from macroalgal biomass. **Algal Research**, v. 42, p. 101606, 2019.
- DESHMUKH, S.; KUMAR, R.; BALA, K. Microalgae biodiesel: A review on oil extraction, fatty

acid composition, properties and effect on engine performance and emissions. **Fuel Processing Technology**, v. 191, p. 232–247, 2019.

DHAR, A.; NAETH, M. A.; JENNINGS, P. D.; GAMAL EL-DIN, M. Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 134602, 2020.

DOLGANYUK, V.; BELOVA, D.; BABICH, O.; PROSEKOV, A.; IVANOVA, S.; KATSEROV, D.; PATYUKOV, N.; SUKHIKH, S. Microalgae: A Promising Source of Valuable Bioproducts. **Biomolecules**, v. 10, n. 8, p. 1153, 2020.

DUQUE, A.; ÁLVAREZ, C.; DOMÉNECH, P.; MANZANARES, P.; MORENO, A. D. Advanced Bioethanol Production: From Novel Raw Materials to Integrated Biorefineries. **Processes**, v. 9, n. 2, p. 206, 2021.

EL SHENAWY, E. A.; ELKELAWY, M.; BASTAWISSI, H. A.-E.; TAHA, M.; PANCHAL, H.; SADASIVUNI, K. K.; THAKAR, N. Effect of cultivation parameters and heat management on the algae species growth conditions and biomass production in a continuous feedstock photobioreactor. **Renewable Energy**, v. 148, p. 807–815, 2020.

EL-DALATONY, M.; SALAMA, E.-S.; KURADE, M.; HASSAN, S.; OH, S.-E.; KIM, S.; JEON, B.-H. Utilization of Microalgal Biofractions for Bioethanol, Higher Alcohols, and Biodiesel Production: A Review. **Energies**, v. 10, n. 12, p. 2110, 2017.

EL-SHEEKH, M. M.; EL-GAMAL, A.; BASTAWESS, A. E.; EL-BOKHOMY, A. Production and characterization of biodiesel from the unicellular green alga *Scenedesmus obliquus*. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 8, p. 783–793, 2017.

FAYYAZ, M.; CHEW, K. W.; SHOW, P. L.; LING, T. C.; NG, I.-S.; CHANG, J.-S. Genetic engineering of microalgae for enhanced biorefinery capabilities. **Biotechnology Advances**, v. 43, p. 107554, 2020.

GOSWAMI, R. K.; MEHARIYA, S.; OBULISAMY, P. K.; VERMA, P. Advanced microalgae-based renewable biohydrogen production systems: A review. **Bioresource Technology**, vol. 320, p. 124301, 2021.

HOFFMAN, J.; PATE, R. C.; DRENNEN, T.; QUINN, J. C. Techno-economic assessment of open

microalgae production systems. **Algal Research**, vol. 23, p. 51–57, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global Energy Review 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021?mode=overview>. Acesso em: 03/07/2021.

ISHIKA, T.; MOHEIMANI, N. R.; BAHRI, P. A. Sustainable saline microalgae co-cultivation for biofuel production: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 356–368, 2017.

JANKOWSKA, E.; SAHU, A. K.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 692–709, 2017.

JERNEY, J.; SPILLING, K. **Large Scale Cultivation of Microalgae: Open and Closed Systems**. Methods in Molecular Biology. [S. l.]: Springer New York, 2018. p. 1–8.

JESWANI, H. K.; CHILVERS, A.; AZAPAGIC, A. Environmental sustainability of biofuels: a review. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 476, n. 2243, p. 20200351, 2020.

JO, S.-W.; DO, J.-M.; NA, H.; HONG, J. W.; KIM, I.-S.; YOON, H.-S. Assessment of biomass potentials of microalgal communities in open pond raceways using mass cultivation. **PeerJ**, vol. 8, p. e9418, 2020.

KHAN, M. I.; SHIN, J. H.; KIM, J. D. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. **Microbial Cell Factories**, v. 17, n. 1, 2018.

KHAN, M. U.; LEE, J. T. E.; BASHIR, M. A.; DISSANAYAKE, P. D.; OK, Y. S.; TONG, Y. W.; SHARIATI, M. A.; WU, S.; AHRING, B. K. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111343, 2021.

KHANDELWAL, A.; VIJAY, A.; DIXIT, A.; CHHABRA, M. Microbial fuel cell powered by lipid extracted algae: A promising system for algal lipids and power generation. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 520–527, 2018.

- KIM, H. M.; OH, C. H.; BAE, H.-J. Comparison of red microalgae (*Porphyridium cruentum*) culture conditions for bioethanol production. **Bioresource Technology**, v. 233, p. 44–50, 2017.
- LAKATOS, G. E.; RANGLOVÁ, K.; MANOEL, J. C.; GRIVALSKÝ, T.; KOPECKÝ, J.; MASOJÍDEK, J. Bioethanol production from microalgae polysaccharides. **Folia Microbiologica**, v. 64, n° 5, p. 627–644, 2019.
- LEGRAND, J.; ARTU, A.; PRUVOST, J. A review on photobioreactor design and modelling for microalgae production. **Reaction Chemistry & Engineering**, v. 6, n. 7, p. 1134–1151, 2021.
- LEONG, W.-H.; LIM, J.-W.; LAM, M.-K.; UEMURA, Y.; HO, Y.-C. Third generation biofuels: A nutritional perspective in enhancing microbial lipid production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 950–961, 2018.
- LUO, Y.; LE-CLECH, P.; HENDERSON, R. K. Simultaneous microalgae cultivation and wastewater treatment in submerged membrane photobioreactors: A review. **Algal Research**, v. 24, p. 425–437, 2017.
- MAIA, J. L. da; CARDOSO, J. S.; MASTRANTONIO, D. J. da S.; BIERHALS, C. K.; MOREIRA, J. B.; COSTA, J. A. V.; MORAIS, M. G. de. Microalgae starch: A promising raw material for the bioethanol production. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 165, p. 2739–2749, 2020.
- MAT ARON, N. S.; KHOO, K. S.; CHEW, K. W.; SHOW, P. L.; CHEN, W.; NGUYEN, T. H. P. Sustainability of the four generations of biofuels – A review. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 12, p. 9266–9282, 2020.
- MATEESCU, C.; ZAHARESCU, T. **Comprehensive Overview of Biomethane Production Potential of Algal Biomass Cultivated in Wastewater**. Application of Microalgae in Wastewater Treatment. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. p. 427–444.
- MAZZELLI, A.; CICCÌ, A.; DI CAPRIO, F.; ALTIMARI, P.; TORO, L.; IAQUANIELLO, G.; PAGNANELLI, F. Multivariate modeling for microalgae growth in outdoor photobioreactors. **Algal Research**, v. 45, p. 101663, 2020.
- MILTNER, M.; MAKARUK, A.; HARASEK, M. Review on available biogas upgrading technologies and innovations towards advanced solutions. **Journal of Cleaner Production**, v. 161, p. 1329–1337, 2017.
- MISHRA, V. K.; GOSWAMI, R. A review of production, properties, and advantages of biodiesel. **Biofuels**, v. 9, n. 2, p. 273–289, 2017.
- MOFIJUR, M.; RASUL, M. G.; HASSAN, N. M. S.; NABI, M. N. Recent Development in the Production of Third Generation Biodiesel from Microalgae. **Energy Procedia**, v. 156, p. 53–58, 2019.
- NAGARAJAN, D.; LEE, D.-J.; KONDO, A.; CHANG, J.-S. Recent insights into biohydrogen production by microalgae – From biophotolysis to dark fermentation. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 373–387, 2017.
- NAGHSHBANDI, M. P.; TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; AFTAB, M. N.; IQBAL, I. **Metabolic Engineering of Microalgae for Biofuel Production**. **Methods in Molecular Biology**. [S. l.]: Springer New York, 2019. p. 153–172.
- NAZARI, M. T.; MAZUTTI, J.; BASSO, L. G.; COLLA, L. M.; BRANDLI, L. Biofuels and their connections with the sustainable development goals: a bibliometric and systematic review. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 8, p. 11139–11156, 2020.
- NETO, J. M.; KOMESU, A.; DA SILVA MARTINS, L. H.; GONÇALVES, V. O. O.; DE OLIVEIRA, J. A. R.; RAI, M. **Third generation biofuels: an overview**. Sustainable Bioenergy. [S. l.]: Elsevier, 2019. p. 283–298.
- NG, I.; KESKIN, B. B.; TAN, S. A Critical Review of Genome Editing and Synthetic Biology Applications in Metabolic Engineering of Microalgae and Cyanobacteria. **Biotechnology Journal**, v. 15, n. 8, p. 1900228, 2020.
- NGUYEN, L. N.; KUMAR, J.; VU, M. T.; MOHAMMED, J. A. H.; PATHAK, N.; COMMAULT, A. S.; SUTHERLAND, D.; ZDARTA, J.; TYAGI, V. K.; NGHIEM, L. D. Biomethane production from anaerobic co-digestion at wastewater treatment plants: A critical review on development and innovations in biogas upgrading techniques. **Science of The Total Environment**, v. 765, p. 142753, 2021.

- NIPHADKAR, S.; BAGADE, P.; AHMED, S. Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives. **Biofuels**, v. 9, n. 2, p. 229–238, 2017.
- NWOBA, E. G.; PARLEVLIT, D. A.; LAIRD, D. W.; ALAMEH, K.; MOHEIMANI, N. R. Pilot-scale self-cooling microalgal closed photobioreactor for biomass production and electricity generation. **Algal Research**, v. 45, p. 101731, 2020.
- NZAYISENGA, J. C.; FARGE, X.; GROLL, S. L.; SELLSTEDT, A. Effects of light intensity on growth and lipid production in microalgae grown in wastewater. **Biotechnology for Biofuels**, v. 13, n. 1, 2020.
- OGUNKUNLE, O.; AHMED, N. A. A review of global current scenario of biodiesel adoption and combustion in vehicular diesel engines. **Energy Reports**, v. 5, p. 1560–1579, 2019.
- ONAY, M. Bioethanol production from *Nannochloropsis gaditana* in municipal wastewater. **Energy Procedia**, v. 153, p. 253–257, 2018.
- ÖZÇİMEN, D.; KOÇER, A. T.; İNAN, B.; ÖZER, T. **Bioethanol production from microalgae**. Handbook of Microalgae-Based Processes and Products. [S. l.]: Elsevier, 2020. p. 373–389.
- PAL, P.; CHEW, K. W.; YEN, H.-W.; LIM, J. W.; LAM, M. K.; SHOW, P. L. Cultivation of Oily Microalgae for the Production of Third-Generation Biofuels. **Sustainability**, v. 11, n. 19, p. 5424, 2019.
- PARSAEIMEHR, A.; MANCERA-ANDRADE, E. I.; ROBLEDO-PADILLA, F.; IQBAL, H. M. N.; PARRA-SALDIVAR, R. A chemical approach to manipulate the algal growth, lipid content and high-value alpha-linolenic acid for biodiesel production. **Algal Research**, v. 26, p. 312–322, 2017.
- PASSOS, F.; MOTA, C.; DONOSO-BRAVO, A.; ASTALS, S.; JEISON, D.; MUÑOZ, R. **Biofuels from Microalgae: Biomethane**. Energy from Microalgae. [S. l.]: Springer International Publishing, 2018. p. 247–270.
- PATEL, A.; ARORA, N.; MEHTANI, J.; PRUTHI, V.; PRUTHI, P. A. Assessment of fuel properties on the basis of fatty acid profiles of oleaginous yeast for potential biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, p. 604–616, 2017.
- PATEL, A.; GAMI, B.; PATEL, P.; PATEL, B. Biodiesel production from microalgae *Dunaliella tertiolecta*: a study on economic feasibility on large-scale cultivation systems. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2021.
- PIRES, J. C. M.; ALVIM-FERRAZ, M. C. M.; MARTINS, F. G. Photobioreactor design for microalgae production through computational fluid dynamics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 248–254, 2017.
- PRATHIMA, A.; KARTHIKEYAN, S. Characteristics of micro-algal biofuel from *Botryococcus braunii*. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 39, n. 2, p. 206–212, 2017.
- PUGAZHENDHI, A.; ARVINDNARAYAN, S.; SHOBANA, S.; DHARMARAJA, J.; VADIVEL, M.; ATABANI, A. E.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; KUMAR, G. Biodiesel from *Scenedesmus* species: Engine performance, emission characteristics, corrosion inhibition and bioanalysis. **Fuel**, v. 276, p. 118074, set. 2020.
- RAEISOSSADATI, M.; MOHEIMANI, N. R.; PARLEVLIT, D. Luminescent solar concentrator panels for increasing the efficiency of mass microalgal production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 101, p. 47–59, 2019.
- RAHEEM, A.; PRINSEN, P.; VUPPALADADIYAM, A. K.; ZHAO, M.; LUQUE, R. A review on sustainable microalgae-based biofuel and bioenergy production: Recent developments. **Journal of Cleaner Production**, v. 181, p. 42–59, 2018.
- ROY, M.; MOHANTY, K. A comprehensive review on microalgal harvesting strategies: Current status and future prospects. **Algal Research**, v. 44, p. 101683, 2019.
- SADATSHOJAEI, E.; WOOD, D. A.; MOWLA, D. **Third Generation of Biofuels Exploiting Microalgae. Nanotechnology in the Life Sciences**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2020. p. 575–588.
- SCHADE, S.; MEIER, T. A comparative analysis of the environmental impacts of cultivating microalgae in different production systems and climatic zones: A

systematic review and meta-analysis. **Algal Research**, v. 40, p. 101485, 2019.

SCHNURR, P. J.; ALLEN, D. G. Factors affecting algae biofilm growth and lipid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 418–429, 2015.

SCRANTON, M. A.; OSTRAND, J. T.; FIELDS, F. J.; MAYFIELD, S. P. Chlamydomonas as a model for biofuels and bio-products production. **The Plant Journal**, v. 82, n. 3, p. 523–531, 2015.

SHOW, K.-Y.; YAN, Y.; ZONG, C.; GUO, N.; CHANG, J.-S.; LEE, D.-J. State of the art and challenges of biohydrogen from microalgae. **Bioresource Technology**, v. 289, p. 121747, 2019.

SINGH, G.; PATIDAR, S. K. Microalgae harvesting techniques: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 217, p. 499–508, 2018.

SIVAKAMINATHAN, S.; WOLF, J.; YARNOLD, J.; ROLES, J.; ROSS, I. L.; STEPHENS, E.; HENDERSON, G.; HANKAMER, B. Light guide systems enhance microalgae production efficiency in outdoor high-rate ponds. **Algal Research**, v. 47, p. 101846, 2020.

SOLÉ-BUNDÓ, M.; PASSOS, F.; ROMERO-GÚIZA, M. S.; FERRER, I.; ASTALS, S. Co-digestion strategies to enhance microalgae anaerobic digestion: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, p. 471–482, 2019.

SOLIMENO, A.; ACÍEN, F. G.; GARCÍA, J. Mechanistic model for design, analysis, operation and control of microalgae cultures: Calibration and application to tubular photobioreactors. **Algal Research**, v. 21, p. 236–246, 2017.

SPROLES, A. E.; FIELDS, F. J.; SMALLEY, T. N.; LE, C. H.; BADARY, A.; MAYFIELD, S. P. Recent advancements in the genetic engineering of microalgae. **Algal Research**, v. 53, p. 102158, 2021.

TABATABAEI, M.; AGHBASHLO, M.; VALIJANIAN, E.; KAZEMI SHARIAT PANAH, H.; NIZAMI, A.-S.; GHANAVATI, H.; SULAIMAN, A.; MIRMOHAMADSADEGHI, S.; KARIMI, K. A comprehensive review on recent biological innovations to improve biogas production, Part 2: Mainstream and downstream strategies. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1392–1407, 2020.

THE BRITISH PETROLEUM COMPANY. **Statistical Review of World Energy**. 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 10/07/2021.

VARGAS-ESTRADA, L.; LONGORIA, A.; ARENAS, E.; MOREIRA, J.; OKOYE, P. U.; BUSTOS-TERRONES, Y.; SEBASTIAN, P. J. A Review on Current Trends in Biogas Production from Microalgae Biomass and Microalgae Waste by Anaerobic Digestion and Co-digestion. **BioEnergy Research**, 2021.

VELAZQUEZ-LUCIO, J.; RODRÍGUEZ-JASSO, R. M.; COLLA, L. M.; SÁENZ-GALINDO, A.; CERVANTES-CISNEROS, D. E.; AGUILAR, C. N.; FERNANDES, B. D.; RUIZ, H. A. Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. **Biofuel Research Journal**, v. 5, n. 1, p. 780–791, 2018.

, R.; SRIVASTAVA, A. Carbon dioxide sequestration and its enhanced utilization by photoautotroph microalgae. **Environmental Development**, v. 27, p. 95–106, 2018.

VO, H. N. P.; NGO, H. H.; GUO, W.; NGUYEN, T. M. H.; LIU, Y.; LIU, Y.; NGUYEN, D. D.; CHANG, S. W. A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutants treatment. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1549–1568, 2019.

VUPPALADADIYAM, A. K.; PRINSEN, P.; RAHEEM, A.; LUQUE, R.; ZHAO, M. Microalgae cultivation and metabolites production: a comprehensive review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 12, n. 2, p. 304–324, 2018.

XIAOGANG, H.; JALALAH, M.; JINGYUAN, W.; ZHENG, Y.; LI, X.; SALAMA, E.-S. Microalgal growth coupled with wastewater treatment in open and closed systems for advanced biofuel generation. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2020.

XU, X.; GU, X.; WANG, Z.; SHATNER, W.; WANG, Z. Progress, challenges and solutions of research on photosynthetic carbon sequestration efficiency of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 110, p. 65–82, 2019.

YADAV, G.; DUBEY, B. K.; SEN, R. A comparative life cycle assessment of microalgae production by CO₂

sequestration from flue gas in outdoor raceway ponds under batch and semi-continuous regime. **Journal of Cleaner Production**, v. 258, p. 120703, 2020.

ZHAO, C.; QIAO, X.; SHAO, Q.; HASSAN, M.; MA, Z. Evolution of the Lignin Chemical Structure during the Bioethanol Production Process and Its Inhibition to Enzymatic Hydrolysis. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 5, p. 5938–5947, 2020.

ZHENG, Q.; XU, X.; MARTIN, G. J. O.; KENTISH, S. E. Critical review of strategies for CO₂ delivery to

large-scale microalgae cultures. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 26, n. 11, p. 2219–2228, 2018.

ZHUANG, L.-L.; YU, D.; ZHANG, J.; LIU, F.; WU, Y.-H.; ZHANG, T.-Y.; DAO, G.-H.; HU, H.-Y. The characteristics and influencing factors of the attached microalgae cultivation: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1110–1119, 2018.