

CHLORELLA SP. COMO PLATAFORMA BIOTECNOLÓGICA PARA PRODUÇÃO DE COMPOSTOS DE ALTO VALOR AGREGADO: UMA REVISÃO DA LITERATURA

M. Nesti¹, G. V. Olivieri², B. Ramos², A. A. Morandim-Giannetti²

¹Departamento de Engenharia Química - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil (maysa.nesti@gmail.com)

²Departamento de Engenharia Química - Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

As microalgas têm se consolidado como uma das principais plataformas biotecnológicas da bioeconomia devido à elevada eficiência fotossintética, rápido crescimento e capacidade de sintetizar compostos de alto valor agregado. Entre elas, a *Chlorella* sp. destaca-se pela elevada produtividade de biomassa e versatilidade metabólica. Neste contexto, este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre os avanços nas aplicações industriais de *Chlorella* sp., abordando aspectos fisiológicos e tecnológicos, bem como perspectivas para a produção sustentável de biomassa, lipídios e bioprodutos.

Palavras-chave: Microalgas; *Chlorella* sp.; Biotecnologia; Compostos Bioativos; Bioeconomia.

INTRODUÇÃO

A transição para uma economia baseada em recursos renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir a dependência de matérias-primas fósseis e de minimizar os impactos ambientais associados aos processos industriais. Nesse contexto, a bioeconomia surge como um modelo estratégico ao integrar inovação tecnológica, sustentabilidade e aproveitamento eficiente de recursos biológicos, estimulando a produção de biocombustíveis, biomateriais e compostos de alto valor agregado (Ahmed *et al.*, 2023; Corma *et al.*, 2007).

Neste cenário, dentre os organismos de maior interesse para essa transição, destacam-se as microalgas, microrganismos fotossintetizantes capazes de converter dióxido de carbono (CO₂), água e energia luminosa em biomassa, por meio de elevadas taxas de crescimento (Oslan *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025).

Em comparação às culturas agrícolas convencionais, as microalgas apresentam maior eficiência fotossintética, menor demanda de área cultivável e a possibilidade de utilizar águas residuais e efluentes industriais como meio de cultivo, contribuindo simultaneamente para a produção de biomassa e para processos de biorremediação (Badary *et al.*, 2024; Madureira *et al.*, 2025). Essas características tornam as microalgas uma alternativa promissora para sistemas produtivos sustentáveis e de baixa emissão de carbono (Gamal; Shreadah, 2024).

Além da elevada produtividade, as microalgas sintetizam uma ampla variedade de metabólitos de interesse industrial, incluindo proteínas, lipídios,

carboidratos, pigmentos, vitaminas, antioxidantes e ácidos graxos poli-insaturados, como EPA e DHA (Oslan *et al.*, 2025; Zakaria *et al.*, 2025). Essa diversidade bioquímica permite sua aplicação em diferentes setores industriais, incluindo alimentos, cosméticos, fármacos, nutrição, biopolímeros e biocombustíveis, o que os torna plataformas importantes no conceito de biorrefinaria (Reimão *et al.*, 2025).

Para isso, dentre as diversas espécies estudadas, o gênero *Chlorella* destaca-se pela elevada capacidade de produção de biomassa, facilidade de cultivo, robustez fisiológica e adaptação a diferentes condições ambientais (Concas *et al.*, 2016; Oslan *et al.*, 2025). Além disso, apresenta elevada concentração de proteínas, lipídios e compostos fenólicos, tornando-se uma das principais candidatas a processos industriais voltados à obtenção de bioprodutos (Ahmed *et al.*, 2023).

Porém, estudos recentes demonstram que fatores como a intensidade luminosa, o estresse oxidativo, as interações com bactérias associadas e as estratégias de cultivo exercem influência direta sobre sua produtividade e composição bioquímica, ampliando as possibilidades de otimização desses sistemas, o que evidencia a importância de estudos de otimização de produção de microalgas (Hao *et al.*, 2025; Xing *et al.*, 2026).

Assim, o desenvolvimento de tecnologias de cultivo, como fotobiorreatores fechados, lagoas abertas do tipo *raceway* e ferramentas de modelagem computacional, tem permitido aumentar a eficiência operacional e reduzir limitações relacionadas à transferência de massa, à distribuição luminosa e ao consumo energético, bem como favorecido o

aumento da produtividade de compostos bioativos (Concas *et al.*, 2016; Fierro *et al.*, 2023). Assim, esses avanços representam etapas fundamentais para a consolidação das microalgas como matéria-prima competitiva em processos industriais de larga escala (Zhao *et al.*, 2025).

Diante desse cenário, este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre o potencial biotecnológico de espécies do gênero *Chlorella* sp., reunindo avanços recentes relacionados às suas características fisiológicas, mecanismos de adaptação celular, produção de lipídios, aplicações industriais e tecnologias de cultivo, discutindo sua contribuição para o fortalecimento da bioeconomia e para o desenvolvimento de processos sustentáveis (Gamal; Shreadah, 2024; Reimão *et al.*, 2025).

METODOLOGIA

Este estudo fundamenta-se em uma revisão narrativa da literatura sobre o potencial biotecnológico do gênero *Chlorella* sp. A busca bibliográfica concentrou-se em artigos científicos publicados entre 2016 e 2026, além de referências clássicas essenciais à fundamentação do tema. A seleção contemplou artigos indexados nas plataformas *ScienceDirect*, *Scopus*, *Web of Science* e *Google Scholar*, utilizando palavras-chave relacionadas a microalgas, *Chlorella* sp., bioeconomia, fotobiorreatores, lipídios, compostos bioativos, biocombustíveis, estresse oxidativo, bactérias endofíticas, *biotechnology* e aplicações industriais, sem o uso de operadores booleanos na triagem documental. Os dados obtidos foram analisados qualitativamente, priorizando investigações focadas nos aspectos fisiológicos, tecnológicos e biotecnológicos do cultivo e do aproveitamento industrial da biomassa microalgal (Figura 1).



Figura 1. Fluxograma das etapas de pesquisa bibliográfica (2016-2026).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Microalgas como plataforma biotecnológica para bioeconomia

O crescimento da bioeconomia tem estimulado a busca por matérias-primas renováveis capazes de atender às demandas industriais sem ampliar os impactos ambientais decorrentes da exploração de recursos fósseis. Nesse cenário, as microalgas vêm recebendo atenção crescente por apresentarem elevada eficiência na conversão de energia luminosa em biomassa, rápido crescimento celular e capacidade de sintetizar uma ampla diversidade de compostos de elevado valor agregado (Ahmed *et al.*, 2023; Oslan *et al.*, 2025). Essas características tornam as microalgas importantes plataformas para processos sustentáveis de produção de energia, alimentos, produtos químicos e biomateriais (GAMAL; SHREADAH, 2024).

As microalgas são organismos fotossintetizantes predominantemente unicelulares, capazes de utilizar o dióxido de carbono como fonte de carbono e a energia luminosa como força motriz do crescimento celular. Em comparação às culturas agrícolas tradicionais, apresentam vantagens significativas, como maior produtividade por área cultivada, menor necessidade de solo agrícola e a possibilidade de utilizar águas salobras, marinhas e residuais como meio de cultivo (Badary *et al.*, 2024). Essas características reduzem a competição com a produção de alimentos e ampliam as possibilidades de integração das microalgas aos conceitos de economia circular e de desenvolvimento sustentável (Wang *et al.*, 2025).

Outro aspecto que justifica o crescente interesse industrial é a elevada plasticidade metabólica desses microrganismos. Alterações nas condições de cultivo, como a intensidade luminosa, a disponibilidade de nutrientes, a temperatura, o pH e a concentração de dióxido de carbono, modificam diretamente a composição bioquímica da biomassa produzida. Como consequência, torna-se possível direcionar o metabolismo celular para a maior produção de proteínas, lipídios, carboidratos, compostos bioativos ou pigmentos, permitindo que a mesma espécie seja utilizada para diferentes finalidades industriais (Garza-Rodríguez *et al.*, 2022).

A biomassa microalgal caracteriza-se por elevada concentração de compostos bioativos (Oslan *et al.*, 2025). Diversas espécies apresentam teores proteicos superiores a 40% da massa seca, além de lipídios ricos em ácidos graxos poli-insaturados, carboidratos estruturais, vitaminas, pigmentos naturais e metabólitos antioxidantes (Zakaria *et al.*, 2025). Entre os compostos de maior interesse, destacam-se os ácidos eicosapentaenoico (EPA) e

docosahexaenoico (DHA), amplamente empregados pelas indústrias alimentícias e farmacêuticas devido aos benefícios à saúde humana. Da mesma forma, carotenóides, clorofilas e ficobiliproteínas têm aplicações crescentes como corantes naturais, antioxidantes e ingredientes funcionais em cosméticos e compostos nutricionais (Reimão *et al.*, 2025).

Além da diversidade metabólica, as microalgas desempenham um papel ambiental importante. Durante o cultivo, esses organismos assimilam CO₂ atmosférico ou proveniente de emissões industriais, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Madureira *et al.*, 2025). Paralelamente, diversas espécies são capazes de remover nitrogênio, fósforo e outros contaminantes presentes em efluentes urbanos e industriais, transformando esses resíduos em biomassa de elevado valor agregado. Essa integração entre o tratamento ambiental e a produção biotecnológica representa uma das principais vantagens competitivas das microalgas em relação às matérias-primas convencionais.

Do ponto de vista econômico, o setor de biotecnologia de microalgas vem apresentando crescimento expressivo nos últimos anos, impulsionado principalmente pela expansão dos mercados de biocombustíveis, alimentos funcionais, suplementos nutricionais e produtos cosméticos. Países como Estados Unidos, Alemanha e China concentram parte significativa dos investimentos em infraestrutura e desenvolvimento tecnológico, enquanto o Brasil destaca-se pelas condições climáticas favoráveis ao cultivo em larga escala, pela elevada biodiversidade e pela disponibilidade de recursos naturais. Esse cenário fortalece o potencial nacional para o desenvolvimento de processos baseados em biomassa microalgal e amplia as perspectivas de inserção dessas tecnologias na matriz industrial brasileira. Apesar desse elevado potencial, a consolidação industrial das microalgas ainda depende da superação de desafios tecnológicos relacionados à produtividade, à estabilidade operacional dos cultivos e à redução dos custos de produção (Zhao *et al.*, 2025). Dessa forma, o desenvolvimento de linhagens mais produtivas, aliado ao aperfeiçoamento dos sistemas de cultivo e de recuperação de biomassa, constitui uma das principais frentes de pesquisa da engenharia química e da biotecnologia contemporânea (Zhao *et al.*, 2025).

As diversas possibilidades de aproveitamento da biomassa microalgal em setores como alimentos, cosméticos, fármacos, biocombustíveis e tratamento ambiental evidenciam sua relevância para a bioeconomia, conforme apresentado na Figura 2.

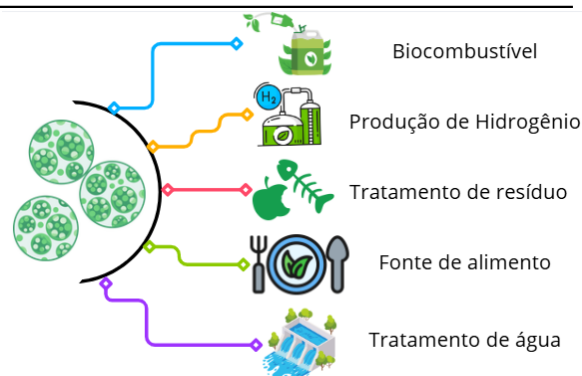


Figura 2. Principais aplicações industriais da biomassa microalgal.

Respostas fisiológicas da *Chlorella* sp. ao estresse ambiental e interações microbianas

A produtividade de cultivos microalgas está diretamente relacionada à capacidade das células de responder às variações ambientais durante o cultivo. Entre os fatores que mais influenciam o metabolismo da *Chlorella* sp., destacam-se a intensidade luminosa, a disponibilidade de nutrientes, a temperatura e a composição gasosa do meio, que podem tanto promover o aumento da produtividade quanto desencadear mecanismos de estresse celular. Neste cenário, a compreensão dessas respostas fisiológicas constitui uma etapa essencial para o desenvolvimento de estratégias capazes de maximizar a produção de biomassa e de metabólitos de interesse industrial.

Para isso, a luz é a principal fonte de energia para o crescimento das microalgas; entretanto, sua disponibilidade deve permanecer dentro de uma faixa adequada de intensidade. Em condições de irradiância elevada, acima da capacidade de utilização da energia absorvida pelos fotossistemas, ocorre o fenômeno conhecido como fotoinibição (Nikolaou *et al.*, 2016). Nessa situação, o excesso de energia luminosa causa danos às proteínas do Fotossistema II, reduzindo a eficiência fotossintética, comprometendo a fixação de carbono e, consequentemente, diminuindo a velocidade de crescimento celular.

O processo de fotoinibição está intimamente associado à formação de espécies reativas de oxigênio, como o oxigênio singlete, o radical superóxido e o peróxido de hidrogênio. Em concentrações moderadas, essas moléculas desempenham funções relacionadas à sinalização celular e aos mecanismos de adaptação metabólica. Entretanto, quando produzidas em excesso, promovem estresse oxidativo, ocasionando danos às membranas celulares, às proteínas, aos pigmentos fotossintéticos e ao material genético. Como consequência, ocorre redução da atividade

metabólica e aumento da suscetibilidade das células à morte celular. Para minimizar esses efeitos, a *Chlorella* sp. desenvolveu mecanismos de fotoaclimação que permitem ajustar continuamente sua capacidade de absorção de energia luminosa (Nikolaou *et al.*, 2016). Entre essas estratégias destacam-se alterações na quantidade de clorofila, reorganização das antenas coletoras de luz e aumento da produção de pigmentos fotoprotetores, especialmente carotenóides com elevada capacidade antioxidante. Essas adaptações reduzem a dissipação descontrolada de energia e preservam a integridade do sistema fotossintético durante períodos prolongados de exposição à luz (Manikandan *et al.*, 2026).

Nos últimos anos, outro mecanismo de adaptação tem recebido atenção crescente: as interações simbióticas entre microalgas e bactérias associadas ao cultivo. Essas comunidades microbianas estabelecem relações de cooperação capazes de favorecer o crescimento celular, melhorar o aproveitamento de nutrientes e aumentar a resistência das microalgas a condições de estresse ambiental. As bactérias associadas ao cultivo podem disponibilizar vitaminas, compostos promotores de crescimento, fitormônios e nutrientes assimiláveis, enquanto utilizam parte da matéria orgânica secretada pelas microalgas como fonte de carbono (Manikandan *et al.*, 2026). Essa troca metabólica contribui para uma maior estabilidade ecológica do sistema e favorece o crescimento da biomassa mesmo sob condições ambientais menos favoráveis.

Além do fornecimento de nutrientes, diversos estudos demonstram que essas bactérias participam do controle do estresse oxidativo por meio da modulação das espécies reativas de oxigênio (Zhang *et al.*, 2025). A ativação conjunta de mecanismos antioxidantes reduz os danos provocados pela radiação ultravioleta, preserva a integridade dos fotossistemas e mantém a atividade fotossintética por períodos mais prolongados. Como consequência, observa-se um aumento da produtividade celular e maior estabilidade operacional dos cultivos.

Outro aspecto relevante refere-se à capacidade dessas associações de influenciar diretamente a composição bioquímica da biomassa produzida. Em diferentes condições experimentais, a presença de comunidades bacterianas favoreceu o acúmulo de lipídios, compostos fenólicos e outros metabólitos secundários de elevado interesse biotecnológico (Xing *et al.*, 2026). Dessa forma, a utilização de consórcios microbianos representa uma estratégia promissora para aumentar simultaneamente a produtividade e a qualidade da biomassa obtida.

Sob a perspectiva da engenharia de bioprocessos, compreender essas interações fisiológicas permite desenvolver estratégias de cultivo capazes de controlar fatores de estresse, otimizar o aproveitamento da energia luminosa e maximizar a produção de compostos de interesse industrial. Assim, a integração entre fisiologia celular, microbiologia e engenharia representa um dos principais caminhos para ampliar a viabilidade econômica dos processos baseados em microalgas.

Produção de compostos bioativos e aplicações industriais da biomassa microalgal

A capacidade das microalgas de produzir diferentes classes de compostos químicos torna esses organismos uma das principais plataformas biotecnológicas para o conceito de biorrefinaria. Diferentemente dos processos convencionais, que normalmente exploram apenas um único produto de interesse, a biomassa microalgal permite o aproveitamento integrado de proteínas, carboidratos, lipídios, pigmentos, vitaminas e metabólitos secundários, aumentando significativamente o valor agregado do processo produtivo (Oslan *et al.*, 2025).

Entre esses constituintes, os lipídios constituem uma das frações mais estudadas devido ao amplo potencial de aplicação nas indústrias químicas e energéticas. Em espécies como a *Chlorella* sp., a composição lipídica pode ser modificada conforme as condições de cultivo, o que possibilita direcionar o metabolismo celular para um maior acúmulo de triacilgliceróis, utilizados na produção de biodiesel (Gamal; Shreadah, 2024). Essa flexibilidade metabólica constitui uma vantagem importante em relação às oleaginosas tradicionais, cuja composição química é menos suscetível à modulação durante o cultivo.

Além do uso energético, os óleos de microalgas apresentam composição química compatível com diversas rotas de transformação industrial. Os ácidos graxos obtidos podem ser empregados como matéria-prima para síntese de solventes renováveis, tensoativos, plastificantes, resinas, poliuretanos, biolubrificantes e outros produtos químicos tradicionalmente derivados do petróleo. Dessa forma, a utilização de microalgas ultrapassa o conceito de produção de biocombustíveis e passa a integrar estratégias mais amplas de substituição de matérias-primas fósseis (Corma *et al.*, 2007).

Quando comparados aos óleos vegetais convencionais, como soja, milho ou canola, os lipídios provenientes de microalgas apresentam vantagens importantes em termos de produtividade agrícola e de sustentabilidade do processo. Enquanto as culturas terrestres dependem de grandes áreas de plantio e competem diretamente com a produção de

alimentos, as microalgas podem ser cultivadas em ambientes aquáticos, utilizando águas salobras, marinhas ou residuais, reduzindo significativamente a pressão sobre os recursos naturais (Badary *et al.*, 2024).

Outro diferencial importante é a elevada produtividade por unidade de área cultivada. Diversas espécies apresentam capacidade de duplicar sua biomassa em poucos dias, permitindo ciclos produtivos significativamente menores do que os das culturas agrícolas tradicionais. Essa elevada taxa de crescimento amplia o potencial de produção contínua de biomassa e favorece a implementação de sistemas industriais de alta produtividade (Zakaria *et al.*, 2025; Badary *et al.*, 2024).

Além da produção de lipídios, a biomassa microalgal tem aplicações em diversos setores industriais. A indústria alimentícia utiliza proteínas de elevado valor biológico, pigmentos naturais e ácidos graxos poli-insaturados como ingredientes funcionais em alimentos e suplementos nutricionais (Zakaria *et al.*, 2025). No setor farmacêutico, compostos antioxidantes, carotenóides, polifenóis e polissacarídeos vêm sendo investigados devido às suas propriedades anti-inflamatórias, antimicrobianas e imunomoduladoras (Oslan *et al.*, 2025). Na indústria cosmética, pigmentos naturais e antioxidantes têm sido incorporados a formulações destinadas à proteção contra o estresse oxidativo e o envelhecimento cutâneo (Reimão *et al.*, 2025).

Do ponto de vista ambiental, o cultivo de microalgas também desempenha um papel estratégico na captura biológica de dióxido de carbono proveniente de emissões industriais. A incorporação desse carbono à biomassa reduz a concentração de gases de efeito estufa e gera matéria-prima renovável para diferentes cadeias produtivas, fortalecendo a integração entre a sustentabilidade ambiental e a produção industrial (Wang *et al.*, 2025).

Apesar desse elevado potencial, a consolidação industrial da biomassa microalgal ainda depende da redução dos custos associados às etapas de cultivo, colheita, separação e extração dos compostos de interesse (Zhao *et al.*, 2025). Por esse motivo, pesquisas recentes têm concentrado esforços no desenvolvimento de tecnologias capazes de aumentar a produtividade e reduzir o consumo de energia dessas operações, contribuindo para tornar economicamente viável a utilização de microalgas em larga escala (Zhao *et al.*, 2025).

Tecnologias de cultivo e perspectivas para ampliação da escala industrial

O sucesso da produção industrial de microalgas depende não apenas das características fisiológicas

das espécies cultivadas, mas também da eficiência dos sistemas empregados em seu cultivo. Embora a *Chlorella* sp. apresente elevada capacidade de adaptação e rápido desenvolvimento celular, fatores como a distribuição luminosa, a transferência de massa, a disponibilidade de dióxido de carbono e a remoção do oxigênio produzido durante a fotossíntese influenciam diretamente a produtividade da biomassa. Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias de cultivo mais eficientes representa uma das principais áreas de pesquisa voltadas à consolidação da biotecnologia microalgal.

Entre as tecnologias disponíveis, os fotobiorreatores fechados destacam-se pela elevada capacidade de controle operacional (Concas *et al.*, 2016). Esses sistemas permitem o monitoramento contínuo de variáveis como temperatura, pH, concentração de nutrientes, intensidade luminosa e composição gasosa, reduzindo significativamente os riscos de contaminação e possibilitando maior padronização da biomassa produzida. Além disso, o controle rigoroso das condições de cultivo favorece a obtenção de compostos específicos, permitindo direcionar o metabolismo celular para maior produção de compostos bioativos, proteínas ou pigmentos de interesse industrial.

Apesar das vantagens operacionais, os fotobiorreatores apresentam elevados custos de implantação e manutenção, especialmente em sistemas destinados à produção em larga escala. A necessidade de materiais transparentes, sistemas de iluminação, controle automatizado e equipamentos de circulação aumenta significativamente o investimento inicial, tornando indispensável a otimização do desempenho desses reatores para garantir sua viabilidade econômica.

Em contraste, as lagoas abertas do tipo *raceway* são a tecnologia mais utilizada na produção comercial de biomassa microalgal devido ao baixo custo de construção e de operação (Concas *et al.*, 2016). Esses sistemas utilizam grandes canais rasos equipados com rodas de pás, responsáveis pela circulação do meio de cultivo, o que possibilita a produção em grandes volumes com consumo energético reduzido. No entanto, apresentam limitações relacionadas ao menor controle das condições ambientais, maior suscetibilidade à contaminação, à evaporação da água e a variações climáticas, fatores que frequentemente reduzem a produtividade em comparação aos sistemas fechados.

Neste contexto, nos últimos anos, a engenharia de bioprocessos tem contribuído significativamente para minimizar essas limitações por meio da aplicação de ferramentas computacionais de modelagem e simulação. Entre elas, destaca-se a Dinâmica de

Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD), utilizada para descrever o comportamento hidrodinâmico dos cultivos, prever padrões de escoamento e otimizar o transporte de massa e de energia no interior dos reatores.

A aplicação de modelos de CFD permite avaliar a distribuição da intensidade luminosa, identificar regiões com baixa circulação do fluido e reduzir fenômenos de auto-sombreamento das células, condição frequentemente observada em cultivos de elevada densidade celular. Além disso, essas simulações auxiliam no dimensionamento de sistemas de aeração e mistura, promovendo maior disponibilidade de dióxido de carbono e remoção mais eficiente do oxigênio acumulado durante a fotossíntese, fatores diretamente relacionados ao aumento da produtividade microalgal (Zhao *et al.*, 2025; Concas *et al.*, 2016).

Outro aspecto importante refere-se à redução do estresse hidrodinâmico imposto às células durante a agitação do cultivo. Sistemas excessivamente turbulentos podem provocar danos mecânicos às microalgas, reduzindo sua viabilidade e comprometendo a produtividade. A modelagem computacional permite estabelecer condições operacionais capazes de equilibrar a transferência de massa adequada e a preservação da integridade celular, contribuindo para maior estabilidade dos processos em escala industrial.

Paralelamente ao desenvolvimento dos equipamentos, diferentes estratégias vêm sendo investigadas para reduzir os custos associados às etapas de colheita e recuperação da biomassa, atualmente consideradas um dos principais gargalos econômicos da produção de microalgas (Zhao *et al.*, 2025). Técnicas como biofloculação, separação por membranas, flotação e centrifugação otimizada têm apresentado resultados promissores, reduzindo o consumo de energia e aumentando a eficiência da recuperação celular (Zhao *et al.*, 2025).

Sob a perspectiva da bioeconomia, a integração entre o melhoramento fisiológico das linhagens, o controle das condições de cultivo e o desenvolvimento de tecnologias de processo representa o caminho mais promissor para ampliar a competitividade das microalgas em relação às matérias-primas convencionais. A consolidação dessas estratégias permitirá transformar sistemas atualmente restritos ao ambiente laboratorial em plataformas industriais capazes de produzir, de forma sustentável, combustíveis renováveis, biomateriais e compostos bioativos de elevado valor agregado.

Assim, observa-se que o avanço da engenharia química desempenha um papel decisivo na superação dos desafios tecnológicos associados ao cultivo

microalgal, contribuindo para aproximar o elevado potencial biológico da *Chlorella* sp. das demandas reais da indústria e fortalecendo sua inserção na economia de base renovável. Entre as tecnologias que vêm impulsionando esse avanço, destacam-se os sistemas de cultivo em fotobiorreatores, que permitem maior controle operacional e otimização das condições de crescimento celular, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Representação esquemática de um sistema de cultivo em fotobiorreator.

CONCLUSÃO

As microalgas consolidam-se como uma das principais plataformas biotecnológicas para o desenvolvimento de processos sustentáveis, reunindo elevada eficiência fotossintética, rápido crescimento celular e capacidade de sintetizar uma ampla variedade de compostos de elevado valor agregado. Entre as espécies atualmente investigadas, a *Chlorella* sp. destaca-se por sua robustez fisiológica, elevada produtividade de biomassa e versatilidade metabólica, características que ampliam seu potencial de aplicação em diferentes segmentos industriais.

A literatura demonstra que fatores relacionados às condições de cultivo, aos mecanismos de resposta ao estresse ambiental e às interações entre microalgas e comunidades microbianas influenciam diretamente a produtividade e a composição bioquímica da biomassa. Dessa forma, a compreensão desses processos constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento de estratégias capazes de otimizar a produção de compostos bioativos, proteínas, pigmentos e outros metabólitos de interesse comercial.

Paralelamente, os avanços obtidos na engenharia de bioprocessos, especialmente no desenvolvimento de fotobiorreatores, sistemas *raceway* e ferramentas de modelagem computacional, têm contribuído para aumentar a eficiência operacional dos cultivos e reduzir limitações relacionadas à transferência de massa, à distribuição luminosa e ao consumo energético. Esses avanços representam etapas

fundamentais para a ampliação da escala produtiva e a consolidação da biomassa microalgal como matéria-prima competitiva em processos industriais.

Dessa forma, a integração entre conhecimentos de fisiologia microalgal, microbiologia, engenharia química e desenvolvimento de tecnologias de cultivo constitui um dos principais caminhos para fortalecer a inserção da *Chlorella* sp. na bioeconomia. Embora desafios relacionados à viabilidade econômica ainda persistam, os avanços científicos observados nos últimos anos indicam perspectivas promissoras para o uso dessa microalga na produção sustentável de biocombustíveis, biomateriais e compostos de alto valor agregado.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro Universitário FEI pelo suporte financeiro na realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. F. et al. Bio-oil from microalgae: Materials, production, technique, and future. **Energy Reports**, v. 10, p. 3297-3314, 2023.
- BADARY, A. et al. Isolation and characterization of microalgae strains able to grow on complex biomass hydrolysate for industrial application. **Algal Research**, v. 78, p. 103381, 2024.
- CONCAS, A. et al. Mathematical modelling of *Chlorella vulgaris* growth in tubular and raceway photobioreactors. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 39, n. 5, p. 731-744, 2016.
- CORMA, A.; IBORRA, S.; VELTY, A. Chemical Routes for Transformation of Biomass into Chemicals. **Chemical Reviews**, v. 107, n. 6, p. 2411-2502, 2007.
- FIERRO, J. I.; DJEMA, U. W.; BERNARD, O. Optimal control of microalgae culture accounting for photoinhibition and light attenuation. **IFAC-PapersOnLine**, v. 56, n. 2, p. 7222-7227, 2023.
- GAMAL, R.; SHREADAH, M. A. Marine microalgae and their industrial biotechnological applications: A review. **Journal of Genetic Engineering and Biotechnology**, v. 22, p. 100407, 2024.
- GARZA-RODRÍGUEZ, Z. B. et al. Prospective on the application of abiotic stresses to enhance the industrial production of exopolysaccharides from microalgae. **Current Research in Biotechnology**, v. 4, p. 439-444, 2022.
- HAO, B.; HE, B.; ZHANG, S.; WU, H. Endophytic bacteria enhance macrophyte resilience but reduce microbial network stability under eutrophication. **Ecological Indicators**, v. 177, p. 113804, 2025.
- MADUREIRA, L. et al. Insights on microalgae-based technologies with potential impact on global methane budget - Perspectives for industrial applications. **Bioresource Technology**, v. 431, p. 132591, 2025.
- MAIRET, F.; BERNARD, O. The Photoinhibitor: Operating Microalgae Culture under Photoinhibition for Strain Selection. **IFAC-PapersOnLine**, v. 49, n. 7, p. 1068-1073, 2016.
- MANIKANDAN, S. K. et al. Integrative analysis of microbiome composition and plant beneficial characteristics of endophytic bacteria associated with *Prosopis* species in arid environment. **Heliyon**, v. 12, n. 2, p. e44573, 2026.
- NIKOLAOU, A. et al. Dynamic coupling of photoacclimation and photoinhibition in a model of microalgae growth. **Journal of Theoretical Biology**, v. 390, p. 61-72, 2016.
- OSLAN, S. N. H. et al. Comprehensive review of bioactive compounds from microalgae as promising source for industrial applications. **Algal Research**, v. 92, p. 104420, 2025.
- REIMÃO, M. et al. Colouring applications of microalgae and cyanobacteria photosynthetic pigments: Challenges for industrial and market acceptance. **Journal of Cleaner Production**, v. 520, p. 146071, 2025.
- WANG, R.; WANG, X.; ZHU, T. Research progress and application of carbon sequestration in industrial flue gas by microalgae: A review. **Journal of Environmental Sciences**, v. 152, p. 14-28, 2025.
- XING, N. et al. Interaction of nanoplastics and atrazine in a hydroponic system: Antagonistic phytotoxicity mediated by plant-microbe crosstalk and root endophytic bacteria restructuring. **Journal of Hazardous Materials**, v. 513, p. 142462, 2026.
- ZAKARIA, M. F. et al. PUFA from microalgae: Challenges, factors affecting high production and industrial application. **Aquaculture and Fisheries**, v. 10, p. 545-555, 2025.
- ZHANG, J.; LIU, F.; CHEN, Y.; SUN, R.; GAO, X. Combined analysis of reactive oxygen species and symbiotic bacteria profiles reveals their potential effects on the sorus development of *Saccharina japonica*. **Algal Research**, v. 91, p. 104122, 2025.
- ZHAO, B. et al. Technologies for harvesting the microalgae for industrial applications: Current trends and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 387, p. 129631, 2025.