

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS ERECHIM
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

LARISSA CAPELETTI ROMANI

EXTRAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DE MICROALGAS:
METODOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE SCALE-UP

ERECHIM

2025

LARISSA CAPELETTI ROMANI

**EXTRAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DE MICROALGAS:
METODOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE SCALE-UP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Profa. Dra. Helen Treichel

ERECHIM

2025

Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS

Romani, Larissa Capeletti

EXTRAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DE MICROALGAS:
METODOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE SCALE-UP / Larissa
Capeletti Romani. -- 2025.

40 f.

Orientadora: Doutora Helen Treichel

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária,
Erechim, RS, 2025.

1. Biotecnologias. I. Treichel, Helen, orient. II.
Universidade Federal da Fronteira Sul. III. Título.

Elaborada pelo sistema de Geração Automática de Ficha de Identificação da Obra pela UFFS
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

LARISSA CAPELETTI ROMANI

**EXTRAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DE MICROALGAS:
METODOLOGIAS E ESTRATÉGIAS DE SCALE-UP**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de Bacharel.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 10/11/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Helen Treichel – UFFS
Orientadora

Prof. Dr.^a Jéssica Mulinari - UFFS
Avaliador

Prof. Dr.^a Clarissa Dalla Rosa – UFFS
Avaliador

Dedico este trabalho aos meus pais, que não
pouparam esforços para que eu pudesse
concluir meus estudos e realizar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em todos os momentos. A paciência, a compreensão e a confiança depositada em mim foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos professores e professoras da Universidade Federal da Fronteira Sul, pela dedicação, orientação e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo do curso, que contribuíram de maneira essencial para a minha formação acadêmica e profissional.

Aos colegas e amigos, pela parceria, companheirismo e pelas trocas de experiências durante esta trajetória. Compartilhar desafios e conquistas com vocês tornou essa caminhada muito mais significativa.

Aos servidores da UFFS, pela atenção, disponibilidade e pelo trabalho diário que viabiliza o funcionamento e o desenvolvimento das atividades acadêmicas.

Por fim, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e proteção concedidas ao longo deste percurso, iluminando meu caminho e permitindo a realização deste trabalho.

“Não há saber mais ou saber menos: há saberes diferentes. O que nos move é a curiosidade, o desejo de compreender o mundo, e é esse impulso que alimenta a ciência. Ensinar e aprender significam, antes de tudo, reinventar o conhecimento, partilhar a descoberta e fazer da dúvida um caminho para a criação.”

Paulo

Freire

(Pedagogia do Oprimido, Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1987.)

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo revisar metodologias de extração de bioprodutos a partir de microalgas, com ênfase em alternativas sustentáveis e estratégias de escalonamento para aplicação industrial. Foi realizada uma revisão integrativa da literatura em bases científicas nacionais e internacionais, priorizando publicações a partir de 2021. As microalgas destacam-se pelo elevado potencial biotecnológico, gerando compostos de alto valor agregado, como pigmentos, ácidos graxos poli-insaturados e polissacarídeos, além de apresentarem viabilidade em processos de tratamento de efluentes. Entre as metodologias analisadas, ressaltam-se a extração assistida por micro-ondas (MAE), por enzimas (EAE) e por ultrassom (UAE), associadas ao uso de solventes verdes, como alternativas mais eficientes e ambientalmente seguras. Foram discutidos parâmetros críticos que influenciam o rendimento, como razão líquido-sólido, temperatura, potência e tempo de extração. Quanto ao scale-up, destacaram-se técnicas como cavitação hidrodinâmica, microfluidização em alta pressão e uso de fotobiorreatores, capazes de otimizar produtividade e qualidade da biomassa. Conclui-se que a integração de processos de cultivo eficiente, intensificação de extração e aplicação de tecnologias sustentáveis é essencial para viabilizar economicamente a produção de bioprodutos de microalgas em larga escala, contribuindo para o avanço da bioeconomia e da economia circular.

Palavras-Chave: Biocompósitos; Solventes verdes; Reatores biológicos; Processos integrados.

ABSTRACT

This study aimed to review bioproduct extraction methodologies from microalgae, with a focus on sustainable alternatives and scale-up strategies for industrial applications. An integrative literature review was conducted using national and international scientific databases, with a focus on publications from 2021 onward. Microalgae stand out for their high biotechnological potential, producing high-value compounds such as pigments, polyunsaturated fatty acids, and polysaccharides, and have shown feasibility in wastewater treatment processes. Among the analyzed methodologies, microwave-assisted extraction (MAE), enzyme-assisted extraction (EAE), and ultrasound-assisted extraction (UAE) were highlighted, especially when combined with green solvents, as more efficient and environmentally safe alternatives. Critical parameters influencing yield, such as liquid-to-solid ratio, temperature, power, and extraction time, were discussed. Regarding scale-up, techniques such as hydrodynamic cavitation, high-pressure microfluidization, and the use of photobioreactors were emphasized for their potential to optimize biomass productivity and quality. It is concluded that integrating efficient cultivation processes, intensifying extraction, and applying sustainable technologies is essential to economically enable large-scale microalgae bioproduct production, thereby contributing to the advancement of the bioeconomy and circular economy.

Keywords: Biocomposites; Green solvents; Biological reactors; Integrated processes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	19
Figura 2	21

LISTA DE TABELAS

Quadro 1	22
Quadro 2	28

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BCs - Compostos Bioativos

CH - Cavitação Hidrodinâmica

DHA - Ácido Docosa-Hexaenoico

EAE - Extração Assistida por Enzimas

EPA - Ácido Eicosapentaenoico

LED - Diodo Emissor de Luz

LSR - Razão Líquido-Sólido

MAE - Extração Assistida por Micro-ondas

NADES - Solventes Eutéticos Naturais Profundos

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

SFE - Extração com Fluido Supercrítico

TIR -Taxa Interna de Retorno

UAE - Extração Assistida por Ultrassom

UFFS - Universidade Federal da Fronteira Sul

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
3 METODOLOGIA	17
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A expansão de tecnologias eficientes em consolidar a incorporação dos fatores socioambientais e econômicos tem sido a pauta principal em debates na esfera global. Esforços articulados no contexto internacional, com o intuito de assegurar a integridade do planeta e das futuras gerações, levaram à proposição dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) pela Organização das Nações Unidas (ONU) (Silva et al., 2022). A partir dessa conjuntura, a biotecnologia tem ganhado gradualmente mais credibilidade como um instrumento chave e estratégico em decorrência de sua capacidade de usar a biodiversidade na geração de energias renováveis, na ampliação de uma agricultura sustentável e em processos químicos menos agressivos ao meio ambiente (Sutherland et al., 2021).

Com esse cenário, as microalgas têm recebido crescente valorização por oferecer considerável poder biotecnológico e aptidão para gerar diversos compostos economicamente importantes (Rizwan et al., 2018). A biomassa adquirida com a produção desses microrganismos é abundante em lipídeos e carboidratos, fato que oportuniza inclusive o desenvolvimento de biocombustíveis de 3ª geração. Ademais, esse composto ainda é constituído por componentes naturais com alto valor agregado, como ácidos graxos poli-insaturados, carotenoides e vitaminas. Em decorrência de sua diversidade metabólica, as microalgas têm a capacidade de se adaptar mais facilmente a mudanças climáticas e a variações nos meios de cultura, o que favorece maior resistência a fatores abióticos e substratos xenobióticos (Kokabi et al., 2019). Esses aspectos, unidos à sua aptidão de produção em biorreatores, que proporcionam o maior monitoramento de seus parâmetros bioquímicos e físico-químicos, expandem sua capacidade de fornecer compostos bioativos em maior escala. Ainda, a abundância de elementos de alto valor agregado, como fármacos e nutracêuticos, tem despertado o interesse do setor industrial, assim como a possibilidade de se empregar as microalgas como biocatalisadores de substratos exógenos e sua multifuncionalidade como biofertilizante (Victor et al., 2024).

Nos dias atuais é notável o contínuo aumento populacional em todo o planeta. Marcante nos países em desenvolvimento, o crescimento da urbanização se consolida a uma taxa mais elevada do que o planejamento das cidades, o que ocasiona dificuldades na área de saneamento, fato que pode desencadear doenças na população e efluentes contaminados (Iribarnegaray et al., 2018). Nesse contexto, as técnicas padronizadas existentes para tratamento de águas residuárias ainda exibem certas lacunas para se tornar efetivas, pois

exigem alta demanda energética, geram notáveis emissões de dióxido de carbono e necessitam de grandes quantidades de insumos químicos. Nesse sentido, a busca por tecnologias alternativas que propiciem menos impactos ao meio ambiente, como a exploração do uso de microalgas, torna-se primordial atualmente. Esse tipo de microrganismo tem a capacidade de remover carbono orgânico, nitrogênio e fósforo dos efluentes. Assim, ao serem comparadas, as técnicas que utilizam as microalgas para o tratamento de águas residuárias são mais eficientes que os tratamentos convencionais. Além de demandar menores custos, geralmente o efluente que deságua nos corpos hídricos têm maior caráter de oxigenação, fator que oportuniza a retirada de compostos proteicos e lipídicos da biomassa produzida, obtendo também compostos como o fósforo e o nitrogênio (Arbib et al., 2014). Um exemplo disso, é o tratamento de esgoto doméstico realizado por intermédio da fitorremediação que usa a microalga *Chlorella vulgaris*, que comprovadamente em estudos anteriores demonstrou a capacidade de extrair poluentes orgânicos e inorgânicos, como nitrogênio total e fósforo total em 71% e 67%, respectivamente (Gani et al., 2016). Dessa forma, é válido ressaltar que as microalgas utilizadas no tratamento de efluentes poderiam ser empregadas, por exemplo, para a obtenção de compostos farmacêuticos, desde que estes sejam purificados e submetidos a rigorosos processos de descontaminação e controle de qualidade, garantindo o atendimento às normas sanitárias e de segurança para uso humano.

Ademais, em virtude das mudanças climáticas e da presença gradativa de poluentes e pesticidas nos ecossistemas, diferentes pesquisas têm demonstrado que as microalgas, devido ao estresse causado pela exposição inadequada a esses compostos, têm a capacidade de amplificar suas respostas antioxidantes e aumentar suas atividades enzimáticas, como a catalase e a superóxido dismutase. Desse modo, esse fato pode ser mais bem explorado pela comunidade científica com o intuito de otimizar a extração de componentes de valor agregado (Du et al., 2022). Além disso, diferentes estudos têm explorado os benefícios que a biomassa composta pelas microalgas oferece para a saúde humana, analisando como ela pode contribuir para o tratamento de doenças como Alzheimer e Diabetes, fato que já tem alcançado respostas otimistas (Odenthal et al. 2024).

Assim, as microalgas podem ser consideradas um recurso renovável e estratégico, com qualidades para aplicação em diversas áreas biotecnológicas e potencial tendência para aproveitamento na economia circular (Kholssi et al., 2021). Em decorrência das funcionalidades salientadas, a presente revisão visa apresentar as principais metodologias de

extração de compostos bioativos de microalgas, bem como discutir estratégias de scale-up voltadas à aplicação industrial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa analisar a literatura disponível sobre os potenciais metodologias de extração de bioprodutos a partir de microalgas, avaliar os métodos alternativos com potencial de aplicação industrial em larga escala, bem como sua viabilidade econômica, considerando as variáveis influentes no processo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar os métodos convencionais e alternativos de extração de bioprodutos a partir de microalgas, destacando suas vantagens e desvantagens;
- Discutir os fatores que influenciam na eficiência da obtenção dos compostos bioativos, como as características dos solventes, o tipo de extração, as condições de processo, entre outros;
- Contribuir para o avanço do conhecimento sobre a utilização de resíduos na produção de compostos de alto valor agregado a partir de microalgas, incentivando práticas sustentáveis nos mais variados setores industriais.

3 METODOLOGIA

Para a elaboração deste documento, foi empregada uma revisão integrativa da literatura. A metodologia de revisão integrativa se constitui em um sistema que oportuniza o anexo de pesquisas experimentais e quase experimentais, reunindo literatura teórica e empírica a fim de se oportunizar um melhor entendimento aprofundado de um tópico em específico (Mendes; Silveira; Galvão; 2008). Essa metodologia engloba a união e síntese de dados de diferentes fontes com a finalidade estabelecer conceitos, reconhecer eventuais lacunas em áreas de pesquisa, reavaliar teorias e estudar métodos de estudo sobre um tema em particular. Ainda, as revisões integrativas são importantes para se debater os métodos e seus resultados, avaliar a possibilidade de estudos futuros, minimizar incertezas em recomendações práticas, oferecer generalizações mais precisas e propiciar a tomada de decisões para intervenções efetivas e economicamente viáveis (Souza; Silva; Carvalho; 2010).

Seguindo a metodologia supracitada, a revisão de literatura foi organizada em cinco etapas:

1. Elaboração da pergunta norteadora;
2. Busca na literatura;
3. Coleta de dados;
4. Análise crítica dos estudos;
5. Discussão dos resultados.

Diante disto, a pergunta norteadora utilizada foi: "Quais são as variáveis primordiais que exercem influência na otimização do processo de extração de bioprodutos a partir de microalgas e sua ampliação de escala?"

A fim de abordar as compreensões sobre metodologias alternativas para a extração de compostos de alto valor agregado que perpassam a área da biorrefinaria e métodos de ampliação de escala, optou-se por utilizar como fonte de dados os sites Scientific Electronic Library Online (SciELO), Web of Science e Science Direct (Elsevier), Springer e Google Acadêmico, publicados preferencialmente a partir de 2021. Alguns artigos adicionados à discussão deste trabalho antecedem o período estimado devido à escassez de pesquisas e

resultados analíticos feitos no período previamente estipulado. Foram incluídos artigos completos disponíveis nas plataformas acima citadas, escritos em português e inglês. A fim de assegurar o foco temático e o rigor metodológico, aplicaram-se os seguintes critérios de exclusão para a seleção dos trabalhos a serem analisados: (1) ausência de dados quantitativos sobre parâmetros de extração ou scale-up; (2) uso de matérias-primas não relacionadas a microalgas; (3) métodos convencionais sem comparação com técnicas emergentes.

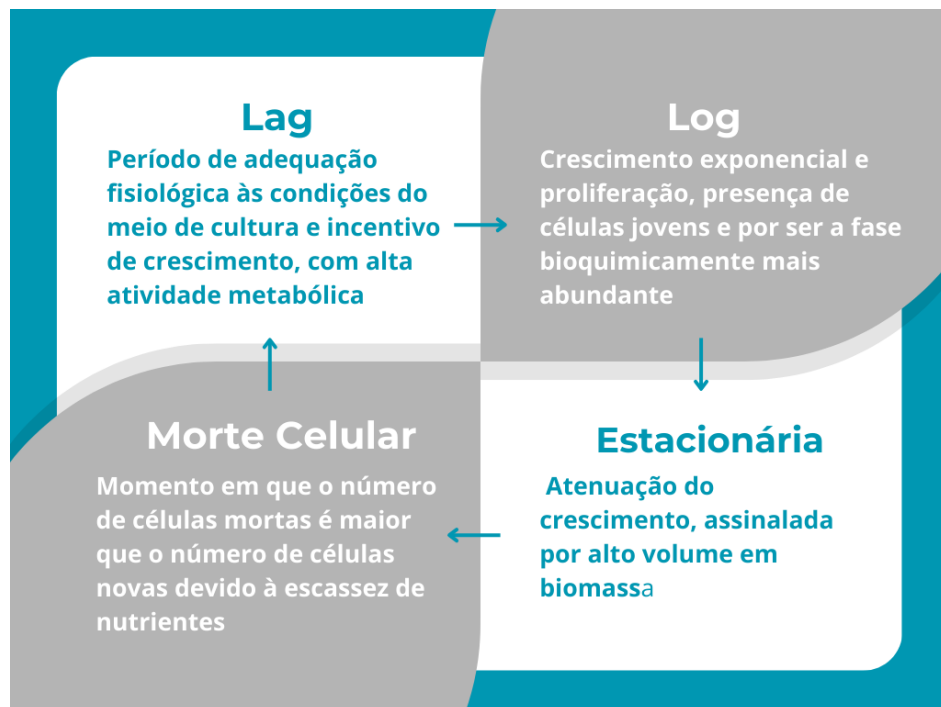
Isso posto, a partir da escolha dos artigos, foi feita a leitura do título, palavras-chave e resumo a fim de identificar os trabalhos relacionados a métodos alternativos de extração de microalgas, comparação entre métodos, avaliação da viabilidade econômica e aplicação em escala industrial. Foram avaliados artigos completos disponíveis nos sites eletrônicos acima citados. Assim, foram selecionados 41 trabalhos científicos, dos quais emergiram categorias que permitiram fomentar reflexões a respeito das produções da área de biorrefinaria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MICROALGAS COMO BIORREFINARIA

As microalgas compreendem uma ampla variedade morfofisiológica e genética, desde seres procarióticos, como as cianobactérias, até seres eucarióticos, como as clorófitas. O desenvolvimento desses microrganismos está ligado principalmente a três fatores: água, fonte de carbono e energia (Victor et al., 2024). Em se tratando de seu ciclo de vida, este pode ser descrito, resumidamente, pela Figura 1:

Figura 1 - Ciclo de vida das microalgas: etapas de crescimento e produção de biomassa



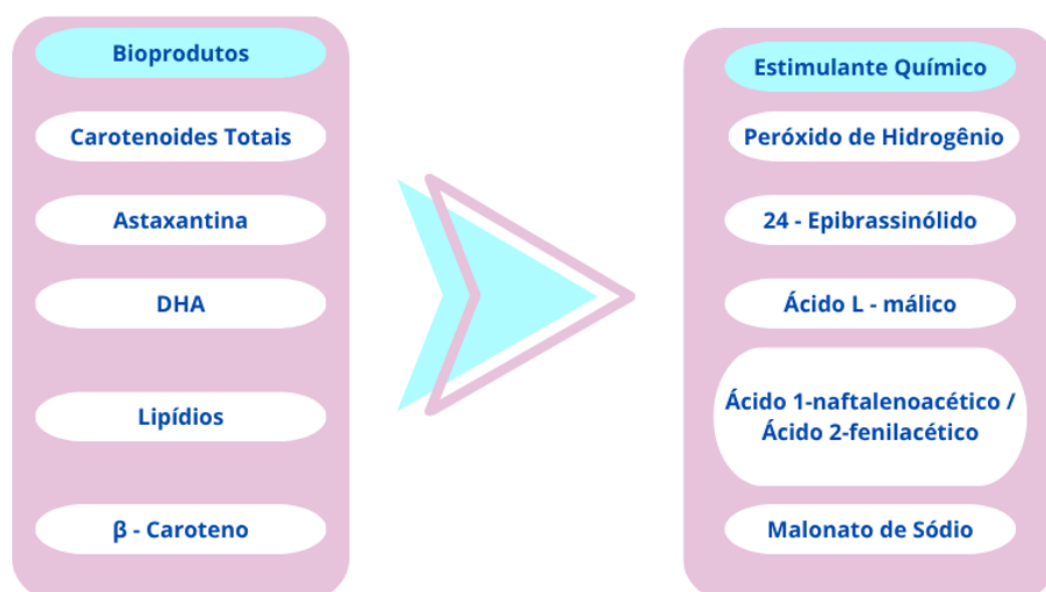
Fonte: Adaptado de Andrade et al., 2014.

Apesar de a via de desenvolvimento das microalgas ser majoritariamente fotoautotrófica, a sua flexibilidade na esfera metabólica acaba oportunizando também outras formas de se obter suplementação energética. Por exemplo, para os indivíduos heterotróficos, os compostos orgânicos são geralmente utilizados como fonte de energia e fonte de carbono. Já para o regime mixotrófico, a fonte energética é alcançada por meio da fotossíntese ou da oxidação de compostos orgânicos (Victor et al., 2024).

Dessa forma, a adaptabilidade das microalgas, sob diversas formas de cultivo, destaca-se como um fator de extrema relevância na esfera biotecnológica. Nessa conjuntura, a produção em maior escala de algas microbianas tem a capacidade de oportunizar a ascensão de empresas que tenham sua base em recursos sustentáveis, a fim de se produzir insumos de alto valor agregado, economicamente efetivos e alinhados com a produção de biomassa. Por isso, para as técnicas de microcultivo, é necessário efetivar um considerável aproveitamento da biomassa. Outra condição essencial para uma maior produtividade é a utilização de diferentes tipos de biorreatores. O planejamento sobre o sistema de biorreatores a ser utilizado tem a possibilidade de ser executado conforme as espécies a serem exploradas e em decorrência do perfil de produto. Já em um cenário de escala majorada, as espécies são cultivadas em lagoas abertas, que, no entanto, têm a característica negativa de fácil contaminação (Bhattacharya e Goswami, 2020).

No contexto de metodologias usadas para o aperfeiçoamento da produção de microalgas, o fortalecimento da fixação de carbono nas células, por meio do ajuste de suas vias metabólicas, oportuniza maior extração de bioprodutos, a partir de sua biomassa (Chen et al., 2018). A utilização de substâncias sintéticas, como intensificadores de modulação metabólica, tem evidenciado efeitos de regulação de vias biossintéticas, estímulo a respostas ao estresse oxidativo e de precursores metabólicos. A exemplo, uma espécie de bioproducto com produção modulada é o ácido docosa-hexaenoico (DHA), que é um dos ácidos graxos constituintes do ômega-3, que em decorrência de sua ação neuroprotetora, tem despertado interesse da indústria de nutracêuticos. Diversas pesquisas sobre culturas de *Chlorella sorokiniana* com ácido-1-naftalenoacético, associado ao ácido-2-fenilacético, revelaram bons índices crescimento de sua biomassa rica em lipídios em até 104%, já enquanto metodologias sobre o acréscimo de ácido málico ao meio de cultura de *Schizochytrium sp.* expandiram o conteúdo de DHA entre 35-60% em sua composição graxa total (Figura 2) (Victor et al., 2024.). Logo, o aperfeiçoamento do cultivo microalgal vem sendo relevante a fim de melhorar a composição da biomassa e efetivar seu emprego em processos biotecnológicos.

Figura 2 - Bioprodutos e seus respectivos estimulantes químicos com a finalidade de otimizar seu crescimento e acúmulo.



Fonte: Adaptado de Victor et al., 2024.

Por fim, dentre os diferentes bioprodutos de alto valor agregado sintetizados por algas microbianas, estão os carotenóides, o ácido docosahexaenóico (DHA), o ácido eicosapentaenóico (EPA), pigmentos bioativos e naturais, corantes naturais, polissacarídeos, e agentes de prevenção ao câncer. Além disso, nos últimos 20 anos, as pesquisas sobre as algas microbianas têm sido concentradas majoritariamente para o uso de quatro tipo de algas: a) *Spirulina* (*Arthrospira platensis*), b) *Chlorella vulgaris*, c) *Dunaliella salina* e d) *Haematococcus pluvialis* (Victor et al., 2024). A regulação metabólica, imposta nos meios de cultivo microalgas permite direcionar, incrementar e amplificar a obtenção de bioprodutos de interesses comerciais diversos, exemplificados no quadro 1 (Bhattacharya & Goswami, 2025).

Espécies / Grupo	Produtos	Área de Aplicação
<i>Spirulina platensis</i>	C-Ficocianina	Cosméticos, alimentos saudáveis
<i>Chlorella vulgaris</i>	Ácido ascórbico	Alimentos, suplementos e ração animal
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxantina	Alimentos saudáveis, cosméticos e ração animal
<i>Dunaliella salina</i>	β-Caroteno	Alimentos saudáveis, suplementos e ração animal
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	DHA	Desenvolvimento cerebral, saúde e nutrição infantil

<i>Spirulina maxima</i>	Proteína, vitamina B12	Antioxidantes, sistema imunológico
<i>Odontella aurita</i>	Ácidos graxos, EPA	Produtos farmacêuticos, cosméticos e anti-inflamatórios
<i>Porphyridium cruentum</i>	Polissacarídeos	Farmacêuticos e cosméticos
<i>Isochrysis galbana</i>	Ácidos graxos	Nutrição, produção de combustível
<i>Scenedesmus spp.</i>	Proteína	Aquicultura, nutrição animal

Fonte: Autoria própria.

Em síntese, o tipo de extração a ser adotado está diretamente relacionado às características físico-químicas do bioproduto que se deseja obter, como lipídios, proteínas, pigmentos ou polissacarídeos, exigindo abordagens específicas para maximizar a eficiência do processo.

4.2 METODOLOGIAS EMERGENTES: SOLVENTES VERDES COMO ALTERNATIVAS SUSTENTÁVEIS

Na atualidade, as técnicas mais comuns no âmbito da recuperação de componentes bioativos são a destilação a vapor, a hidrodestilação e a prensagem mecânica. Contudo, baixo rendimento de extração, tempo de extração extenso e grande quantidade de volume de solventes orgânicos necessários são características comuns a essas técnicas, fator que dificulta uma melhor efetivação dos processos e o compromisso com a economia sustentável (Vo et al., 2024). Dessa maneira, é notória a importância de se buscar e otimizar metodologias mais eficientes e comprometidas com o desenvolvimento sustentável que usem principalmente solventes menos nocivos.

O uso de solventes é essencial para as metodologias de extração, pois eles desassociam parcela de caráter solúvel de interesse na matriz das algas e depuram os extratos obtidos. Por outro lado, comumente é usado produtos de caráter orgânico como hexano, tolueno e metanol, fator que repercute em questões ambientais, como a toxicidade, a volatilidade e resíduos nocivos relacionados com esses componentes. Em vista disso, é necessário a busca de métodos que reduzam o uso de solventes orgânicos ou sua substituição por outros de caráter verde (Hashemi et al., 2022). Além disso, é importante salientar que,

para um gênero de solvente ser classificado como “verde”, ele precisa ser biodegradável, de baixa toxicidade e proveniente de fontes renováveis. Entre os principais exemplos de solventes verdes que têm sido utilizados pode-se citar a água, tanto no seu estado convencional quanto em seu estado subcrítico para extrair compostos hidrossolúveis e de menor polaridade.

Igualmente, solventes eutéticos e seus derivados naturais, como colina e o ácido láctico, apresentam poder de solvatação e são eficazes na extração de compostos fenólicos e flavonóides. Já os de caráter biológico, que são extraídos de matérias-primas renováveis, como resíduos agrícolas, incluindo terpenos como o d-limoneno, ésteres e álcoois, têm a capacidade de substituir solventes orgânicos (Chegukrishnamurthi et al., 2025).

4.2.1 MICRO-ONDAS

O processo de extração assistida por micro-ondas (MAE) está fundamentado na introdução direta de energia eletromagnética às microalgas, atividade que ocorre basicamente por dois sistemas de transferência de energia em nível molecular: a rotação dipolar e a condução iônica (Mao et al., 2023). As moléculas polares que constituem as algas e os solventes verdes retêm a energia das microondas, produzindo energia térmica. Ademais, o mecanismo de rotação dipolar é predominante quando a água destilada é utilizada, enquanto a condução iônica se torna prevalente em soluções salinas, ácidas e alcalinas. Ainda, esse método proporciona um aquecimento rápido e efetivo dos compostos, favorecendo mais eficiência para a extração e integridade das moléculas-alvo, como pigmentos, polifenóis e ácidos graxos.

Diversos estudos demonstram que, entre os principais parâmetros de aplicação das micro-ondas, destaca-se a razão líquido-sólido (LSR), que repercute diretamente na efetividade do aquecimento das micro-ondas. Pesquisadores têm observado que razões muito baixas de LSR prejudicam a difusão dos biocompostos para fora das células, e valores altos desencadeiam um aquecimento demasiado que pode destruir os BCs. Conforme observado por Safari et al. (2015) na otimização de MAE para obter bioprodutos de *Chaetomorpha* sp., empregou-se o modelo Central Composite Design e se investigou as atividades antioxidantes destes compostos. O conteúdo fenólico e o poder redutor foram de 1,09 e 0,12 mg equivalente de ácido tânico/g, respectivamente, nas condições ótimas de concentração de etanol a 25%, potência de micro-ondas de 300 W e tempo de extração de 8 min (Safari et al., 2015).

Outros fatores essenciais para a efetividade do ME são a potência e a temperatura empregadas. Consoante a análises já testadas, potências altas têm o poder de desencadear uma degradação térmica, mas se for bem aplicada, seu aumento também favorece a difusão dos compostos. Em relação a temperatura, Xiao et al. (2010) constataram uma considerável queda de eficiência na extração de flavonoides acima de 110 °C, indicando a relevância que o controle térmico pode acarretar perante compostos termossensíveis. Outras condições importantes são o tempo e os ciclos de extração. Cassani et al. (2024) obtiveram compostos fenólicos, flavonoides e fucoxantinas de *Ascophyllum nodosum* em condições ideais de 10,4 bar, 46,8% de etanol por cerca de 3 minutos, com rendimentos de 87,55, 15,72 e 2,55 mg/g, respectivamente (Cassani et al., 2024).

Além disso, o fracionamento da técnica em ciclos, com reintrodução de solvente pode ser efetivo para evitar degradações e manter o rendimento. Bárbara C. Jesus et al. (2023) utilizaram solventes eutéticos e MAE, extraindo cerca de 26,69 ppm de ácido salicílico de *Sargassum muticum* a 60 °C por 6 min, demonstrando a efetividade do processo como técnica de intensificação. Por fim, Lourenço-Lópes et al. (2023) analisaram a extração com MAE de fucoxantina a partir da alga *Undaria pinnatifida*, utilizando concentração de etanol, tempo e pressão como variáveis, no qual se obteve, por fim, uma concentração de 58,83 mg de fucoxantina por 3 minutos, a 2 bar, como melhor condição otimizada.

4.2.2 EXTRAÇÃO ASSISTIDA POR ENZIMAS

A extração por enzimas assistida (EAE) consiste em uma metodologia de extração de compostos bioativos (BCs) na qual as enzimas degradam a parede celular das algas, que é constituída por polissacarídeos como a pectina, o ágar, a celulose, a hemicelulose, o alginato, proteínas e fucanos (Velazquez-Lucio et al., 2018). Além disso, esses compostos de caráter estrutural constituem um empecilho para a liberação de BCs ligados à matriz celular. Dessa forma, com a introdução enzimática, é possível efetivar a quebra dessas estruturas, promovendo o alcance aos compostos-alvo e maximizando o rendimento das extrações. Geralmente são utilizadas α -amilase, celulase, pectinase e protease para se romper as estruturas de parede celular, podendo-se extrair compostos fenólicos, flavonóides, pigmentos e ácidos graxos (Jha et al., 2022).

Quando se discute a concentração de enzimas, esta se caracteriza como um dos mais importantes critérios que impactam na efetividade da EAE. Valores elevados têm a

capacidade de saturar o substrato ou podem levar à agregação enzimática, fator que pode diminuir o rendimento das interações. Em metodologia recente, que comprova essa premissa, Hoang Chinh Nguyen et al. (2024) utilizaram a EAE a fim de extrair compostos fenólicos de *Padina gymnospora*. As condições otimizadas — 0,32% de enzima, 60,5 °C, LSR de 61,31 mL/g e 1,95 h de tempo de extração — derivaram em um resgate de cerca de 97,6% de conteúdo fenólico total.

O potencial hidrogeniônico das soluções também tem poder de impacto na atividade enzimática, interagindo na sua conformação e estabilidade. Valores não inclusos na faixa ideal minimizam a interatividade entre a parede celular e as enzimas, o que dificulta a liberação dos compostos. Ademais, a oscilação do pH compromete a dissociação de grupos funcionais como aminas e hidroxilas, o que compromete o rendimento da extração (Ezeilo et al., 2020).

Outros parâmetros que repercutem tanto na integridade das enzimas quanto da difusividade dos compostos é a temperatura e o tempo de incubação. Em metodologia testada com *Caulerpa lentilifera*, Rahmawati et al. (2020) empregaram a papaína (protease de mamão) a 60 °C por 16 h com 0,5% de concentração enzimática, a fim de potencializar a recuperação de ácidos graxos poli-insaturados como o ômega-6 e ômega-9. Os resultados obtidos destacaram a necessidade de se encontrar um equilíbrio entre temperatura, tempo e estabilidade das enzimas para se evitar perdas por degradação térmica. Em se tratando da razão líquido-sólido (LSR), têm-se demonstrado que baixas concentrações acabam potencializando a viscosidade do meio e prejudicam o contato entre enzimas e substratos. Já altas concentrações encarecem custos operacionais sem o devido ganho proporcional de rendimento (Vo et al., 2024).

4.2.3 ULTRASSOM

A extração assistida por ultrassom (UAE) consiste em um processo mais sustentável, inovador e marcado pela produção reduzida de resíduos tóxicos e a viabilidade de se empregar solventes verdes, como os solventes eutéticos profundos. Baseada na cavitação acústica induzida por ondas ultrassônicas, esse método tem a capacidade de gerar efeitos físicos como microjatos, ondas de choque e fragmentação celular, que agridem a parede celular das algas e oportunizam a liberação dos compostos bioativos (BCs). De acordo com Jinggui Nie et al. (2021), esse recurso foi empregado para extrair fucoxantina de *Sargassum*

fusiforme, recorrendo ao limoneno e óleos vegetais como solventes. As condições otimizadas foram 40 mL/g (LSR), 75 °C e 53% de amplitude ultrassônica por 27 minutos.

No contexto da potência ultrassônica, essa se caracteriza como um dos parâmetros mais importantes para a efetivação da UAE. Diferentes trabalhos científicos identificam que potências entre 20 e 900 W são geralmente empregadas e repercutem numa boa cavitação e extração, porém, valores mais acentuados de potência podem ocasionar a colisão de bolhas e a redução na eficiência. Olfat et al. (2024) operaram com uma potência de 80 W, solvente NADES, LSR de 29,13 mL/g e tempo de 30 minutos e atingiram cerca de 88,31 mg/100g de compostos fenólicos de *Hypnea flagelliformis*.

Critérios como a pulsação ultrassônica e o tempo de exposição foram investigados por Putra et al. (2022), que aperfeiçoaram a metodologia para algas vermelhas a fim de extrair compostos fenólicos, empregando 100% de potência, ciclo de trabalho de pulso de 1 s⁻¹, 52,5 °C, etanol a 50% e LSR de 30 mL/g, repercutindo em cerca de 0,4 mg de ácido gálico (mg GAE/g). Em síntese, a pulsação é efetiva pois superaquece e produz cavitação intensa e homogênea, o que reflete em mais rendimento com menor consumo de energia. Já em se tratando do tempo, quantidades estendidas podem descontinuar os compostos de interesse e, dessa forma, deve ser mais bem desenvolvido.

A gestão da temperatura tem demonstrado também ser imprescindível para as extrações. Valores medianos como 50 – 75 °C corroboram para a difusão dos BCs sem degradar termicamente. Jinggui Nie et al. (2021) destacaram em seus experimentos que valores de temperaturas muito elevados maximizam a extração até um certo patamar, e após, ocorre a degradação da fucoxantina. Dessa forma, o padrão cinético apresentado no trabalho destaca que o tempo, a temperatura, e amplitude de extração sensibilizam a taxa de extração inicial e o rendimento final. Os parâmetros otimizados por eles foram: 75 °C, 53% de amplitude e 27 min, obtendo 696,85 µg/g de fucoxantina. Esses resultados fortalecem o potencial do EAU como um método comprometido com o meio ambiente e efetivo.

Embora o método de extração com fluido supercrítico (SFE) seja amplamente estudado na literatura por seu caráter sustentável e seletivo, os resultados pesquisados indicaram rendimentos inferiores quando comparados às metodologias emergentes como EAE, UAE e MAE. Por esse motivo, o uso de SFE ainda demanda mais pesquisas para otimização de

parâmetros operacionais e adaptação a diferentes tipos de biocompostos, sendo assim, optou-se por não o abordar em profundidade neste trabalho.

Quadro 2 - Comparação das Metodologias de Extração, Solventes Verdes Utilizados e Compostos Extraídos

Método	Solvente Verde	Estudo / Autor (Ano)	Parâmetros Principais	Compostos Extraídos
MAE	Etanol 25%	Safari et al. (2015)	300 W, 8 min	Compostos fenólicos, poder redutor.
MAE	Etanol 46,8%	Cassani et al. (2024)	10,4 bar, 3 min	Compostos fenólicos (87,55 mg/g), flavonoides (15,72 mg/g), fucoxantina (2,55 mg/g).
MAE	Etanol	Lourenço-Lópes et al. (2023)	3 min, 2 bar	Fucoxantina (58,83 mg).
MAE	Solventes eutéticos (DES)	Jesus et al. (2023)	60 °C, 6 min	Ácido salicílico (26,69 ppm).
EAE	Água acidificada	Shannon & Abu-Ghannam (2018)	pH 4,5, 3,05 h, 5,4% algas/água	Fucoxantina.
EAE	Água	Xiaoyan Zhao et al. (2019)	pH 5, 40 °C, 1 h	Astaxantina (60,93%).
EAE	Água	Habeebullah et al. (2020)	50 °C, 20 h, 1:100 ml/g	Polifenóis (8,25 mg GAE/g) e peptídeos antibacterianos.
EAE	Água	Hoang Chinh Nguyen et al. (2024)	0,32% enzima, 60,5 °C, 1,95 h, LSR 61,31 mL/g	Compostos fenólicos (97,6%).
EAE	Água	Rahmawati et al. (2020)	0,5% papaína, 60 °C, 16 h	Ômega-6 e ômega-9.
EAU	NADES	Olfat et al. (2024)	80 W, 29,13 mL/g, 30 min	Fenólicos (88,31 mg/100 g).
EAU	NADES	Obluchinskaya et al. (2023)	23 min, LSR 12:1, 30%	Florotaninos (137 mg/g).

			água	
EAU	Etanol 50%	Putra et al. (2022)	100% potência, 1 s pulsos, 52,5 °C, 30 mL/g	Fenólicos (~0,4 mg GAE/g).
EAU	DES (ác. octanoico + decanoico)	Yang et al. (2023)	50 °C, 49 min, LSR 66,2 mL/g	Cantaxantina (70,4 µg/mL).
EAU	Óleos vegetais / limoneno	Nie et al. (2021)	40 mL/g, 75 °C, 53% potência, 27 min	Fucoxantina (696,85 µg/g).
EAU	Água / NADES	Krishnamoorthy et al. (2023)	80 kHz, 15 min	Lipídios (17,9%).

Fonte: Autoria Própria.

4.3 METODOLOGIAS PARA EXPANSÃO DE ESCALA

O escalonamento de técnicas para a obtenção de bioinsumos a partir de microalgas é uma das principais adversidades para o estabelecimento de uma biorrefinaria em escala industrial. Estudos de referência destacam que a etapa de *downstream*, referente a fase que ocorre após o cultivo, focada no resgate efetivo e na preservação da qualidade, destaca-se como a parte que mais gera custos na cadeia produtiva, estando ligada a colheita, secagem, ruptura celular e extração, processos que requerem expressivas quantidades de energia e recursos (Korsah et al., 2025). Ademais, o processo de *upstream*, que engloba os estágios produtivos antecedentes, é referente ao cultivo, a escolha de cepas, o melhoramento de nutrientes, o aumento de biomassa, a iluminação e a administração de condições ambientais. Logo, uma boa sintonia entre esses estágios é importante para sustentar a viabilidade econômica e o compromisso com o meio ambiente. Ainda, outro fator que torna a ampliação de escala um desafio é a variabilidade das microalgas. Cada tipo pode deter peculiaridades e quantidades variadas de substâncias, fato que complexibiliza a padronização de metodologias e requer tratamentos específicos de acordo com o produto almejado (Jacob-Lopes et al., 2024).

Investigações têm analisado o papel da cavitação hidrodinâmica (CH) nesse cenário de extração de compostos em larga escala. Esse processo acontece quando um líquido é

acelerado por um instrumento como um Tubo Venturi ou orifício, no qual ocorre oscilações de pressão que geram bolhas de vapor. Estas bolhas colidem de forma enérgica e liberam calor, ondas de choque e microjatos líquidos, que têm a capacidade de penetrar e romper a parede celular das microalgas, liberando as substâncias de interesse (Sun et al., 2020). Como exemplo, recentemente têm-se demonstrado que um equipamento baseado em vórtice e utilizado com *Spirulina*, sob condições ótimas de 150 kPa e 90 passagens, repercutiu num consumo baixo de cerca de 0,06 kWh/kg de biomassa e rendimento de 52 mg de ficocianina por grama, indicando uma eficiência energética de até duas ordens de magnitude superior a métodos convencionais (Chegukrishnamurthi et al., 2025). Ademais, estudos evidenciam que a CH oportuniza uma eficiência energética maior que o ultrassom, sendo cerca de 6 a 10 vezes mais relevante, além de não requerer produtos químicos adicionais (Arya et al., 2023).

Outra inovação na área é a utilização da microfluidização em alta pressão. Esta técnica vem se destacando no escalonamento industrial, e apesar de trabalhar sob pressões de aproximadamente 120 MPa, possibilita forçar a suspensão de microalgas através de microcanais estreitos, produzindo forças de cisalhamento e choque hidráulico que rompem as células de forma satisfatória. Segundo resultados apresentados por Ke et al. (2023) que utilizaram *Chlorella pyrenoidosa*, esse mecanismo conseguiu atingir uma taxa de ruptura celular de até 98 %, além de amplificar o teor de sólidos solúveis e elevar na recuperação de proteínas, com uma efetividade de aproximadamente 20 %. Esse processo também repercutiu em maiores quantidades de lipídios e teores elevados de clorofila, assinalando que é uma metodologia compatível com a biomassa, não repercute em degradação térmica expressiva e é eficaz para se extrair biocompostos (Ke et al., 2023).

Uma estratégia tecnológica expressiva que também vem sendo aplicada são os fotobiorreatores. Compostos por sistemas fechados, promovem o crescimento das microalgas em meio altamente regulado, potencializando parâmetros como luz, temperatura, pH, disponibilidade de nutrientes e fornecimento de CO₂. Esses sistemas podem ser delineados em formatos diferentes de operação e ser constituídos por peças tubulares, painéis planos ou colunas de bolhas. Cada componente desse tipo oferece ganhos característicos em termos de eficiência de iluminação, transferência de massa e baixa complexibilidade operacional. Nos aparelhos de caráter tubular, a circulação do meio de cultivo se processa em tubos transparentes dispostos de forma horizontal ou vertical, enquanto os painéis planos operam com placas transparentes projetadas em camadas verticais ou horizontais a fim de potencializar a área de captação de luz. Já os fotobiorreatores em coluna de bolhas executam a

mistura e aeração com a injeção de ar em sua base, o que produz bolhas que amplificam a transferência de CO₂ e a padronização de cultivo (Korsah et al., 2025).

Nesse contexto, pesquisas têm demonstrado que os fotobiorreatores são capazes de conquistar uma alta produtividade de biomassa, principalmente em quantidades superiores às produzidas em sistemas abertos. Segundo a literatura, projetos com painéis planos e tubulares já tiveram o alcance produtivo constatado próximo a 1 g L⁻¹ dia⁻¹, em conformidade com a espécie cultivada e das condições de operação. Além disso e em contrapartida, no caso das lagoas abertas, os rendimentos típicos não ultrapassam 0,5 g L⁻¹ dia⁻¹ (Jacob-Lopes et al., 2024). Desse modo, mesmo diante de despesas iniciais e operacionais elevadas, esse tipo de mecanismo oferta uma efetiva captação de luminosidade, mais densidade celular e melhor utilização da área, condições que oportunizam o escalonamento para produção de bioprodutos de alto valor agregado. Ainda, a viabilidade de uma manipulação precisa das condições ambientais minimiza a probabilidade de contaminação e amplifica a qualidade da composição da biomassa. Em outra aplicação, o fotobiorreator com coluna de bolhas e volume útil de 28,5 L foi empregado para cultivar *Scenedesmus almeriensis* sob iluminação LED monitorada, temperatura retida em 28 °C e uma injeção constante de mistura gasosa composta por O₂, N₂ e CO₂. Esse sistema empregado sustentou um ambiente estável (± 1 °C, pH estável) e oportunizou a modelagem dos parâmetros de crescimento e resposta metabólica em regime contínuo, provando atender como uma matriz de referência para upstream e a inclusão do downstream em operações de biorrefinaria (Molino et al., 2019).

A simulação numérica do funcionamento dos fluidos tem ganhado sólida repercussão como um instrumento determinante nas metodologias para escalonamento de fotobiorreatores, oportunizando a antecipação ou a otimização de ocorrências de escoamento, mistura, transferência de massa e distribuição de luz no substrato de cultivo. Essa linha de ação capacita o ensaio de diferentes perfis de reatores e parâmetros de funcionamento, minimizando a demanda de prototipagem física, as despesas de elaboração e o prazo de execução do projeto industrial. Além disso, a modelagem ampara o reconhecimento de zonas mortas, fortalece a hidrodinâmica e melhora da eficiência de energia, pontos cruciais que refletem produtividade e qualidade da biomassa (Oro et al., 2025). Dessa forma, a associação entre cultivo, colheita e extração é importante para se maximizar a efetivação econômica da biorrefinaria de microalgas. Ademais, processos que empregam a integração de CH, microfluidização e solventes verdes em sistemas contínuos representam um caminho promissor para o escalonamento industrial.

O cálculo da capacidade e o estudo econômico de biorreatores são elementos determinantes para o êxito de processos biotecnológicos majorados. Um estudo recente de revisão tecnoeconômica divulgado na *Bioresource Technology* (2023) examinou as dificuldades relacionadas ao escalonamento de biorrefinarias microalgais, englobando etapas como a colheita, o beneficiamento *downstream* e a sustentabilidade financeira dos processos. Além do mais, os colaboradores contabilizaram que a despesa produtiva de biomassa ficava entre US \$ 2,5 e US \$ 10 por kg, de acordo com a abordagem tecnológica adotada como floculação em comparação à centrifugação, da variedade de sistema de cultivo (fotobiorreatores ou lagoas abertas) e das formas de extração (Korsah et al., 2025).

Já o capítulo 24 do livro de Jacob-Lopes et al. (2025) aborda de maneira sistemática as unidades que integram o design de sistemas reacionais, frisando o gerenciamento de parâmetros como a taxa de crescimento celular, a produtividade volumétrica, a conversão de nutrientes e tempo de residência de líquidos. Assim, o segmento também evidencia a quantificação econômico-financeira, reunindo características técnicas de encargos para funcionamento e financiamento. Dessa maneira, são evidenciados o custo de produção por quilograma de biomassa, o tempo de retorno do investimento e a taxa interna de retorno (TIR), que é a taxa de desconto que faz com que o valor presente líquido de todos os fluxos de caixa futuros de um projeto seja igual a zero. Ainda, são incluídas também ao conteúdo procedimentos para se minimizar custos como a recirculação de gás, a utilização de energia térmica residual, a potencialização do abastecimento de luz por LEDs com espectro ajustável e a seleção de materiais mais baratos para a montagem de reatores, como plásticos reforçados ou vidro de borossilicato.

Portanto, o êxito da ampliação de escala está interligado com a habilidade de se interligar os fundamentos disciplinares da engenharia de bioprocessos, bioquímica e economia. Logo, o estabelecimento de potenciais plataformas tecnológicas, versáteis e viáveis dependerá da capacidade de se adaptar os projetos de biorreatores às demandas específicas dos compostos-alvo e às condições regionais de produção. Em conclusão, a modernização em prol da aplicação industrial de inovações em extração de biocompostos a partir de microalgas necessitam de métodos combinados, que unam um cultivo efetivo, processos de intensificação e solventes ambientalmente amigáveis. Por fim, o estabelecimento na indústria desse tipo de inovação está subordinado a estudos contínuos de otimização e redução de custos, garantindo processos mais sustentáveis e economicamente viáveis.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na metodologia, a pergunta norteadora foi sobre quais são as variáveis primordiais que exercem influência na otimização do processo de extração de bioprodutos a partir de microalgas e sua ampliação de escala. Com base na literatura revisada, identificou-se que os principais parâmetros de extração incluem a razão líquido-sólido, a temperatura, o tempo de extração, a potência aplicada e a escolha do solvente, preferencialmente de caráter verde. Esses fatores devem ser ajustados de acordo com as propriedades físico-químicas do composto-alvo, visando maximizar a eficiência, evitar degradações e preservar características bioativas. Além disso, etapas prévias como a colheita e a ruptura celular influenciam diretamente a acessibilidade e o rendimento dos compostos.

No que se refere à ampliação de escala, variáveis como o tipo de sistema de cultivo, a integração entre as etapas upstream e downstream e a adoção de tecnologias de intensificação como cavitação hidrodinâmica, microfluidização em alta pressão e fotobiorreatores são determinantes para garantir viabilidade técnica, econômica e ambiental. Assim, a combinação entre otimização de parâmetros laboratoriais e estratégias eficazes de scale-up se mostra essencial para viabilizar biorrefinarias de microalgas competitivas, reduzindo custos, minimizando impactos ambientais e atendendo à crescente demanda por bioprodutos de alto valor agregado.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, D. et al. Microalgas de águas continentais: potencialidades e desafios do cultivo. 2014. Disponível em: <https://archivum.grupomarista.org.br/pergamumweb/vinculos//00005b/00005b30.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- ARBIB, Z. et al. Capacidade de diferentes espécies de microalgas para processos de fitorremediação: tratamento terciário de águas residuais, biofixação de CO₂ e produção de biocombustíveis de baixo custo. *Water Research*, v. 49, p. 465-474, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.036>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- BHATTACHARYA, M.; GOSWAMI, S. Microalgae - A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 25, p. 101580, 2020. ISSN 1878-8181. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101580>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- CASSANI, L. et al. Phytochemical compounds with promising biological activities from *Ascophyllum nodosum* extracts using microwave-assisted extraction. *Food Chemistry*, v. 438, p. 138037, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138037>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- CHEGUKRISHNAMURTHI, M. et al. Hydrodynamic cavitation mediated *Spirulina* valorisation with insights into phycocyanin extraction and biogas production. *Communications Biology*, v. 8, n. 1, p. 326, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s42003-025-07702-y>. Acesso em: 4 ago. 2025.
- CHEN, X. et al. Remoção de nitrogênio e fósforo de águas residuais digeridas anaerobicamente por microalgas cultivadas em um novo fotobiorreator de membrana. *Biotechnology for Biofuels*, v. 11, p. 190, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13068-018-1190-0>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- CHOKSHI, K. et al. Potencial de biocombustível da microalga *Acutodesmus dimorphus* sob condições de estresse oxidativo induzido por temperatura. *Bioresource Technology*, v. 180, p. 162-171, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.102>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- DEMAMAN ORO, C. E. et al. Process intensification approaches applied to the extraction of microalgae-based molecules. In: GAGNON, Y.; JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; DEPRÁ, M. C. (ed.). *Algal bioreactors*. Woodhead Series in Bioenergy. 1. ed. Amsterdam: Elsevier

Science Ltd, 2025. p. 323-329. ISBN 978-0-443-14059-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14059-4.00010-6>. Acesso em: 4 ago. 2025.

DU, S. et al. Respostas ao estresse oxidativo em duas diatomáceas marinhas durante a exposição aguda ao acrilato de n-butila e a avaliação toxicológica com o índice IBRv2. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 240, p. 113686, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113686>. Acesso em: 22 jul. 2025.

EZEILO, U. R.; WAHAB, R. A.; MAHAT, N. A. Optimization studies on cellulase and xylanase production by *Rhizopus oryzae* UC2 using raw oil palm frond leaves as substrate under solid state fermentation. *Renewable Energy*, v. 156, p. 1301-1312, 2020. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020REne..156.1301E/abstract>. Acesso em: 22 jul. 2025.

GANI, P. et al. Efeitos de diferentes condições de cultura na eficiência de fitorremediação de águas residuais domésticas. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 4, p. 4744-4753, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.11.008>. Acesso em: 22 jul. 2025.

HABEEBULLAH, K. et al. Enzyme-assisted extraction of bioactive compounds from brown seaweeds and characterization. *Journal of Applied Phycology*, v. 32, n. 1, p. 615-629, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-019-01906-6>. Acesso em: 22 jul. 2025.

HASHEMI, B. et al. Green solvents and approaches recently applied for extraction of natural bioactive compounds. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, v. 157, p. 116732, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116732>. Acesso em: 22 jul. 2025.

IRIBARNEGARAY, M. A. et al. Desafios de gestão para um tratamento e reuso mais descentralizados de águas residuais domésticas em áreas metropolitanas. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 8, p. 113-122, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/washdev.2017.092>. Acesso em: 22 jul. 2025.

JACOB-LOPES, E. (org.). *Algal bioreactors: scale-up, economics, and sustainability*. v. 2. 1. ed. Amsterdam: Elsevier, 2025. (Advances in Algal Biology and Biotechnology). ISBN 978-0-443-14059-4. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780443140594/algal-bioreactors>. Acesso em: 4 ago. 2025.

JESUS, B. C. et al. Valorisation of *Sargassum muticum* through the extraction of phenolic compounds using eutectic solvents and intensification techniques. *RSC Sustainability*, v. 1, n. 5, p. 1245-1258, 2023. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2023/su/d3su00051f>. Acesso em: 4 ago. 2025.

JHA, A. K.; SIT, N. Extraction of bioactive compounds from plant materials using combination of various novel methods: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 119, p. 579-591, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.11.019>. Acesso em: 4 ago. 2025.

KE, Y. et al. Developing industry-scale microfluidization for cell disruption, biomolecules release and bioaccessibility improvement of *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioresource Technology*, v. 387, p. 129649, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129649>. Acesso em: 4 ago. 2025.

KHOLSSI, R. et al. Biotechnological uses of microalgae: a review on the state of the art and challenges for the circular economy. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 36, p. 102114, 2021. ISSN 1878-8181. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2021.102114>. Acesso em: 22 jul. 2025.

KOKABI, K. et al. Metabolomic foundation for differential responses of lipid metabolism to nitrogen and phosphorus deprivation in an arachidonic acid-producing green microalga. *Plant Science*, v. 283, p. 95-115, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.02.008>. Acesso em: 22 jul. 2025.

KORSAH, M. A. et al. Techno-economic analysis of downstream processing of microalgae. In: GAGNON, Y.; JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; DEPRÁ, M. C. (ed.). *Algal bioreactors*. Woodhead Series in Bioenergy. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2025. p. 309-321. ISBN 978-0-443-14059-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14059-4.00003-9>. Acesso em: 4 ago. 2025.

KRISHNAMOORTHY, A.; RODRIGUEZ, C.; DURRANT, A. Optimisation of ultrasonication pretreatment on microalgae *Chlorella vulgaris* & *Nannochloropsis oculata* for lipid extraction in biodiesel production. *Energy*, v. 278, p. 128026, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128026>. Acesso em: 4 ago. 2025.

LOURENÇO-LOPES, C. et al. Tecnologias emergentes para extração de fucoxantina de *Undaria pinnatifida*: extrações assistidas por micro-ondas vs. ultrassom. *Marine Drugs*, v. 21, n. 5, p. 282, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/md21050282>. Acesso em: 4 ago. 2025.

MAO, Y.; ROBINSON, J. P.; BINNER, E. R. Current status of microwave-assisted extraction of pectin. *Chemical Engineering Journal*, v. 473, p. 145261, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145261>. Acesso em: 4 ago. 2025.

MENDES, K. D. S. et al. Revisão integrativa: método de pesquisa para a incorporação de evidências na saúde e na enfermagem. *Texto & Contexto - Enfermagem*, v. 17, n. 4, p. 758-

764, dez. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-07072008000400018>. Acesso em: 22 jul. 2025.

MOLINO, A. et al. Cultivo em escala de bancada da microalga *Scenedesmus almeriensis* para captura de CO₂ e produção de luteína. *Energies*, v. 12, n. 14, p. 2806, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12142806>. Acesso em: 4 ago. 2025.

NGUYEN, H. C. et al. Enzyme-assisted coextraction of phenolics and polysaccharides from *Padina gymnospora*. *Marine Drugs*, v. 22, n. 1, p. 42, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/md22010042>. Acesso em: 4 ago. 2025.

NIE, J. et al. Otimização e modelagem cinética da extração assistida por ultrassom de fucoxantina de algas marrons comestíveis *Sargassum fusiforme* usando solventes verdes. *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 77, p. 105671, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105671>. Acesso em: 4 ago. 2025.

OBLUCHINSKAYA, E. D. et al. Optimization of extraction of phlorotannins from the arctic *Fucus vesiculosus* using natural deep eutectic solvents and their HPLC profiling with tandem high-resolution mass spectrometry. *Marine Drugs*, v. 21, n. 5, p. 263, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/md21050263>. Acesso em: 4 ago. 2025.

ODENTHAL, K. et al. Microalgas e cianobactérias como fontes naturais de enzimas antioxidantes e inibidores de enzimas para Alzheimer e diabetes. *Algal Research*, v. 82, p. 103610, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103610>. Acesso em: 22 jul. 2025.

OLFAT, A. et al. Extraction of bioactive compounds of *Hypnea flagelliformis* by ultrasound-assisted extraction coupled with natural deep eutectic solvent and enzyme inhibitory activity. *Algal Research*, v. 78, p. 103388, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103388>. Acesso em: 22 jul. 2025.

PUTRA, V. G. P. et al. An ultrasound-based technique for the analytical extraction of phenolic compounds in red algae. *Arabian Journal of Chemistry*, v. 15, n. 2, p. 103597, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103597>. Acesso em: 22 jul. 2025.

RAHMAWATI, S. I. et al. Enzyme-assisted extraction of fatty acid from *Caulerpa lentilifera*: a preliminary study. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [S.l.]: IOP Publishing, 2020. p. 012040. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/404/1/012040>. Acesso em: 22 jul. 2025.

RIZWAN, M. et al. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, p. 394-404, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.034>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SAFARI, P.; REZAEI, M.; SHAVIKLO, A. R. Condições ótimas para a extração de compostos antioxidantes de algas verdes do Golfo Pérsico (*Chaetomorpha* sp.) utilizando metodologia de superfície de resposta. *Journal of Food Science and Technology*, v. 52, p. 2974-2981, 2015. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-014-1355-1>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SHANNON, E.; ABU-GHANNAM, N. Enzymatic extraction of fucoxanthin from brown seaweeds. *International Journal of Food Science and Technology*, v. 53, n. 9, p. 2195-2204, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13808>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SILVA, I. F. et al. Movimento Química pós 2022: construção de um plano de ação para que a Química e seus atores impactem a sustentabilidade e soberania no Brasil. *Química Nova*, v. 45, n. 4, p. 497-505, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170898>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SOUZA, M. T. de; SILVA, M. D. da; CARVALHO, R. de. Integrative review: what is it? How to do it? *Einstein (São Paulo)*, v. 8, n. 1, p. 102-106, mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>. Acesso em: 22 jul. 2025.

SUN, X. et al. Hydrodynamic cavitation: a promising technology for industrial-scale synthesis of nanomaterials. *Frontiers in Chemistry*, v. 8, 2020. ISSN 2296-2646. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00259>. Acesso em: 4 ago. 2025.

SUTHERLAND, D. L. et al. How microalgal biotechnology can assist with the UN Sustainable Development Goals for natural resource management. *Current Research in Environmental Sustainability*, v. 3, p. 100050, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100050>. Acesso em: 22 jul. 2025.

VELAZQUEZ-LUCIO, J. et al. Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: a review. *Biofuel Research Journal*, v. 17, p. 780-791, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18331/BRJ2018.5.1.5>. Acesso em: 4 ago. 2025.

VICTOR, M. M.; MOUTINHO, F. L. B.; RIATTO, V. B. Microalgas: uma estratégia sustentável na transformação e obtenção de compostos orgânicos. *Química Nova*, v. 47, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230107>. Acesso em: 22 jul. 2025.

VO, T. P. et al. Novel extraction of bioactive compounds from algae using green solvent: principles, applications, and future perspectives. *Journal of Agriculture and Food Research*, p. 101535, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101535>. Acesso em: 22 jul. 2025.

XIAO, W.; HAN, L.; SHI, B. Microwave-assisted extraction of flavonoids from *Radix Astragali*. *Separation and Purification Technology*, v. 62, n. 3, p. 614-618, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.03.025>. Acesso em: 4 ago. 2025.

XU, M. et al. Effect of biodrying of lignocellulosic biomass on humification and microbial diversity. *Bioresource Technology*, v. 384, p. 129336, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129336>. Acesso em: 4 ago. 2025.

YANG, Y. et al. O progresso recente em compostos bioativos da biomassa de algas para aplicações na saúde humana. *Food Bioscience*, v. 51, p. 102267, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102267>. Acesso em: 4 ago. 2025.

ZHAO, X. et al. Enzyme-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and its stability and antioxidant activity. *Food Science and Biotechnology*, v. 28, n. 6, p. 1637-1647, 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10068-019-00608-6>. Acesso em: 4 ago. 2025.