

UTILIZAÇÃO DE MICROALGAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES E PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEL: UMA REVISÃO

MICROALGAE BIOTECHNOLOGY FOR WATER TREATMENT AND BIOMASS PRODUCTION OF BIOFUEL: A REVIEW

UTILIZACIÓN DE MICROALGAS PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES Y PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE: UNA REVISIÓN

Sueilha Ferreira de Andrade de Paula ¹
Bruna Maria Emerenciano das Chagas ²
Renata Araújo Mendonça³

Resumo

O aquecimento global é potencializado pelas emissões dos gases geradores do Efeito Estufa (GEE), em especial o CO₂, sendo um grande problema que tem preocupado ambientalistas no mundo todo. Atualmente, as microalgas vêm sendo apontadas como potencial para a biofixação do CO₂, pois no cultivo de microalga ocorre a mitigação do CO₂ e a produção de biomassa rica em compostos de alto valor econômico agregado. Esses seres apresentam alta capacidade fotossintética e taxa de crescimento maior que a dos vegetais superiores, sendo capazes de duplicar sua biomassa em um dia e não seguindo o regime de safras, podendo ser cultivadas em meio salino simples, sem demandar irrigação, herbicidas ou pesticidas. Porém, o cultivo de microalgas para produção de biomassa ainda é oneroso devido a uma abundância de nutrientes inorgânicos utilizados no meio de cultivo. Estudos vêm mostrando que as microalgas podem ser cultivadas em efluentes industriais, com a capacidade de assimilar os compostos orgânicos e inorgânicos presentes no meio, tratando o efluente e produzindo biomassa com um custo mais baixo. A biomassa tem uma vasta aplicação, incluindo a produção de biocombustíveis. As microalgas apresentam grande potencial para produção de biocombustíveis, incluindo biodiesel, biogás, bio-óleo, entre outros. Nesse sentido, este estudo pretende fazer uma revisão bibliográfica dos processos de produção de biomassa de microalgas em efluentes e suas aplicações na produção de biocombustível como uma alternativa sustentável, tanto para tratar o efluente, quanto para produzir biocombustíveis de forma que minimize as emissões de CO₂.

Palavras-chave: microalgas; resíduos; biorremediação; biocombustíveis.

Abstract

Greenhouse gas (GHG) emissions can make global warming worse, especially CO₂, a major problem that has concerned environmentalists around the world. Currently, microalgae have been identified as having the potential for CO₂ biofixation. In the cultivation of microalgae, CO₂ mitigation occurs, along with the production of biomass rich in compounds with high economic value. These beings have a high photosynthetic capacity and a higher growth rate than higher plants, are capable of doubling their biomass in one day, do not follow a cropping regime, and can be cultivated in a simple saline medium without requiring irrigation, herbicides or pesticides. However, the cultivation of microalgae for biomass production is still costly due to the large amounts of inorganic nutrients used in the cultivation medium. Studies have shown that microalgae can be cultivated in industrial effluents, being able to assimilate organic and inorganic compounds present in the environment, treating the effluent and producing biomass at a lower cost. Biomass has a wide range of applications, including the production of biofuels. Microalgae have great potential for the production of biofuels, including biodiesel, biogas and bio-oil, not to mention other products. This study aims to carry out a bibliographical review of the production processes for the cultivation of microalgae biomass in effluents and their applications in the production of biofuel as a sustainable alternative for both treating the effluent and producing biofuels in a way that minimizes CO₂ emissions.

¹ Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: sueilha.andrade@ufrn.br

² Superintendência de Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: bruna.emerenciano@ufrn.br

³ Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: renat.onca@gmail.com

Keywords: microalgae; residues; bioremediation; biofuels.

Resumen

El calentamiento global es maximizado por las emisiones de los gases de Efecto Invernadero (GEI), en especial el CO₂, siendo un gran problema que ha preocupado ambientalistas en todo el mundo. Actualmente, se señala las microalgas como potencial para la biofijación del CO₂. En el cultivo de microalga ocurre la mitigación del CO₂ y la producción de biomasa rica en compuestos de alto valor económico agregado. Esos seres presentan alta capacidad fotosintética y tasa de crecimiento superior a la de los vegetales superiores, siendo capaces de duplicar su biomasa en un día, no siguen régimen de cosechas, y se los puede cultivar en entorno salino simple, sin demandar irrigación, herbicidas o pesticidas. Sin embargo, el cultivo de microalgas para producción de biomasa todavía es costoso debido a una gran cantidad de nutrientes inorgánicos utilizados en el medio de cultivo. Estudios han demostrado se puede cultivar las microalgas en efluentes industriales, siendo capaz de asimilar los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el medio, tratando el efluente y produciendo biomasa con un costo menor. La biomasa tiene una vasta aplicación, incluso la producción de biocombustibles. Las microalgas presentan gran potencial para producción de biocombustibles, como biodiésel, biogás, bioaceite, entre otros. A tal sentido, este estudio tiene como objetivo hacer una revisión bibliográfica de los procesos productivos de producción de biomasa de microalgas en efluentes y sus aplicaciones en la producción de biocombustible como una alternativa sustentable para tratar el efluente y producir biocombustibles de forma que minimice las emisiones de CO₂.

Palabras clave: microalgas; residuos; biorremediación; biocombustibles.

1 Introdução

O crescente aumento populacional vem acompanhado da necessidade do incremento tanto de energia quanto do consumo de água potável. Atrelado a isso, em relação ao crescimento econômico, o progresso tecnológico tem causado modificações nas emissões do CO₂. O uso de combustíveis fósseis representa, conforme o balanço de 2020 da Agência Internacional de Energia (AIE), 80% da energia usada mundialmente. Essa forma de energia apresenta entraves no seu uso pelo fato de ela ser finita e liberar gases como o dióxido de carbono, que é o grande vilão do efeito estufa.

Os principais gases resultantes da queima de combustíveis fósseis são o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Desses gases o que apresenta maior impacto no aquecimento global é o dióxido de carbono, que é o mais liberado durante a queima e tem um tempo de permanência de, pelo menos, 100 anos. Isso prolonga o seu impacto no clima ao longo dos séculos, o tornando um dos maiores problemas enfrentados mundialmente (Li *et al.*, 2013). Além disso, a urbanização tem causado impacto ambiental dos mananciais hídricos, provocando o aumento do uso de água em seus processos e causando a contaminação desse líquido quando são descartados de forma incorreta.

Diante desse quadro, observa-se uma iminente urgência para o desenvolvimento de métodos ambientalmente corretos e economicamente sustentáveis para a substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis renováveis, com emissão de carbono reduzida, garantindo um ambiente sustentável para as gerações futuras.

As energias renováveis surgem como uma alternativa para uma substituição energética mais sustentável, buscando minimizar os impactos causados pela queima de combustíveis fósseis. Nesse sentido, o uso das microalgas surge como uma opção ímpar, visto que elas absorvem o CO₂ do meio ambiente e produzem o O₂ pelo do processo de fotossíntese, realizando a biorremediação de águas contaminadas pelas indústrias de laticínios, cervejarias, agroindústrias, esgotos domésticos, dentre outros. Ademais, a biomassa obtida das microalgas também é uma alternativa para a produção de biocombustíveis, tais como o bioetanol, bio-óleo e biometano.

As microalgas são seres microscópicos, unicelulares e possuem composição bioquímica diversificada, o que as torna ideais para a produção de biocombustível quando comparadas às plantas superiores (Cardoso *et al.*, 2021). São, também, fotossintetizantes, possuem alta taxa de crescimento, não necessitam de terra arável para se desenvolver e, sendo assim, não competem com os alimentos. Fora isso, elas são encontradas tanto em água doce quanto salobra, ou seja, não precisam de água doce para crescer (Touliabah *et al.*, 2022).

Embora apresentem todas essas peculiaridades, as microalgas apresentam elevado custo de produção em larga escala e isso representa um grande desafio para o uso desses microrganismos (Kadir *et al.*, 2018). Visando reduzir esses custos, as águas residuais surgem como alternativa, visto que são repletas de nutrientes e, por isso, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos nessa área (Hu; Gholizadeh, 2019; Pereira *et al.*, 2019). Esse cultivo realiza dupla função, visto que faz o processo de remediação de águas residuais sem o uso de água doce e, ao mesmo tempo, produz biomassa para conversão em biocombustível e químicos com valor agregado (Pereira *et al.*, 2019; Chagas *et al.*, 2021; Elkasabi, *et al.*, 2016; Boateng, 2016; Pereira; Rangel; Chagas, 2021).

As microalgas são fixadoras de CO₂ atmosférico e o utilizam para realizar o processo de fotossíntese. Esse gás é o grande vilão no processo de aquecimento global e as plantas e árvores terrestres fazem a fixação de apenas 3 a 6%, já as microalgas fazem esse processo de fixação do CO₂ de 10 a 50 vezes mais rápido, em média (Molazadeh *et al.*, 2019). Sendo assim, esses microrganismos podem ser utilizados na remediação do CO₂, gás altamente nocivo e bastante liberado durante o processo de queima de combustíveis fósseis.

O processo de conversão de microalgas em biodiesel pode ser rentável para as indústrias, pois o cultivo apresenta vantagens quando comparado a outras culturas energéticas (Díaz *et al.*, 2022). Nesse sentido, este artigo de revisão de literatura tem por objetivo fazer uma breve discussão da aplicação das microalgas no tratamento de águas residuais e na conversão da biomassa para a produção de biocombustíveis. Portanto, o objetivo é fornecer uma concisa

revisão do estado da arte relativo às atividades de pesquisa recentes em: características de microalgas; cultivo de microalgas; metabolismo; potencial tratamento de águas residuais utilizando microalgas; assim como a posterior aplicação da biomassa das microalgas para produção de biocombustíveis.

2 Metodologia

Para a elaboração deste artigo de revisão de literatura foram utilizados portais de periódicos científicos, incluindo: SciELO, ResearchGate, Google Acadêmico, Onlinelibrary, Science direct, Springer e o Portal de Periódicos CAPES. A busca foi realizada entre novembro de 2022 e fevereiro de 2023. Para a busca de fontes bibliográficas foram utilizadas as palavras-chave: “microalgae application”, “microalgae”, “aplicação de microalgas”, “microalgas”, “Wastewater treatment”, “microalgae biofuels”, “biofuels” and “renewable energy”.

Para elaboração do trabalho foi realizada a leitura completa dos artigos científicos e revisões selecionadas, então considerou-se os aspectos mais relevantes para o tema do trabalho proposto, abordando os achados científicos que contribuíram para o desenvolvimento tecnológico de produção das microalgas.

3 Microalgas

As microalgas são os microrganismos mais antigos, compõem a base da cadeia alimentar, possuem uma alta capacidade de adaptação a diversos ambientes e uma elevada taxa de crescimento, sendo conhecidas como componentes primordiais dos recifes de corais. Isso acontece devido a sua estrutura simples que permite que o processo de duplicação das células ocorra diversas vezes ao longo de um único dia, diferente das árvores que levam anos para crescer já que a energia obtida pela fotossíntese é desviada para a formação de estruturas complexas (Satyanarayana; Mariano; Vargas, 2011).

As microalgas são microrganismos unicelulares aquáticos que podem ser encontrados tanto em sistemas de água doce como em ambientes marinhos; são capazes de realizar a fotossíntese e podem crescer como células individuais, associadas em cadeias ou pequenas colônias (Corrêa *et al.*, 2019). São versáteis e se adaptam a uma grande variedade de temperaturas, pHs, salinidades e intensidades de luz (Laezza *et al.*, 2022).

As microalgas são um grupo altamente variado, com mais de 20.000 espécies reconhecidas até o momento, e são compostas por uma mistura heterogênea de procariotos fotossintéticos e eucariontes (Shobana *et al.*, 2017). Segundo Chen (2015), microalgas são

microrganismos versáteis que podem se desenvolver em diferentes ambientes aquáticos e se adaptam a condições extremas de temperatura, pH, salinidade e intensidade da luz. Pelo processo de conversão de energia térmica (sol) em química, elas produzem bioprodutos, tais como polissacarídeos, lipídios, pigmentos, proteínas, vitaminas, compostos bioativos e antioxidantes.

As microalgas se desenvolvem em águas doces, salobras, salinas e residuais, o que as tornam uma matéria-prima promissora para remediação de águas contaminadas por atividades antrópicas, reduzindo assim o impacto ambiental dessas atividades. Além disso, elas crescem muito rapidamente gerando altos rendimentos de biomassa sem competir com a cultura de alimentos, pois não precisam de terra arável para seu cultivo (Hosseinia; Shanga; Scotta, 2018).

Algumas microalgas produzem aproximadamente 150 vezes mais óleo por hectare do que a soja, que é a oleaginosa usada na produção de biodiesel, e, por isso, se observa um incremento na utilização de microalgas com aplicação para a produção de biocombustíveis (Satyanarayana; Mariano; Vargas, 2011).

3.1 Cultivo de microalgas

Diante da redução das reservas de combustíveis fósseis, aliada ao impacto ambiental causado pela queima desses combustíveis, as microalgas surgem como uma possível fonte renovável. O grande gargalo para a aplicação dessa biomassa está em sua produção. A fim de aumentar a eficiência da produtividade de biomassa em microalgas, a escolha do cultivo corresponde à primeira etapa do processo e será determinante na composição final da biomassa obtida. Isso porque variações nos parâmetros de cultivo afetam a composição das microalgas.

Sendo assim, o objetivo principal é otimizar as condições de cultivo para obter o máximo de acúmulo de produtos de valor agregado na biomassa, ou seja, aumentar a extração de produtos extraídos dos microrganismos. No sentido de obter biomassa, os métodos de cultivo de microalgas podem ser aplicados em um sistema de cultivo em lagoas e tanques, denominados sistemas de cultivo aberto, mas, também, em sistemas fechados, que são controlados e realizados em fotobiorreatores.

Borowiak e Krzywonos (2022) explicam que os sistemas de lagoas abertas foram utilizados pela primeira vez nos anos de 1950 e representando o sistema de cultivo mais simples e de baixo custo, sendo classificado em: lagoas abertas não misturadas; lagoas de pista; lagoas circulares e lagoas de camada delgada. Eles possuem baixa profundidade para garantir a

penetração da luz, além de um sistema de agitação mecânica com um braço giratório ou roda de pás, garantindo a recirculação de culturas.

Segundo Corrêa *et al.* (2021), o cultivo de microalgas em lagoas abertas (fotoheterotroficamente) apresenta como principal desvantagem a baixa produtividade. Isso ocorre devido ao fato de as restrições de luz dificultarem o crescimento das células e trazerem como consequência o aumento no custo de produção. Já o sistema em fotobiorreatores, que é uma forma de cultivo em sistema fechado, possui como principais vantagens: ele é compacto, acarretando menor uso do solo; é capaz de produzir uma cultura de microalga de cepa única, livre de contaminação; e possui maior eficiência na produção de biomassa, por ser realizado em condições controladas. Por outro lado, os fotobiorreatores possuem escalabilidade limitada pois falhas de projeto o tornam antieconômico para produção em larga escala (Chong *et al.*, 2021).

Microalgas podem ser cultivadas fotoautotroficamente em fotobiorreatores fechados ou lagoas abertas, usando luz solar, CO₂ e nutrientes inorgânicos para crescerem, produzindo biomassa e O₂. No entanto, a produção fotoautotrófica convencional em larga escala sofre com baixa densidade de biomassa, ocasionada pelas restrições de luz que dificultam o crescimento das células e aumentam drasticamente o custo de produção. Já o sistema fechado chega a ter produção de biomassa três vezes maior quando comparado aos sistemas abertos (Tan *et al.*, 2020).

Udayan *et al.* (2022) afirmam que um sistema de cultivo aberto de produção de microalgas é aplicado nas indústrias com finalidade econômica, isso porque apresenta algumas desvantagens tais como altas perdas de água causadas pela evaporação, menor rendimento de biomassa e suscetibilidade à contaminação. Além disso, também temos o difícil controle das condições de cultivo, de uso a longo prazo, baixa produtividade e alta vulnerabilidade a predadores, doenças e fatores externos. Tan *et al.* (2020) enfatizam que em cultivos realizados em lagoa aberta os parâmetros de crescimento, tais como temperatura e intensidade luminosa, são mais difíceis de controlar, o que acaba afetando a taxa de crescimento de microalgas. Peter *et al.* (2022) realizaram o cultivo em tanque aberto e em fotobiorreatores, os resultados obtidos mostram que fotobiorreatores têm maior produtividade de biomassa. No cultivo em tanque aberto houve uma redução de custo de aproximadamente 50% quando foi fornecido CO₂, nutrientes e água obtidos a partir de gases de combustão e águas residuais.

Um novo sistema aberto usa a robótica para regular e monitorar as atividades das algas e ajusta a velocidade de rotação da pá para ajudar a promover o crescimento das microalgas, visto que um dos grandes gargalos é a influência da distribuição uniforme da água ao redor da lagoa. A mistura desigual leva a áreas estagnadas e, com isso, o crescimento é afetado pela

inibição das bactérias em acumular e consumir nutrientes destinados às algas. Foi sugerida a necessidade de um maior refinamento do sistema com o avanço da robótica (Russell; Rodriguez; Yaseen, 2022).

Com o objetivo de alterar a produtividade de biomassa em cultivos realizados em fotobiorreatores, pode-se aplicar vários meios de cultura, tais como batelada, semicontínuo e contínuo. Peter *et al.* (2022) explicam que o fluxo e a seleção do meio de cultivo têm uma função primordial na produtividade da biomassa, dado que diferentes nutrientes consumidos pelas microalgas podem apresentar composições distintas em suas células.

Peter *et al.* (2022) pesquisou a quantidade de biomassa obtida do cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* em sistemas de cultivo descontínuos, semicontínuos e contínuos, utilizando vários meios de cultura. Os dados encontrados mostram que a produtividade de biomassa no cultivo contínuo obteve maior rendimento utilizando o mesmo meio de cultivo. O processo utilizado em lote teve como desvantagem o tempo de inatividade do reator, necessário para limpeza, além da inicialização entre as execuções, o que onera em termos de mão de obra, água e produtos químicos. Além disso, produz-se pouca biomassa para cobrir os gastos do processo.

Peter *et al.* (2022) sugerem que a aplicação do sistema semicontínuo/contínuo pode resolver esse entrave econômico, uma vez que a produtividade da biomassa será alcançada em horas ou dias de cultivo e pode ser mantida por um período mais longo em um estado otimizado. Ainda conforme o autor, na aplicação do cultivo em sistema contínuo a biomassa apresenta composição lipídica e de carboidratos em rendimento ótimo, o que contribui para uma produção eficiente de biocombustíveis e diminui a redução do tempo de inatividade em razão da substituição da retirada de células maturadas simultaneamente com entrada do meio fresco. Portanto, o cultivo contínuo de microalgas tem uma chance maior de ser escalado como piloto para produção de biocombustíveis.

Conforme Vo *et al.* (2019), em cada tipo de fotobiorreator a base de microalgas tem suas vantagens e desvantagens quando relacionamos critérios como rendimento de biomassa, eficiência de remoção de poluentes e nível de *upscaling*. Esses critérios são sempre revisados para otimizar o rendimento da biomassa, a eficiência na remoção de contaminantes, bem como a redução no custo e domínio do espaço. Os autores observaram uma variedade de tipos de fotobiorreatores (PBs), tais como: placa plana; coluna; tubular; *soft-frame* e configuração híbrida. *Soft-frame* e híbrido são as versões mais recentes com maior flexibilidade, desempenho e pegada menor, sendo que PBs de placa plana foram o que apresentaram maior rendimento de biomassa — chegando a ter de 5 a 20 vezes mais rendimento quando comparados aos demais

PBs. Já os PBs de estrutura macia e membrana chegaram a remover produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais em até 100%.

Foi realizada por Viruela *et al.* (2018) a avaliação do desempenho de um fotobiorreator de membrana em escala piloto com a finalidade de tratar o sistema de um fotobiorreator em condições anaeróbicas de membrana. Analisaram-se, também, os dados experimentais sobre produtividade de microalgas, recuperação de nutrientes, biofixação de CO₂ e potencial de recuperação de energia em diferentes condições operacionais. Isso vai contribuir para um cultivo mais econômico de microalgas em águas residuais. As taxas máximas de recuperação de N e P foram de 7,68 mg L⁻¹d⁻¹ e 1,17 mg L⁻¹d⁻¹, respectivamente. Já a produtividade foi de 66 mg VSS L⁻¹d⁻¹. Reduzir a fração volumétrica fótica de 27,2% para 13,6% resultou em um aumento de 40% na produtividade da biomassa.

Com isso, os autores concluíram que os sistemas de cultivo de microalgas podem contribuir para reduzir a demanda de energia e a pegada de carbono do processo de tratamento de águas residuais devido à captação de energia solar para o crescimento da biomassa de algas, enquanto recuperam nutrientes valiosos do esgoto. Além disso, utilizando membranas de ultrafiltração (tamanho de poro de 0,03 µm), o MPBR produz um permeado de alta qualidade (ou seja, níveis insignificantes de patógenos e sólidos suspensos) que pode ser útil para reutilização e aplicações de reciclagem, com fins de irrigação.

Com a finalidade de aliar as vantagens do sistema de cultivo em lagoa aberta e em fotobiorreatores e, com isso, diminuir os custos cultivo e ao mesmo tempo aumentar a produção de biomassa microalgal, García-Galán *et al.* (2018) fizeram um projeto usando fotobiorreatores tubulares horizontais híbridos em grande escala para promover a fitobiorremediação do escoamento agrícola usando microalgas. A eficiência do sistema foi acompanhada durante os quatro primeiros meses de operação em termos de remediação de escoamento agrícola e produção de biomassa.

A biomassa das microalgas foi caracterizada pela microscopia óptica e os resultados indicaram que as espécies de microalgas são pertencentes ao gênero *Pediastrum sp.*, *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, e *Cianobactéria Gloeotheca sp.* Esses gêneros foram identificados pela microscopia usando um microscópio Zeiss Axioskop 40 e consultando livros de texto taxonômico padrão. Os resultados obtidos nesse sistema de cultivo misto mostraram um aumento na produtividade de 22,8% em um intervalo de 4 dias, sendo 13,8g obtido no primeiro dia (no inverno) e 74,4g em 3 dias na primavera, o que mostra a influência do clima. A remoção dos nutrientes foi de 72% o que mostra a efetividade do tratamento usando microalgas.

Naira *et al.* (2020) projetaram um misturador interno por bolhas com flutuação frequente de claro/escuro com o objetivo de melhorar a eficiência de utilização da luz. O sistema foi instalado em uma coluna de bolhas PBR (fotobiorreatores) para melhorar as produtividades de biomassa e obter biodiesel usando a microalga *Chlorella sp.* A parte experimental foi realizada com cultivo de 10 L, com misturador sob luz solar simulada, sem exigência de energia extra e com o uso de aeração. Como resultado, foi obtido aumento nas produtividades de biomassa e biodiesel de 13% e 62%, respectivamente, quando comparado aos cultivos com e sem misturador. Foi obtida, também, uma melhoria na produtividade de biomassa que correspondeu a 33%, além disso foram realizados os testes para melhorar a produtividade e a qualidade do biodiesel em condições naturais sob luz solar. A indução lipídica foi iniciada logo após o crescimento das microalgas, produzindo mais biodiesel.

Dentre os processos de cultivo com o uso de biorreatores, os de membrana (MBR) tem sido os mais empregados para o tratamento de águas residuais urbanas e industriais devido a maior carga orgânica desses resíduos. Esse sistema apresenta maior eficiência, menor exigência de área e rendimento de biomassa, além de a água residual, após o tratamento em MBR, poder ser utilizada para o crescimento de microalgas (Ahn *et al.*, 2022).

Em função da discussão sobre os sistemas de cultivo de microalgas, ficou constatado por Laezza *et al.* (2022) que, em termos globais, pouco mais de 80% da biomassa de microalgas é obtida em sistemas de cultivo abertos devido, principalmente, aos baixos custos desses sistemas. Apesar disso, é previsto que os cultivos em sistemas fechados (fotobiorreatores) cresça até 2024 por causa dos benefícios que esse tipo de cultivo proporciona, visto que é possível controlar parâmetros como temperatura, luz, pH e nutrientes, obtendo, assim, maior densidade celular e biomassa.

3.2 Metabolismo das microalgas

O metabolismo das microalgas corresponde às quatro formas de cultivo, fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e fotoheterotrófico. Cada forma de metabolismo tem as suas peculiaridades e o crescimento fotoautotrófico depende apenas do gás CO₂, luz solar e nutrientes inorgânicos (Prabha *et al.*, 2022). Cada biomassa de microalga transforma aproximadamente cerca de 1,8 libras de CO₂ em biomassa, com isso reduz-se a quantidade desse gás no meio ambiente e, também, há uma contribuição para a redução do efeito estufa e a conseqüente redução da mudança climática (Abdelfattah *et al.*, 2023). Esse tipo de cultivo

apresenta como desvantagem a baixa produtividade de biomassa e isso ocorre devido às restrições de luz que impactam o crescimento celular (Prabha *et al.*, 2022).

Por outro lado, o cultivo mixotrófico utiliza a luz solar e adiciona o carbono orgânico como nutriente, permitindo obter uma quantidade elevada de biomassa (Corrêa *et al.*, 2021). O cultivo heterotrófico ocorre na ausência de luz e é realizado apenas com uma fonte de carbono orgânico, porém nem todas as espécies se adaptam a essa forma de cultivo (Prabha *et al.*, 2022). Segundo Abdelfattah *et al.* (2023), algumas espécies de microalgas são heterotróficas obrigatórias o que as tornam ideais para realizar a fitorremediação de resíduos industriais como etanol, glicose, acetato e glicerol. Cultivos mixotróficos e heterotróficos, além de fixar o CO₂ do ambiente, também assimilam P e N que são convertidos em proteínas, carboidratos, lipídios e outros produtos de valor agregado.

Para La Bella *et al.* (2022), define-se cultivo autotrófico como aquele em que as microalgas crescem obtendo energia pela absorção de luz, visando a redução de CO₂ do processo de oxidação dos substratos com liberação de O₂. O heterotrófico ocorre quando as microalgas crescem usando carbono orgânico no escuro, resolvendo problemas associados à presença/distribuição de luz e CO₂. Já no cultivo mixotrófico, as microalgas crescem em função das condições ambientais adotadas, sendo que o CO₂ e o carbono orgânico podem ser assimilados em condições autotróficas e mixotróficas, de acordo com a disponibilidade no meio.

Rajendran, Nagarajan e Karuppan (2020) realizaram o cultivo mixotrófico da microalga *Scenedesmus sp.* usando o glicerol bruto como fonte de carbono orgânico com o objetivo de aumentar a produtividade de biomassa. A seguinte composição de glicerol foi usada no cultivo: glicerol ($743,6 \pm 0,014$ mg L⁻¹); sabão ($62,6 \pm 0,36$ mg L⁻¹); ácidos graxos livres ($1,25 \pm 0,53$ mg g⁻¹); baixa quantidade de nitrogênio total ($22,3 \pm 0,14$) e fósforo ($3,4 \pm 2,230$). Isso o torna adequado para o cultivo mixotrófico dessa microalga.

Em relação à produtividade de biomassa, foi avaliada a relação N/P > fonte de glicerol bruto > concentração de metanol > concentração de KOH. Como N e P são os macronutrientes essenciais para o crescimento das microalgas, a relação que apresentou maior influência foi N/P, que apresentou maior produtividade de biomassa ($310,18$ mg L⁻¹ dia⁻¹). Já a de menor influência foi do KOH. Os resultados obtidos mostraram que a adição de glicerol aumentou a produtividade de biomassa.

Wagenen, De Francisci e Angelidaki (2015) realizaram um estudo comparativo de estratégias de crescimento mixotrófico com autotrófico/heterotrófico cíclico visando otimizar a produtividade de *Chlorella sorokiniana*. Essa microalga foi cultivada mixotroficamente com

o meio suplementado com acetato de sódio em concentrações equivalentes à concentração de ácidos graxos voláteis encontrados no efluente do digestor anaeróbio. Foram utilizados ciclos de luz, escuro 16:8, e diferentes estratégias para adição de acetato. A estratégia de adição do acetato durante o período claro foi para o processo mixotrófico e durante o período escuro para a estratégia *autotrófica cíclica/heterotrófica*. As produtividades obtidas foram de $0,99\text{ g L}^{-1}\text{ dia}^{-1}$, $1,04\text{ g L}^{-1}\text{ dia}^{-1}$ e $1,2\text{ g L}^{-1}\text{ dia}^{-1}$ para cultivos autotrófico, mixotrófico e heterotrófico/autotrófico cíclico, respectivamente.

Javed *et al.* (2022) realizaram o cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* em meio autotrófico (BG-11) heterotrófico (adição de 100% do resíduo da indústria têxtil) e mixotrófico com adição de 75%, 50% e 25%. Em todos os cultivos as células cresceram lentamente nos primeiros quatro dias devido à aclimatização às condições de crescimento. Em seguida, as células passam a crescer rapidamente e após 10 dias de cultivo atingiu-se a fase exponencial. O cultivo atingiu a fase estacionária em 2 dias. O crescimento específico do meio com adição de 50% do resíduo foi maior que no meio de controle (BG-11). No meio heterotrófico o crescimento foi o menor observado e isso ocorre porque a baixa concentração de nutrientes resultou no baixo crescimento das células.

Os resultados obtidos mostraram que o cultivo mixotrófico com adição do resíduo com concentração de 50% foi o ideal para um maior crescimento das células e, também, para sua fitorremediação. Quanto à produtividade de biomassa, o meio mixotrófico com adição de 50% apresentou maior produtividade ($2,91 \pm 0,01\text{ g L}^{-1}$) que o meio controle ($2,34 \pm 0,03\text{ g L}^{-1}$). O meio heterotrófico teve produtividade de $1,4 \pm 0,001\text{ g L}^{-1}$ o que mostra que o cultivo heterotrófico apresentou o menor crescimento quando comparado aos demais cultivos. Os meios mixotrófico com adição de 25% e 75% do resíduo da indústria têxtil apresentaram baixa produtividade de biomassa.

Carboidratos e lipídios são geralmente as principais macromoléculas das microalgas, porém essa variação depende de parâmetros como condições de cultivo e variações de espécie de microalgas. Sendo assim, é possível inferir que cada microalga tem a sua peculiaridade em relação à composição, macromoléculas e suas proporções (Li; Srivatsa; Bhattacharya, 2019).

3.3 Potencial do tratamento de águas pelas microalgas

As microalgas são microrganismos versáteis, que se adaptam a condições hostis e podem ser cultivadas em águas residuais para obter biomassa e remediação de nutrientes. A biomassa obtida é composta por carboidratos, lipídios e proteínas, que podem ser aplicadas na

produção de biocombustíveis e químicos de valor agregado, tais como, pigmentos, solventes para a indústria química e nutracêuticos (Debiagi *et al.*, 2017).

Conforme La Bella *et al.* (2022), usar as microalgas é uma opção excelente pela sua capacidade de tratar efluentes em única etapa e a biomassa obtida pode ser aplicada em biocombustíveis e químicos de valor agregado. Esses autores enfatizam que as microalgas mais usadas no tratamento de águas residuais são *Chlorella sp.*, *Ankistrodesmus sp.* e *Scenedesmus sp.* Elas apresentam diferentes taxas de remoção de poluentes que contém nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amônio (NH_4^+), nitrogênio total (N), fósforo (P), demanda bioquímica de oxigênio (DBO_5) e demanda química de oxigênio (DQO).

As biomassas obtidas são ambientalmente corretas visto que são renováveis, biodegradáveis e neutras em carbono durante todo o ciclo de vida, sendo que na fase escura do processo de fotossíntese elas absorvem o dióxido de carbono do meio e o transformam em oxigênio e pentoses (Suganya *et al.*, 2016). Carboidratos e lipídios são utilizados para produção de diferentes tipos de biocombustíveis, úteis como fonte de energia para a indústria e para o transporte. A biomassa de microalgas obtida durante o processo de biorremediação de águas residuais é abundante nessas macromoléculas, ou seja, em lipídios (10 a 50% nas células de microalgas) e carboidratos (Bhattacharya; Goswami, 2020).

As principais vantagens do uso de águas residuais no cultivo de microalgas são: redução dos custos de tratamento de águas residuais; remoção de nutrientes em concentrações muito baixas; fixação de dióxido de carbono, no caso o carbono inorgânico oriundo da queima de combustíveis fósseis; cultivo de microalgas com nutrientes limitados sem a necessidade de acréscimo de nutrientes além dos já encontrados no resíduo; e, por fim, destaca-se a aplicação da biomassa para produção de biocombustíveis (Whitton *et al.*, 2015).

Diversos estudos aplicando variedades de espécies de microalgas têm sido realizados para o tratamento de resíduos de indústria e mitigação de CO_2 oriundo de atividades antrópicas. Tem sido aplicado o conceito de biorrefinaria, pois ao tratar o resíduo reduz-se o custo do cultivo de microalgas e, ao mesmo tempo, obtém-se biomassa que por processos de conversão termoquímica pode ser aplicada na produção de biodiesel por conversão bioquímica, bioetanol, dentre outros exemplos.

A microalga *Chlorella sorokiniana* foi cultivada em condições mixotróficas com adição de óleo de Palma (POME) em diferentes diluições de 80%, 60%, 40% e 20%. O cultivo foi realizado durante 15 dias e removeu nitrato, fósforo total, demanda química de oxigênio (DQO) e amônio nas faixas de 33-71%, 29-64%, 19-91% e 70-98%. O POME foi escolhido para realizar o cultivo devido ser um resíduo com alta concentração de nutrientes. Após o cultivo, a

água foi analisada e concluiu-se que a remoção dos parâmetros analisados ficou acima do limite permitido para descarte, sendo necessário um tratamento complementar (Haruna; Mohamad; Jamaluddin, 2017).

As microalgas *Planktochlorella nurekis* e *Chlamydomonas reinhardtii* foram utilizadas para realizar a remediação do efluente coletado da indústria de papel e celulose. A proporção do resíduo utilizado nos cultivos foi de 70% e 30% de água, a biomassa foi coletada no 12º dia. Os resíduos oriundos da indústria de papel e celulose continham contaminantes como nitrato, fosfato, além de metais pesados como Ni, Cr, Co, Cu, Zn, As, Sr e Cd.

As microalgas *P. nurekis* e *C. reinhardtii* realizaram a mitigação do nitrato (96% e 86%), fosfato (100% e 88%) e DQO (92% e 93%). Quanto aos metais pesados a microalga *P. nurekis* reduziu: 100% do Cr; 46% do Co; 44% do Ni; 49% do Cu; 68% do Zn; 57% do As; 86% do Sr; e 86% do Cd. Já a *C. Reinhardtii* reduziu em 100%, 46%, 44%, 49%, 68%, 57%, 86% e 86% os metais Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr e Cd, respectivamente. Foi observado que o teor lipídico da *P. nurekis* foi superior ao da *C. reinhardtii*, o que mostra que o cultivo foi eficiente na remoção dos contaminantes e a biomassa obtida apresenta potencial para produção de biodiesel de microalgas (Kumar *et al.*, 2021).

Arutselvan *et al.* (2022) realizaram o tratamento dos efluentes oriundos da indústria têxtil e de curtumes usando quatro microalgas de água doce obtidas do campo Betel: *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus dimorphus*, *Coelastrella sp.* e *Chlorococcum sp.* As microalgas *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus dimorphus* foram cultivadas em consórcio, pois são cepas produtoras de lipídios, possuem crescimento eficiente e foram testadas para ver o potencial de degradação do efluente usando sistemas de laboratório e lagoas com volume de 30 L, além da produção de lipídios.

Após o cultivo das microalgas foi observado que o consórcio *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus dimorphus* produziu altas quantidades de lipídios em condições de laboratório, cerca de 31,20% e 29,50%, usando efluente de fábrica têxtil e efluente industrial de curtume, respectivamente. Já em condições externas, o lipídio foi de 30,40% e 28,50%, usando efluente de fábrica têxtil e efluente industrial de curtume, respectivamente. A análise de ácidos graxos mostrou que o principal ácido graxo encontrado foi o ácido oleico, o que torna a biomassa apta para a produção de biodiesel. Os efluentes da indústria têxtil e de curtume são compostos por TDS (sólidos totais dissolvidos), EC, nitrito, nitrato, sódio, fosfato, cálcio, magnésio, chumbo, ferro, cobre e cádmio, sendo reduzidos com a remediação por microalgas.

O tratamento de resíduos oriundos de efluentes industriais têxteis e produção de biodiesel usando *Chlorella vulgaris* foi testado por Javed *et al.* (2022). O cultivo foi realizado

no meio de controle, com adição de 100%, 75%, 50% e 25% de resíduo. As biomassas obtidas nos cultivos foram analisadas para determinar suas composições, sendo determinados os ésteres metílicos de ácidos graxos que revelaram a presença de ácidos graxos saturados e insaturados. Foram obtidos em maior concentração o ácido palmítico, ácido linoleico e o ácido linolênico nas biomassas do meio de controle e da adição de 100% do resíduo. Eles foram encontrados em todas as biomassas FAME de cadeia longa (C16-C22) que são favoráveis para produção de biodiesel de boa qualidade.

Outra indústria que produz bastante resíduo é a de laticínios. O subproduto oriundo é o soro do queijo, composto rico em nutrientes, e o tratamento dele é um dos mais críticos para essa indústria. Visando a redução dos custos do cultivo e o tratamento do resíduo, Salla (2016) realizou o cultivo mixotrófico da *S. platensis* com a diluição do meio *Zarrouk* a 20% e adição do resíduo com altos teores de lactose e baixos níveis de fósforo, potássio e ferro. O resultado foi o aumento da produtividade de carboidratos na biomassa e a redução dos custos de produção de microalgas. Os altos volumes de resíduos adicionados às culturas reduziram a quantidade de resíduos descartados no meio ambiente.

A microalga *S. Platensis* foi cultivada por Manmai *et al.* (2022) em águas residuais de laticínios usando um pré-tratamento alcalino, com o objetivo de tratar o resíduo e obter biomassa para produção de bioetanol. O estudo das águas residuais das indústrias lácteas mostrou que o teor de nitrogênio foi de 4,2% a 6% nas fábricas de manteiga, 3,7% de DBO nas fábricas de queijo e uma quantidade de fosfato. Esses nutrientes podem ser utilizados no cultivo de microalgas para reduzir os custos com os nutrientes necessários para o crescimento das microalgas e não podem ser descartados antes de serem removidos do resíduo. O estudo comprovou que a microalga foi eficiente para a mitigação do resíduo oriundo da indústria láctea.

O resíduo da indústria do leite foi usado no cultivo de microalgas presentes em uma amostra coletada no lago Mamandur (Índia). Após o isolamento, a que apresentou maior produção quando cultivada com soro de queijo foi a *C. sorokiniana*. Após o crescimento desse microrganismo, segundo estudo realizado por Dhandayuthapani *et al.* (2022), a água usada no cultivo foi analisada e observou-se que o processo de fitorremediação foi eficiente, pois removeu 94,8% de DQO. O processo de fitorremediação na remoção dos nutrientes da água residual foi bastante eficiente e a água do cultivo pode tanto ser reutilizada em um novo cultivo quanto em atividades como agricultura.

Utilizando os resíduos da suinocultura, isto é, efluente suíno não esterilizado nos meios com concentração de 0% (controle), 25%, 50%, 75% e 100%, Acebu *et al.* (2022) cultivaram

as microalgas *Chlorella sorokiniana* e *Chlorella vulgaris* com a finalidade de avaliar o potencial de remoção de nutrientes desse efluente. Foi realizado o cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* no meio com 25% de água residual e 25% do meio BG-11 e obteve-se a remoção do nitrogênio em 54,2%.

O processo de produção de etanol é realizado utilizando uma quantidade elevada de água, a cada 1 L de etanol obtido são produzidos 15 L de água de etanol residual. Visando tratar essa água, Koocal *et al.* (2022) realizaram o processo de biorremediação em duas etapas. A primeira é a filtração da parte sólida, obtendo uma taxa de remoção de 99,4%, removendo pigmentos de melanoidina tóxicos e poluentes suspensos. O líquido obtido na primeira etapa é incolor e foi utilizado para cultivar as microalgas *Parachlorella kessleri* (água marinha), *Chlorella vulgaris* e *Chlorella sorokiniana*, as últimas em água doce. Após o cultivo (12 dias), a água utilizada foi analisada e os parâmetros obtidos mostram que a DQO reduziu de 28.900 mg L⁻¹ para 55-118 mg L⁻¹, DBO diminuiu de 7200 mg L⁻¹ para 28–55 mg L⁻¹, além da redução no teor de carbono total (98,7%), fenol (64%), açúcares (99,5%), nutrientes e concentrações de metais tóxicos.

Com isso, mostrou-se que o cultivo de microalgas usando resíduos é eficiente para a remoção de nutrientes e que essa atividade contribui para a redução dos gastos com nutrientes para as microalgas e, também, para a diminuição dos gastos com água e com seu tratamento. Ficou demonstrado, também, que águas residuais de diversas origens requerem diferentes estratégias e tipos de tratamento.

3.4 Aplicações da biomassa de microalgas para produção de biocombustíveis

Por possuírem características tais como alta taxa de fotossíntese, alta taxa de lipídios, elevada taxa de crescimento e conseqüentemente alta produtividade de biomassa, as microalgas são excelentes matérias-primas para a produção de biocombustíveis, ou seja, combustíveis sustentáveis e economicamente viáveis obtidos a partir de recursos biológicos (Kumar *et al.*, 2022b).

Os biocombustíveis são classificados em sólidos (carvão), líquidos (bioetanol, biodiesel) e gasosos (biohidrogênio e gás de síntese). Cada macromolécula da biomassa contribui para a formação desses biocombustíveis: com os carboidratos obtemos o bioetanol (processo bioquímico também chamado de fermentação e digestão anaeróbia) e com os lipídios, pelo processo de pirólise, o biodiesel. Em temperaturas mais baixas de pirólise obtemos o biocarvão, já os compostos gasosos podem ser obtidos em temperaturas superiores a 700 °C

(Kumar *et al.*, 2022b). Glicogênio, amido e ágar são diferentes carboidratos encontrados nas microalgas, eles podem ser convertidos em açúcares que pelo processo de fermentação viram bioetanol (Khan; Shin; Kim, 2018).

Dhandayuthapani *et al.* (2022) realizaram a coleta de amostras de água com notável população de microalgas em quatro locais separados na orla do lago Mamandur (Índia). Realizaram o isolamento de microalgas visando cultivá-las em águas residuais oriundas de indústrias lácteas e, com isso, realizaram a fitorremediação desse resíduo, obtendo, ao mesmo tempo, biomassa para produção de bioetanol. A produção do etanol foi realizada a partir do hidrolisado da biomassa, que foi obtido submetendo a biomassa à digestão ultrassônica.

Cerca de 1 g de biomassa de microalgas foi misturada com 100 mL de ácido sulfúrico (3%, v/v) e fervido a 160 °C por 15 minutos. Posteriormente, o pH da biomassa digerida foi ajustado para quatro e empregado como meio de produção de etanol. A microalga que apresentou maior produção quando cultivada com soro de queijo foi a *C. sorokiniana*. A produção de bioetanol teve um rendimento de 13,67 g L⁻¹, o que equivale a 54% em peso. Concluiu-se que a produção de biomassa usando a microalga *C. sorokiniana* é eficiente para a produção de biomassa rica em carboidrato com aplicação na produção de bioetanol.

Acebu *et al.* (2022) estudaram a produção de bioetanol a partir do cultivo de *Chlorella sorokiniana* e *Chlorella vulgaris* em efluente suíno não esterilizado, analisando o potencial de acúmulo de carboidratos no cultivo dessas microalgas. Foi calculado o teor máximo de carboidratos no meio de 10% usando as duas microalgas, resultando em 42,5% e produtividade de 189 mg L⁻¹ d⁻¹. Realizou-se, também, o cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* no meio com 25% de água residual e 25% do meio BG-11, obtendo um aumento na produtividade máxima de carboidratos de 266 mg L⁻¹ d⁻¹. O meio com concentração de 25% de adição do resíduo da suinocultura foi o que apresentou melhor rendimento.

Foi concluído que a *C. vulgaris* tem maior crescimento de biomassa, teor de carboidratos e produtividade de carboidratos quando comparada à *Chlorella sorokiniana*. Algumas condições de estresse, como intensidade de luz, tamanho do inóculo e período de colheita, influenciaram positivamente no crescimento da biomassa, da concentração de carboidratos e da absorção de nitrogênio. A biomassa obtida no cultivo de 25% de adição de resíduo suíno, foi fermentada para produção de bioetanol usando a *Saccharomyces cerevisiae* FAY-1. A concentração de bioetanol máxima foi de 4,2 g L⁻¹ e rendimento de 84,2% após 8 horas de fermentação. Ficou evidenciado que a biomassa da *C. vulgaris* apresenta uma quantidade elevada de carboidratos o que a torna excelente para conversão em bioetanol.

Manmai *et al.* (2022) cultivaram a microalga *S. platensis* em águas residuais de laticínios usando um pré-tratamento alcalino com o objetivo obter biomassa para produção de bioetanol. O estudo das águas residuais das indústrias lácteas mostrou que o teor de nitrogênio foi de 4,2 a 6% nas fábricas de manteiga, 3,7% de DBO nas fábricas de queijo e uma quantidade de fosfato. Esses nutrientes podem ser utilizados no cultivo de microalgas para reduzir os custos relacionados aos nutrientes necessários ao crescimento das microalgas e não podem ser descartados antes de serem removidos do resíduo. Aliado a isso, a biomassa obtida nesse cultivo pode ser utilizada na produção de biocombustíveis, por isso esse resíduo pode ser usado no cultivo das microalgas.

Quanto ao pré-tratamento químico, ele foi realizado usando o hidróxido de sódio (2%) em combinação com o tempo (d) de pré-tratamento. Para a hidrólise foram usados fungos (*Trichoderma sp.*) e enzima celulase comercial. Para a produção de bioetanol foi utilizada a biomassa hidrolisada de microalgas pré-tratadas em açúcar total, açúcar reduzido e açúcar fermentável. Sendo assim, o pré-tratamento, com o NaOH, enzima com hidrólise de microalgas e enzima para hidratação de microrganismos, pode ser utilizado para produzir bioetanol de forma mais econômica e eficiente.

O processo de produção de etanol é realizado utilizando uma quantidade elevada de água, a cada 1 L de etanol obtido são produzidos 15 L de água de etanol residual. Koocal *et al.* (2022) cultivaram as microalgas *Parachlorella kessleri* (água marinha), *Chlorella vulgaris* e *Chlorella sorokiniana* (ambas de água doce), com a água residual da produção de etanol para obter biomassa e produzir biocombustíveis. Quanto à biomassa das microalgas, temos que a faixa de carboidratos para as três microalgas está na faixa de 23,8 a 50,7 mg e a microalga *Chlorella vulgaris* foi a que apresentou maior teor de carboidratos. Sendo assim, o cultivo de microalgas para produção de etanol usando resíduo da produção de etanol é eficiente, visto que a biomassa obtida apresentou elevada concentração de carboidratos.

Huang *et al.* (2016) utilizaram as microalgas *Cyanobacteria sp.* e *Bacillariophyta sp.*, ricas em proteínas e cinzas, para obtenção de bio-óleo pelo processo da liquefação hidrotérmica. As composições dos bio-óleos foram analisadas por cromatografia gasosa acoplada ao detector de massa e a identificação dos compostos orgânicos foi realizada por similaridade dos espectros dos componentes da amostra com a biblioteca, sendo os conteúdos dos componentes orgânicos realizados pela normalização da área.

O processo de conversão das biomassas usando a técnica de conversão de HTL na faixa de temperatura de 250-350 °C e tempo de residência de 15 a 90 minutos mostrou diferentes eficiências de conversão: de *Cyanobacteria sp.* ficou na faixa de 60,51–70,83%; enquanto a de

Bacillariophyta sp. variou de 64,20% a 74,3%, um pouco inferior ao esperado, mas justificado devido ao alto teor de cinzas da matéria-prima. Observou-se que a eficiência de conversão aumentou junto com a temperatura, enquanto se manteve constante com a extensão do tempo de retenção de 15 para 90 minutos, indicando que a temperatura desempenhou um papel mais influente na eficiência de conversão. Um curto tempo de espera de 15 minutos foi suficiente para a decomposição a 325 °C, no entanto, em termos de rendimento de bio-óleo, um tempo de espera mais longo foi necessário para atingir o maior rendimento.

Ambat *et al.* (2019) realizaram o cultivo das microalgas *S. communis*, *S. ecornis* e *Chlamydomonas sp.* no efluente da fábrica de fertilizantes e a biomassa obtida aplicada na conversão de biodiesel. Foi identificado que a concentração da biomassa, o teor de lipídios e a composição do FAME depende tanto do pH do meio, quanto dos nutrientes disponíveis no cultivo. Isso porque em pH alcalino as microalgas *S. communis* e *S. ecornis* cresceram mais quando comparadas a *Chlamydomonas sp.* e a produtividade de biomassa foi máxima quando a concentração de nutrientes foi aumentada.

A produção de lipídios de *Chlamydomonas sp.* em pH = 7,5 foi a mais significativa e no pH = 7,5 as microalgas *S. communis* e *S. ecornis* apresentaram maior teor de lipídios. As propriedades do biocombustível (FAME) obtido das microalgas eram adequadas e foram maiores em *Chlamydomonas sp.*, *S. ecornis* e *S. communis*, respectivamente, significando que nesse sistema de cultivo a produção de biocombustível foi econômica.

Chagas *et al.* (2016) realizaram a pirólise catalítica da biomassa da *S. Platensis* com a finalidade de obter biocombustíveis e produtos químicos de valor agregado. Analisou-se o comportamento térmico da biomassa utilizando a termogravimetria, realizada da temperatura ambiente até os 900 °C, em quatro razões de aquecimento 10, 20, 40 e 100 °C min⁻¹. Foi realizada a pirólise não catalítica e catalítica, usando os catalisadores H-ZSM5, Y, β, ferrierita e zeólita mordenita em pó anidro, para avaliar a produção de hidrocarbonetos específicos, compostos oxigenados e nitrogenados em três diferentes proporções catalisador/biomassa.

Os resultados obtidos mostraram que a produção dos compostos hidrocarbonetos específicos, compostos oxigenados e nitrogenados, tiveram rendimento máximo a 450 °C quando o tempo de residência foi de 30 segundos sem o uso de catalisadores. Os rendimentos de vapor condensável na pirólise não catalítica foram influenciados pelas taxas de aquecimento do método (500 °C s⁻¹, 750 °C s⁻¹ e 1000 °C s⁻¹). Já os rendimentos aromáticos aumentaram conforme a relação catalisador/biomassa aumentou de 1:1 para 10:1; H-ZSM5 (23) e H-β (38), sendo capazes de aumentar os rendimentos aromáticos.

No geral: H-ZSM5 foi melhor em gerar maiores rendimentos de hidrocarbonetos em comparação com H- β ; H-ZSM5 reduziu os fenóis pela maior porcentagem; e os compostos nitrogenados totais não foram reduzidos significativamente pelas zeólitas. Concluiu-se que a biomassa de *S. platensis* tem potencial para a produção de bio-óleo e que é possível obter um bio-óleo de melhor qualidade pela conversão de compostos nitrogenados em aromáticos com o uso de catalisadores.

Almeida *et al.* (2017) realizaram a caracterização das microalgas *Chlorella vulgaris* e *Arthrospira platensis* cultivadas com vinhaça e a pirólise com interface a um cromatógrafo gasoso acoplado à massa (Py-CG/MS). Ou seja, degradação térmica das biomassas na ausência de oxigênio para obter bio-óleo e produtos químicos de valor agregado. A micropirólise foi realizada em um pirolisador 5200 HP-R CDS Analytical Pyroprobe com interface a um cromatógrafo VARIAN 3900 CG-MS a gás. Os experimentos foram realizados a 600 °C com uma taxa de aquecimento de 10,0 °C ms⁻¹, usando aproximadamente 1 mg de biomassa das microalgas.

A biomassa das microalgas são proteicas e apresentaram baixo teor de cinzas, alto poder calorífico e alto teor de material volátil, o que pode, com a pirólise, apresentar um alto rendimento de bio-óleo. O resultado da pirólise indicou xileno, estireno e tolueno que são produtos químicos de valor agregado que conferem boas propriedades ao bio-óleo. Por outro lado, também foram encontradas grandes quantidades de compostos nitrogenados, que precisam ser removidos do bio-óleo por produzirem gases Nox durante a queima. O tolueno foi produzido em quantidade significativa, sendo o principal produto da pirólise em ambas as microalgas. Portanto, o grande potencial energético dessas microalgas as torna uma interessante fonte de bio-óleo, ainda mais interessante para a produção de bioprodutos com a pirólise.

Chagas *et al.* (2021) cultivaram a cianobactéria *S. platenses*, no meio autotrófico e mixotrófico, usando o melaço da cana de açúcar, sendo que a biomassa obtida foi pirolisada e o produto volátil obtido foi analisado por cromatografia gasosa e identificado no detector de massa. O comportamento térmico também foi realizado pela análise termogravimétrica e os comportamentos térmicos de ambas as biomassas foram semelhantes em diferentes taxas de aquecimento.

Observou-se que a forma de cultivo influenciou na composição da biomassa e que, como consequência, os produtos obtidos na pirólise das biomassas dos cultivos autotrófico e mixotrófico foram diferentes. No cultivo mixotrófico, teores de compostos voláteis, fenóis, oxigenados e nitrogenados, aumentaram e os teores de hidrocarbonetos não aromáticos e aromáticos diminuíram quando comparados ao meio autotrófico. Para ambas as biomassas os

constituintes hidrocarbonetos, compostos oxigenados e nitrogenados foram produzidos em diferentes quantidades. Os compostos oxigenados foram predominantes para ambas as condições de cultivo.

Visando estudar a pirólise de biomassas de microalgas, Miao, Wu e Yang (2004 *apud* Marcilla *et al.*, 2013) obtiveram rendimentos de bio-óleo de 18% e HHV de 30MJ kg⁻¹ e 24% e HHV 29MJ kg⁻¹, usando o processo de conversão de biomassa na ausência de oxigênio das microalgas *Chlorella prothothecoides* e *Microcystis aeruginosa*, respectivamente. Essas microalgas foram cultivadas fotoautotroficamente e convertidas em bio-óleo pela pirólise rápida. Depois, a microalga *Chlorella prothothecoides* foi cultivada heterotroficamente e o HHV do bio-óleo obtido após o processo de pirólise foi 3,4 vezes maior que o obtido fotoheterotroficamente. De acordo com os valores encontrados, o processo de conversão de biomassa em bio-óleo pela pirólise tem potencial.

Com o objetivo obter bio-óleo utilizando o processo de degradação térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio, Casoni *et al.* (2016) realizaram a pirólise rápida da microalga *Rhizoclonium sp.* A pirólise rápida foi realizada em um reator vertical de vidro, com a temperatura do forno a 400 °C, a massa da amostra em aproximadamente 3 g e atmosfera inerte (nitrogênio). Alguns experimentos foram realizados usando 100 mg dos catalisadores Al-Fe/MCM-41, SBA-15 e Cu/SBA-15, com objetivo de diminuir a concentração de álcoois graxos e outros produtos de alto peso molecular, uma vez que seus sítios de acidez moderada promovem reações de degradação.

Os bio-óleos da pirólise foram estudados por cromatografia gasosa acoplada à espectroscopia de massa e foi possível a identificação dos picos cromatográficos de acordo com a biblioteca NIST, com 80% de similaridade. A quantificação dos bio-óleos foi determinada considerando que a área do pico é diretamente proporcional à concentração de cada composto na amostra. O rendimento prático para o bio-óleo foi de aproximadamente 35% em peso e sendo ele rico em Fitol, um produto altamente valioso utilizado principalmente na indústria de fragrâncias. Além disso, os bio-óleos obtidos apresentaram aminas, que são originadas da degradação de proteínas e neutralizam parcialmente a acidez do bio-óleo. Considerando a natureza complexa dos bio-óleos e das reações de craqueamento catalítico (envolvendo desidratação, descarboxilação, descarbonilação e rearranjo), o cenário da pirólise catalítica não pôde ser totalmente descrito.

O efeito da temperatura em condições anaeróbicas foi estudado por Dai *et al.* (2019) usando as diferentes zeólitas como catalisadores na biomassa de *Arthrospira platensis* (*Spirulina*). O objetivo era avaliar a cinética de decomposição térmica da biomassa microalgal,

realizando análises termogravimétricas pelo método isoconversional integral de Vyazovkin. A micropirólise foi realizada usando um pirolisador com interface a um cromatógrafo acoplado ao detector de massa (Py-CG/MS).

Os resultados obtidos mostraram uma diminuição na formação de compostos orgânicos de cadeia longa, como alcanos, alcenos, ácidos carboxílicos e nitrilas, enquanto a formação de CO₂ aumentou concomitantemente à temperatura de pirólise, de 350 para 800 °C. A adição de catalisadores ZSM5, zeólita-β e zeólita-Y, na proporção 10:1 peso/peso e na temperatura de 600 °C, alterou significativamente o espectro do produto envolvendo a formação de nitrilas, aromáticos e cicloalcanos. A acetonitrila, o benzeno, o tolueno, o xileno, o ciclobutano e o dimetil ciclopropano foram os compostos obtidos em maior quantidade.

Observou-se um aumento significativo na produção de monoaromáticos, poliaromáticos e cicloalcanos ao dobrar a relação da proporção do catalisador, de 2:1 para 50:1 peso/peso, e variar a temperatura de 350 para 600 °C. Já a formação de nitrilas aumentou com o carregamento do catalisador e diminuiu com a temperatura. O HHV dos componentes orgânicos no pirolisado foi aproximadamente 30% maior do que o da alga crua. Esse estudo mostrou que intermediários orgânicos úteis podem ser obtidos via pirólise catalítica rápida de *Spirulina*.

A microalga *Acutodesmus dimorphus* foi isolada de um córrego poluído por efluentes industriais e foi cultivada sob condições de estresse oxidativo induzido pela temperatura para avaliar a biomassa em relação ao potencial de biocombustível. No primeiro experimento de cultivo contínuo, as células foram cultivadas em quatro temperaturas diferentes, 25, 35, 38 e 40 °C, durante 15 dias de crescimento. No segundo experimento de cultivo em dois estágios, as células foram primeiro cultivadas a 25 °C e depois transferidas para 35 °C e 38 °C, após 6, 9 e 12 dias de cultivo, respectivamente.

No cultivo contínuo, o resultado mais alto de biomassa obtida (DCW) foi encontrado em células cultivadas a 35 °C (391,09 mg L⁻¹), significativamente maior do que nas culturas usando 25 °C (248,61 mg L⁻¹) e 38 °C (229,50 mg L⁻¹). No cultivo em duas etapas, observou-se um aumento da DCW concomitante ao aumento da temperatura de cultivo de 25 °C para 35 °C e 38 °C. Com 35 °C em culturas estressadas, o DCW mais alto foi encontrado na cultura estressada por 6 dias (268 mg L⁻¹). Da mesma forma, entre as culturas estressadas a 38 °C, o DCW mais alto foi encontrado na cultura estressada por 6 dias (273 mg L⁻¹). O DCW da cultura com 3 dias de estresse a 35 °C e 38 °C foi de 235 e 236 mg L⁻¹, respectivamente, semelhante ao da cultivada em 25 °C (228 mg L⁻¹).

O teor de carboidratos, foi de 35,09% na cultura contínua à temperatura de 38 °C, já no cultivo realizado em duas etapas, durante 3 dias de estresse a 38 °C, houve maior teor de lipídios

neutros (82% do total de lipídios), juntamente com 32,3% de teor de carboidratos. Esse estudo, realizado por Chokshi *et al.* (2015), sugere que a microalga *A. dimorphus* pode ser usada como matéria-prima potencial para a produção de biocombustíveis à base de microalgas. Sendo assim, a caracterização do bio-óleo de microalgas distintas, cultivadas em meio diversos e com diferentes condições de estresse, tem sido estudada extensivamente por vários pesquisadores.

Os resultados mostram que a composição dos produtos obtidos varia em função das condições aplicadas, como a escolha da microalga, as condições de cultivo e a forma de conversão da biomassa. A conversão termoquímica aplicando a micropirólise, com interface com cromatógrafo e detector de massa, mostra que a biomassa microalgal é uma mistura orgânica formada por centenas de constituintes oxigenados, nitrogenados, hidrocarbonetos e hidrocarbonetos aromáticos, que variam em proporção em função dos parâmetros escolhidos, desde o cultivo até a conversão, isto é, da espécie de microalga.

Por exemplo, os óleos obtidos da pirólise rápida de duas microalgas a 500 °C, *Chlorella protothecoides* e *Microcystis aeruginosa*, apresentaram alta quantidade de hidrocarbonetos, enquanto o resultado de Py-GC/MS para duas macroalgas, *Lyngbya sp.* e *Cladophora sp.*, indicou a presença de uma variedade de cetonas, pentosanas, fenóis e compostos contendo nitrogênio (Pourkarimi *et al.*, 2019). Apesar dessa diferença, tolueno, etilbenzeno, estireno, fenóis, indol, pentadecano, neofitadieno, piridina e alguns outros compostos contendo nitrogênio são comuns a todos os bio-óleos, uma vez que as microalgas apresentam as mesmas macromoléculas (proteínas, carboidratos e lipídios) mudando apenas a proporção (Pourkarimi *et al.*, 2019).

O biogás é uma mistura de gases (CH₄ e CO₂) que com o processo de purificação para retirada do CO₂ pode ser utilizado como combustível na geração de calor ou eletricidade, liquefação em metanol, compressão em combustível para automóveis e purificação em combustível gasoso (Zabed *et al.*, 2020). O rendimento do metano oriundo de culturas como a de açúcar é de 0,189 m³ kg⁻¹, o de biomassa lignocelulósica é de 0,172 m³ kg⁻¹, valores bem menores que os das microalgas verdes e marrons, dados por 0,227 m³ kg⁻¹ e 0,262 m³ kg⁻¹ respectivamente (Zabed *et al.*, 2020).

Conforme Saratale *et al.* (2018), poucos estudos foram realizados sobre microalgas para produção de biometano. As principais microalgas estudadas são *Arthrospora platensis*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Dunaliella salina*, *Chlorella kessleri*, *Scenedesmus obliquus* e *Euglena gracilis*. Elas são utilizadas para produção de metano pelo processo de digestão anaeróbica e nota-se que a capacidade de geração de metano depende da espécie de microalga.

Conforme Jankowska, Sahu e Oleskowicz-Popiel (2017), o uso da biomassa microalgal como única fonte para o processo de digestão anaeróbica não é economicamente viável e, conseqüentemente, não seria possível comercializá-la. Por outra perspectiva, a biomassa de microalgas é considerada uma valiosa matéria-prima para o bioprocessamento. A integração de microalgas em biorrefinarias parece ser uma solução para ultrapassar essa limitação e uma forma de melhorar a viabilidade da microalga para a obtenção de biometano. Considerando o processo da biorrefinaria, teríamos como fonte primária para o cultivo das microalgas as águas residuais, ricas em nutrientes e fonte de água para o cultivo. Esse processo também faria o tratamento das águas residuais.

A biomassa obtida nessa primeira etapa será usada para biodiesel e bioetanol. Já a biomassa residual, que é a orgânica externa adicional, será direcionada ao processo de digestão anaeróbica para produzir biogás. Desse biogás, o metano será separado e o CO₂ removido pode ser usado para o cultivo de microalgas, enquanto o calor e a eletricidade da unidade CHP de metano podem ser utilizados diretamente nas instalações de tratamento de águas residuais. O digerido pode ser um fertilizante ou uma fonte de nutrientes a ser parcialmente recirculada para o cultivo de microalgas. A recirculação aumentaria a estabilidade do processo e com isso os rendimentos gerais da biorrefinaria. Alternativamente, a biomassa orgânica extrema adicional seria direcionada para a fermentação acidogênica na produção de ácidos graxos voláteis, o que aumentaria a carga orgânica no fluxo de águas residuais.

4 Conclusão e perspectivas

As microalgas são seres fotoautotróficos capazes de realizar a biofixação do CO₂, gás que potencializa o efeito estufa causando o aquecimento global. Além disso, elas produzem oxigênio com mais eficiência do que as plantas superiores, crescem muito rapidamente e não requerem água doce nem terra arável. Apesar disso, o grande gargalo ainda está relacionado ao custo com o cultivo e a produção de biomassa.

Para resolver esse problema, algumas espécies permitem a combinação entre a fotossíntese, que assimila o carbono inorgânico (CO₂), e a heterotrofia, com assimilação de carbono orgânico das mais diversas fontes. Nesse campo, elas fazem a fitorremediação de nutrientes, como N e P, contidos nas águas residuais oriundas de diversas fontes, nocivas ao meio ambiente se descartadas de forma irresponsável. A água obtida após o cultivo, já tratada, pode ser usada tanto em um novo cultivo, quanto na agricultura, por exemplo, economizando água doce.

Após o cultivo, a biomassa obtida pode ser convertida em biocombustíveis renováveis, essenciais tanto por serem uma fonte de energia limpa, quanto pela necessidade de encontrar uma fonte que substitua os combustíveis fósseis — hoje com fontes escassas, que causam muita poluição e ameaçam o mundo com mudanças climáticas. Ademais, essa biomassa tem pH bastante neutro, o que a torna importante como fertilizante para solos ácidos.

No entanto, para alcançar a finalidade de utilização da biomassa microalgal como biocombustível renovável é necessário o investimento em estudos e tecnologias que melhorem todas as etapas dos processos, desde a produtividade até a conversão e o processamento.

Referências

ABDELFAH, A. *et al.* Microalgae-based wastewater treatment: mechanisms, challenges, recent advances, and future prospects. **Environmental Science and Ecotechnology**, v. 13, n. 6, 100205, jan., 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498422000618>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ACEBU, P. I. G. *et al.* Bioethanol production from *Chlorella vulgaris* ESP-31 grown in unsterilized swine wastewater. **Bioresour. Technol.**, v. 352, 127086, mar., 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852422004151>. Acesso em: 22 nov. 2023.

AHN, Y. *et al.* Biodiesel production potential of microalgae, cultivated in acid mine drainage and livestock wastewater. **Journal of Environmental Management**, v. 314, p. 115031, jul., 2022. Disponível em: Biodiesel production potential of microalgae, cultivated in acid mine drainage and livestock wastewater - ScienceDirect. Acesso em: 22 nov. 2023.

ALMEIDA, A. C. *et al.* Oxidative stress in the algae *Chlamydomonas reinhardtii* exposed to biocides. **Aquatic Toxicology**, v. 189, p. 50-59, ago., 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166445X17301510>. Acesso em: 22 nov. 2023.

AMBAT, I.; TANG, W. Z.; SILLANPA, M. Statistical analysis of sustainable production of algal biomass from waste water treatment process. **Biomass Bioenergy**, v. 120, p. 471-478, jan., 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953418302824>. Acesso em: 22 nov. 2023.

ARUTSELVAN, C. *et al.* Review on wastewater treatment by microalgae in different cultivation systems and its importance in biodiesel production. **Fuel**, v. 324, p. 124623, set., 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236122014727>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BHATTACHARYA, M.; GOSWAMI, S. Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 25, p. 101580, maio, 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878818119318699>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BOATENG, A. A. *et al.* Guayule (*Parthenium argentatum*) pyrolysis biorefining: Fuels and chemicals contributed from guayule leaves via tail gas reactive pyrolysis. **Fuel**, v. 163, p. 240-247, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611500959X>. Acesso em: 22 nov. 2023.

BOROWIAK, D.; KRZYWONOS, M. Bioenergy, Biofuels, Lipids and Pigments — Research Trends in the Use of Microalgae Grown in Photobioreactors. **Energies**, v. 15, n. 15, p. 5357, jul., 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15155357>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CARDOSO, L. G. *et al.* *Spirulina sp.* as a bioremediation agent for aquaculture wastewater: production of high added value compounds and estimation of theoretical biodiesel. **BioEnergy Research**, v. 14, n. 1, p. 254-264, ago., 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10153-4>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CASONI, A. *et al.* Valorization of *Rhizoclonium sp.* algae via pyrolysis and catalytic pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 216, p. 302-307, set., 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416307064>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHAGAS, B. M. E. *et al.* Stable Bio-oil Production from Proteinaceous Cyanobacteria: Tail Gas Reactive Pyrolysis of *Spirulina*. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 23, p. 6734-6741, maio, 2016. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.iecr.6b00490>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHAGAS, B. M. E. *et al.* Kinetic study and pyrolysis: GC/MS products analysis of *Spirulina platensis* cultivated under a different growing medium. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 143, p. 3161-3171, out., 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-020-10330-9>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHOKSHI, K. *et al.* Biofuel potential of the newly isolated microalgae *Acutodesmus dimorphus* under temperature induced oxidative stress conditions. **Bioresource Technology**, v. 180, p. 162-171, mar., 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852415000036>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CHONG, J. W. R. *et al.* Advances in production of bioplastics by microalgae using food waste hydrolysate and wastewater: a review. **Bioresour. Technol.**, v. 342, p. 125947, dez., 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125947>. Acesso em: 22 nov. 2023.

CORRÊA, D. O. *et al.* Biomass production and harvesting of *Desmodesmus subspicatus* cultivated in flat plate photobioreactor using chitosan as flocculant agent. **Journal of Applied Phycology**, v. 31, n. 2, p. 857-866, abr., 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-018-1586-z>. Acesso em: 22 nov. 2023.

- CORRÊA, D. O. *et al.* Microalgas na agricultura moderna: Utilização do extrato de *Desmodemus subspicatus* na propagação in vitro da orquídea *Cattleya warneri*. In: SEVERO, I. A.; do NASCIMENTO, T. C.; FAGUNDES, M. B (org.). **Microalgas: potenciais aplicações e desafios**. Canoas: Mérida Publishers, 2021. Disponível em: <https://www.meridapublishers.com/mpad/cap3.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- DAI, M. *et al.* Behaviors, product characteristics and kinetics of catalytic co-pyrolysis *spirulina* and oil shale. **Energy Conversion and Management**, v. 192, p. 1-10, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.032>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- DEBIAGI, P. E. A. *et al.* Algae characterization and multistep pyrolysis mechanism. **J. Anal. Appl. Pyrolysis**, v. 128, p. 423-436, nov., 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.08.007>. Acesso em: 22 nov. 2023.
- DÍAZ, V. *et al.* Microalgae bioreactor for nutrient removal and resource recovery from wastewater in the paradigm of circular economy. **Bioresource Technology**, v. 363, p. 127968, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127968>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- DHANDAYUTHAPANI, K. *et al.* Bioethanol from hydrolysate of ultrasonic processed robust microalgal biomass cultivated in dairy wastewater under optimal strategy. **Energy**, v. 244, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122604>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- ELKASABI, Y. *et al.* Hydrocarbons from *Spirulina* Pyrolysis Bio-oil Using One-Step hydrotreating and aqueous extraction of heteroatom compounds. **Energy and Fuels**, v. 30, n. 6, p. 4925-4932, maio, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/304587073_Hydrocarbons_from_Spirulina_Pyrolysis_Bio-oil_Using_One-Step_Hydrotreating_and_Aqueous_Extraction_of_Heteroatom_Compounds. Acesso em: 10 nov. 2023.
- GARCÍA-GALÁN, M. J. *et al.* Use of full-scale hybrid horizontal tubular photobioreactors to process agricultural runoff. **Biosystems Engineering**, v. 166, p. 138-149, fev., 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/322865554_Use_of_full-scale_hybrid_horizontal_tubular_photobioreactors_to_process_agricultural_runoff. Acesso em: 10 nov. 2023.
- HARUNA, S.; MOHAMAD, S. E.; JAMALUDDIN, H. potential of treating unsterilized palm oil mill effluent (POME) using freshwater microalgae. **J. Biotechnol**, v. 14, n. 2, p. 221-225, 2017. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/199240967.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- HOSSEINIA, N. S., SHANGA, H., SCOTTA, J. A. Biosequestration of industrial off-gas CO₂ for enhanced lipid productivity in open microalgae cultivation systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 458-469, 2018. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211830279X>. Acesso em: 22 nov. 2023.

HU, X.; GHOLIZADEH, M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. **Journal of Energy Chemistry**, v. 39, p. 109-143, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>. Acesso em: 10 nov. 2023.

HUANG, Y. *et al.* Bio-oil production from hydrothermal liquefaction of high-protein high-ash microalgae including wild *Cyanobacteria sp.* and cultivated *Bacillariophyta sp.* **Fuel**, v. 183, p. 9-19, 2016, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.013>. Acesso em: 10 nov. 2023.

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. ISSN 1364-0321. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.045>. Acesso em: 10 nov. 2023.

JAVED, F. *et al.* Real textile industrial wastewater treatment and biodiesel production using microalgae. **Biomass Bioenergy**, p. 165, 106559, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953422002215>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KADIR, W. N. A. *et al.* Harvesting and pre-treatment of microalgae cultivated in wastewater for biodiesel production: A review. **Energy Conversion and Management**, v. 171, p. 1416-1429, 2018. ISSN 0196-8904. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.074>. Acesso em: 10 nov. 2023.

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*. **Microb Cell Fact**, v. 17, n. 36, 2018. Disponível em: <https://microbialcellfactories.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12934-018-0879-x>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KOOCAL, S. *et al.* Bioremediation of ethanol wash by microalgae and generation of bioenergy feedstock. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, p. 183–194, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02866-0>. Acesso em: 10 nov. 2023.

KUMAR, A. *et al.* Influence of waste plastic on pyrolysis of low-lipid microalgae: A study on thermokinetics, behaviors, evolved gas characteristics, and products distribution. **Renewable Energy**, v. 185, p. 416-430, fev., 2022a. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/357309543_Influence_of_waste_plastic_on_pyrolysis_of_low-lipid_microalgae_A_study_on_thermokinetics_behaviors_evolved_gas_characteristics_and_products_distribution. Acesso em: 10 nov. 2023.

KUMAR, C. S. P. *et al.* Phycoremediation of Paper and Pulp Mill Effluent using *Planktochlorella nurekis* and *Chlamydomonas reinhardtii* - A Comparative Study. **Journal of Environmental Treatment Techniques**, v. 8, n. 2, p. 809-817, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341040850_Phycoremediation_of_Paper_and_Pulp_Mill_Effluent_using_Planktochlorella_nurekis_and_Chlamydomonas_reinhardtii_-_A_Comparative_Study. Acesso em: 10 nov. 2023.

KUMAR, N. *et al.* Valorization of wastewater through microalgae as a prospect for generation of biofuel and high-value products. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, 132114, ago., 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652622017206>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LA BELLA, E. *et al.* Multipurpose Agricultural Reuse of Microalgae Biomasses Employed for the Treatment of Urban Wastewater. **Agronomy**, v. 12, n. 2, 234, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy12020234>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LAZZA, C.; SALBITANI, G.; CARFAGNA, S. Fungal Contamination in Microalgal Cultivation: Biological and Biotechnological Aspects of Fungi-Microalgae Interaction. **J. Fungi**, v. 8, p. 1099, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/jof8101099>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LI, F.; SRIVATSA, S. C.; BHATTACHARYA, S. A review on catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality bio-oil with low oxygenous and nitrogenous compounds. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 108(C), p. 481-497, 2019. Disponível em: <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v108y2019icp481-497.html>. Acesso em: 10 nov. 2023.

LI, L. *et al.* An Introduction to Pyrolysis and Catalytic Pyrolysis: Versatile Techniques for Biomass Conversion. In: SUIB, S. L. (org.). **New and Future Developments in Catalysis Catalytic Biomass Conversion**. Elsevier, 2013, p. 173-208. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444538789000096?via%3Dihub>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MANMAI, N. *et al.* Alkali pretreatment method of dairy wastewater based grown *Arthrospira platensis* for enzymatic degradation and bioethanol production. **Fuel**, v. 330, p. 125534, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125534>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MARCILLA, A. *et al.* A review of thermochemical conversion of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 11-16, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257812259_Review_of_thermochemical_conversion_of_microalgae. Acesso em: 10 nov. 2023.

MOLAZADEH, M. *et al.* Influence of CO₂ concentration and N: P ratio on *Chlorella vulgaris*-assisted nutrient bioremediation, CO₂ biofixation and biomass production in a lagoon treatment plant. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 96, p. 114-120, 2019. ISSN 1876-1070. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.01.005>. Acesso em: 10 nov. 2023.

NAIRA, V. *et al.* Biorefinery Approaches for the Production of Fuels and Chemicals from Lignocellulosic and Algal Feedstocks. In: NANDA, S.; VO, D. N.; SARANGI, P. K. (Org.). **Biorefinery of Alternative Resources: Targeting Green Fuels and Platform Chemicals**. Springer, 2020, p. 141-170. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-15-1804-1_7. Acesso em: 10 nov. 2023.

PEREIRA, I.; RANGEL, A.; CHAGAS, B. Microalgae Growth under Mixotrophic Condition Using Agro-Industrial Waste: A Review. In: OPEN, I. (Org.). **Biomass**. IntechOpen, 2021, p. 1-18.

PEREIRA, M. I. B. *et al.* Mixotrophic cultivation of *Spirulina platensis* in dairy wastewater: Effects on the production of biomass, biochemical composition and antioxidant capacity. **PLoS ONE**, v. 14, n. 10, p. 1-17, 2019. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0224294>. Acesso em: 10 nov. 2023.

PETER, A. *et al.* Continuous cultivation of microalgae in photobioreactors as a source of renewable energy: Current status and future challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 154, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111852>. Acesso em: 10 nov. 2023.

POURKARIMI, S. *et al.* Biofuel production through micro- and macroalgae pyrolysis – A review of pyrolysis methods and process parameters. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 142, p. 104599-104599, 2019.

PRABHA, S. *et al.* Cyanobacterial biorefinery: Towards economic feasibility through the maximum valorization of biomass. **Science of The Total Environment**, v. 814, p. 152795, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152795>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RAJENDRAN, L.; NAGARAJAN, N. G.; KARUPPAN, M. Enhanced biomass and lutein production by mixotrophic cultivation of *Scenedesmus sp.* using crude glycerol in an airlift photobioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 161, p. 107684, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107684>. Acesso em: 10 nov. 2023.

RUSSELL, C.; RODRIGUEZ, C.; YASEEN, M. Microalgae for lipid production: Cultivation, extraction & detection. **Algal Research**, v. 66, p. 102765, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2022.102765>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SALLA, A. C. V. Cultivo da microalga *spirulina platensis* em meio Zarrouk diluído e adicionado de resíduo da indústria láctea. 2016. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2016.

SARATALE, R. S. *et al.* A critical review on anaerobic digestion of microalgae and macroalgae and co-digestion of biomass for enhanced methane generation. **Bioresource Technology**, v. 262, p. 319-332, ago., 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.03.030>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SATYANARAYANA, K. G.; MARIANO, A. B.; VARGAS, J. V. C. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. **International Journal of Energy Research**, v. 35, n. 4, p. 291-311, 2011. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.1695>. Acesso em: 10 nov. 2023.

SHOBANA, S. *et al.* Fermentative hydrogen production from mixed and pure microalgae biomass: Key challenges and possible opportunities. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 42, p. 26440–26453, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318922767_Fermentative_hydrogen_production_from_mixed_and_pure_microalgae_biomass_Key_challenges_and_possible_opportunities. Acesso em: 10 nov. 2023.

SUGANYA, T. *et al.* Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach. **Renewable and**

Sustainable Energy Reviews, v. 55, p. 909-941, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.026>. Acesso em: 10 nov. 2023.

TAN, J. S. *et al.* A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids. **Bioengineered**, v. 11, n. 1, p. 116-129, jan. 2020. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21655979.2020.1711626>. Acesso em: 10 nov. 2023.

TOULIABAH, H. E. *et al.* A Review of Microalgae-and Cyanobacteria-Based Biodegradation of Organic Pollutants. **MDPI**, v. 27, p. 1141, 2022. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8839941/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

UDAYAN, A. *et al.* Mass cultivation and harvesting of microalgal biomass: Current trends and future perspectives. **Bioresource Technology**, v. 344B, 126406, jan., 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S096085242101748X>. Acesso em: 10 nov. 2023.

VIRUELA, A. *et al.* Performance of an outdoor membrane photobioreactor for resource recovery from anaerobically treated sewage. **Journal of Cleaner Production**, v. 178, p. 665-674, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.223>. Acesso em: 10 nov. 2023.

VO, H. N. P. *et al.* A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutants treatment. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1549-1568, fev., 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718337331>. Acesso em: 10 nov. 2023.

WAGENEN, J. J.; DE FRANCISCI, D.; ANGELIDAKI, I. Comparison of mixotrophic to cyclic autotrophic/heterotrophic growth strategies to optimize productivity of *Chlorella sorokiniana*. **Journal of Applied Phycology**, v. 27, n. 5, p. 1775-1782, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0485-1>. Acesso em: 10 nov. 2023.

WHITTON, R. *et al.* Microalgae for municipal wastewater nutrient remediation: mechanisms, reactors and outlook for tertiary treatment. **Environmental Technology Reviews**. v. 4, p. 133-148, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/21622515.2015.1105308>. Acesso em: 10 nov. 2023.

ZABED, H. M. *et al.* Biogas from microalgae: Technologies, challenges and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109503, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109503>. Acesso em: 10 nov. 2023.