

Bioeconomia Circular e biorrefinaria: conceitos, oportunidades e desafios considerando o uso de biomassa de microalgas no Brasil

RESUMO

Adna Caroline Vale Oliveira

adnaoliveira@gmail.com

Universidade Federal da Bahia. Salvador.
Bahia. Brasil.

Aline de Souza Silva

aline.silva@ufba.br

Universidade Federal da Bahia. Salvador.
Bahia. Brasil.

Carolina de Andrade Spinola

carolina.spinola@unifacs.br

Universidade Federal da Bahia. Salvador.
Bahia. Brasil.

Ícaro Thiago Andrade Moreira

icarotam@ufba.br

Universidade Federal da Bahia. Salvador.
Bahia. Brasil.

Recente destaque tem sido dado à biomassa de microalgas de diversas espécies como fonte de matéria prima renovável para gerar bioenergia e bioprodutos com alto valor industrial e comercial. Apesar de o Brasil ser reconhecido como um mercado promissor para biomassa de microalgas e deter uma infraestrutura consolidada de biorrefinarias de cana-de-açúcar e lignocelulósica, existem desafios que precisam ser superados para a sua produção em escala. Este artigo tem como objetivo investigar o panorama atual de biorrefinarias no Brasil, com foco no potencial uso de biomassa de microalgas. Para isso, utilizou-se de revisão de literatura, pesquisa documental e uma análise do tipo SWOT. Os resultados obtidos revelam que, a despeito de sua alta produtividade de biomassa e da grande capacidade de biofixar o CO₂, limitações relacionadas aos altos custos e à baixa disponibilidade de matérias-primas e equipamentos comprometem a viabilidade do seu processo de produção. No entanto, as oportunidades identificadas aparecem como alternativas para superar os desafios associados as ameaças. Este estudo oferece insights para orientar ações futuras em direção ao desenvolvimento desse setor no Brasil e, ao mesmo tempo aprofunda a compreensão do potencial das biorrefinarias e das microalgas sob a perspectiva da bioeconomia circular.

PALAVRAS-CHAVE: Biotecnologia, Biomassa de microalgas, Biorrefinaria de terceira geração, Economia verde, Análise SWOT.

1 INTRODUÇÃO

Em uma economia linear, a pressão ambiental associada ao consumo de recursos e à geração de resíduos é especialmente elevada em áreas urbanas e, em particular, nos países em desenvolvimento (OLIVEIRA; SILVA; MOREIRA, 2019). Nesse contexto desafiador, a bioeconomia circular emerge como um modelo econômico de base biológica que propõe o uso eficiente de biomassas e resíduos como matérias-primas, visando processos de produção e produtos sustentáveis (TAN; LAMERS, 2021).

Uma parte importante da transição para uma bioeconomia circular é desempenhada pelas biorrefinarias, que utilizam, de forma eficiente, os recursos biológicos e resíduos, permitindo o processamento de biomassas por meio de diferentes rotas tecnológicas para a produção de uma ampla gama de produtos, desde bioenergia até ração para animais (RAJESH BANU et al., 2021; TALAN et al., 2022).

Em resposta à busca pela diversificação de matérias-primas, destaque tem sido dado à biomassa de microalgas de diversas espécies (BHATTACHARYA; GOSWAMI, 2020; SATYA et al., 2023). As microalgas são microrganismos unicelulares, produtores de biomassa com alto valor agregado, que possuem a capacidade de capturar o CO₂ por meio da fotossíntese. Sua biomassa pode ser transformada em diferentes bioprodutos destinados a setores variados, como saúde, indústria química, cosmética, agricultura (CASTRO et al., 2020), aquicultura (GAO et al., 2016; MORAIS JUNIOR et al., 2020; NAGARAJAN et al., 2020).

Apesar de o Brasil ser reconhecido como um mercado promissor para biomassa de microalgas e deter uma infraestrutura consolidada de biorrefinarias de cana-de-açúcar e lignocelulósica (VANDENBERGHE et al., 2022), existem lacunas entre os estudos científicos e as aplicações industriais das biomassas de microalgas a serem superados. Para enfrentar os desafios e assumir uma posição estratégica no cenário global da bioeconomia circular, o Brasil precisa avançar em políticas públicas, incentivos fiscais, pesquisa e desenvolvimento, e tecnologias que permitam explorar ao máximo o potencial das microalgas (CALICIOGLU; BOGDANSKI, 2021; QUINTELLA; HANNA; SANTOS, 2024).

Além disso, uma estratégia alinhada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) que considere as características regionais e territoriais, bem como a rica diversidade geográfica e climática brasileira, é necessária para o planejamento e desenvolvimento dos processos de biorrefinarias de microalgas (CALICIOGLU; BOGDANSKI, 2021; FERRAZ; PYKA, 2023).

Estudos anteriores já abordaram desafios, bem como várias oportunidades das biorrefinarias de microalgas no Brasil. Andrade, Telles e Leite Castro (2020) investigaram a cadeia produtiva de microalgas no país, enquanto Colling Klein, Bonomi e Maciel Filho (2018), Klein et al., (2019), Moncada, Tamayo e Cardona, (2014) e Sano Coelho et al., (2021) examinaram a integração das biorrefinarias de cana-de-açúcar e microalgas, considerando aspectos como: análise do ciclo de vida, viabilidade técnico-econômica e ambiental, além do Programa RenovaBio. A integração entre a produção de microalgas e a indústria de processamento de mandioca foi investigada por Carvalho et al., (2018), enquanto Sydney et al., (2019) estudaram o desenvolvimento de uma biorrefinaria de microalgas a partir de resíduos da produção de bioetanol da cana-de-açúcar.

No entanto, até o momento, a literatura científica ainda não apresenta estudos que investiguem o estado atual das biorrefinarias de microalgas no Brasil, considerando impactos sociais, ambientais e regulatórios, sob a perspectiva da Bioeconomia Circular e que forneçam subsídios para o planejamento de uma estratégia visando o fortalecimento do setor. Diante do exposto, este estudo tem como objetivo preencher esta lacuna ao investigar o panorama atual de biorrefinarias no Brasil, com foco no potencial uso de biomassa de microalgas, bem como identificar as oportunidades e desafios atuais para sua consolidação no âmbito da Bioeconomia Circular.

O artigo, incluindo esta introdução, está estruturado da seguinte forma: a sessão 2 descreve a metodologia utilizada no estudo; a sessão 3 apresenta a abordagem conceitual para construção do conceito da Bioeconomia Circular; e a sessão 4 discute o cenário brasileiro de biorrefinarias de microalgas, além de apresentar características gerais das biorrefinarias de microalgas. A análise SWOT é detalhada na sessão 5, seguida da discussão dos resultados. Por fim, a sessão 6 traz as principais conclusões do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

Trata-se de um estudo exploratório, de abordagem qualitativa, que se valeu de uma ampla pesquisa bibliográfica e documental. A pesquisa bibliográfica consistiu em uma revisão de artigos de pesquisa experimental indexados nas principais bases de dados científicas com o intuito de estabelecer um contexto teórico e identificar lacunas, desafios e tendências associados ao tema em estudo.

A pesquisa documental foi conduzida em relatórios governamentais, marcos regulatórios e leis pertinentes ao setor de biorrefinarias, bioeconomia e microalgas. Esta fase objetivou a coleta de dados quantitativos e qualitativos acerca do atual cenário regulatório, das políticas públicas, dos incentivos e dos investimentos associados ao avanço da bioeconomia, das biorrefinarias e à produção de biomassa de microalgas no território nacional.

Por fim, para uma análise integrada e estratégica dos dados coletados, com a identificação dos desafios e oportunidades foi empregada a matriz SWOT. A matriz SWOT sigla em inglês para Strengths (forças), Weaknesses (fraquezas), Opportunities (oportunidades) e Threats (ameaças) (NAKAGAWA, 2011), é adotada como ferramenta de planejamento estratégico. Oriunda da área de negócios e originalmente creditada à Harvard Business School, esse tipo de análise considera as perspectivas internas (forças e fraquezas) e externas (ameaças e oportunidades) a um dado setor ou operação, possibilitando a identificação de tendências positivas ou negativas que subsidiem o direcionamento de ações que possibilitem a correção de problemas e a potencialização de vantagens (MINTZBERG et al, 2000), no âmbito de um plano estratégico que direcione a tomada de decisões e, no caso deste estudo, a formulação de políticas de fomento às biorrefinarias de microalgas no Brasil. (PHADERMROD; CROWDER; WILLS, 2019).

3 CONCEITOS EM DIREÇÃO À BIOECONOMIA CIRCULAR

O conceito de Economia Circular (EC), embora esteja em crescente evidência, não é novo (FIGGE; THORPE; GUTBERLET, 2023). Diversas escolas de pensamento como, do berço ao berço (cradle-to-cradle) (BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W, 2014), design regenerativo (ELLEN M., 2015), economia de performance, ecologia industrial (MURRAY; SKENE; HAYNES, 2017), biomimética (BENYUS J.M, 1997) economia azul (KEEN; SCHWARZ; WINI-SIMEON, 2018) e capitalismo natural (HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, H, 2000) são apontadas pela literatura como contribuintes ao longo do tempo para a construção deste conceito, desde o fim da década de 1970, destacando-se nos anos 1990 e, posteriormente, sendo incorporado às agendas e políticas governamentais a partir dos anos 2000 (REIKE; VERMEULEN; WITJES, 2018).

Consequentemente, não há uma definição única empregada globalmente para o termo Economia Circular. Entre os vários estudos, o conceito delineado pela Fundação Ellen Macarthur (2015) é amplamente reconhecido e incorporado em políticas ao redor do mundo, sendo este definido como:

economia que é restaurativa e regenerativa por princípio e tem como objetivo manter produtos, componentes e materiais em seu mais alto nível de utilidade e valor o tempo todo, fazendo distinção entre ciclos técnicos e biológicos. A economia circular é concebida como um ciclo contínuo de desenvolvimento positivo que preserva e aprimora o capital natural, otimiza a produtividade de recursos e minimiza riscos sistêmicos gerindo estoques finitos e fluxos renováveis (EMF 2015, p. 22).

No cerne das diversas interpretações atribuídas à definição de EC, encontra-se o objetivo comum de transição para um modelo econômico sustentável e eficiente na gestão de matéria-prima e energia. Esse modelo econômico foca especialmente na redução da geração e do descarte de resíduos, valorizando-os (OLIVEIRA; SILVA; MOREIRA, 2019).

3.1 Bioeconomia

A Bioeconomia (BE), também conhecida como economia de base biológica, visa à consolidação de uma economia baseada em recursos biológicos renováveis (REBOLLEDO-LEIVA; MOREIRA; GONZÁLEZ-GARCÍA, 2023). Seu objetivo é desenvolver processos de produção mais sustentáveis, substituindo matérias-primas oriundas de recursos fósseis por insumos biológicos, ou seja, biomassas. Nesse contexto, a bioeconomia é reconhecida como um importante paradigma em direção ao desenvolvimento sustentável (MOUGENOT; DOUSSOULIN, 2021).

Assim como a Economia Circular, o termo Bioeconomia não é novo, e passou por transformações ao longo do tempo. Isso se deve ao fato de diferentes atores, como cientistas, governo, setor privado e indústria terem contribuído para a construção do conceito de bioeconomia, levando em conta o cenário político, tecnológico e ambiental. Diversas interpretações são encontradas não só na literatura, mas também em agendas e estratégias políticas (TAN; LAMERS, 2021).

Nesse contexto, em seu estudo, Bugge, Hansen e Klitkou (2016) investigaram e identificaram que, na literatura, prevalecem três visões distintas, porém

complementares, sobre o termo bioeconomia. Essas visões são, principalmente, fundamentadas em biotecnologia, bioecologia e biorrecursos.

Na Europa, a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) definiu o termo bioeconomia com base em uma visão biotecnológica da seguinte maneira: “um mundo em que a biotecnologia contribui para uma parcela significativa da produção econômica, envolvendo três elementos: biotecnologias, biomassa renovável e integração entre aplicações” (OECD, 2009).

Por sua vez, a Comissão Europeia (2012), com base na visão de biorrecursos, define a bioeconomia como: “a produção de recursos biológicos renováveis e a conversão desses recursos e fluxos de resíduos em produtos de valor agregado, como alimentos, rações, produtos de base biológica e bioenergia” (COMISSÃO EUROPEIA, 2012).

No Brasil, o termo bioeconomia ainda não possui uma definição governamental unificada. O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicação (MCTIC) define bioeconomia como

o conjunto de atividades econômicas baseadas na utilização sustentável e inovadora de recursos biológicos renováveis (biomassa), em substituição às matérias-primas fósseis, para a produção de alimentos, rações, materiais, produtos químicos, combustíveis e energia produzidos por meio de processos biológicos, químicos, termoquímicos ou físicos, promovendo a saúde, o desenvolvimento sustentável, o crescimento nacional e o bem-estar da população (MCTIC; CGEE, 2018, p.12).

Já a Confederação Nacional da Indústria (CNI), em parceria com a Harvard Business Review Brasil, publicou, em 2013, o documento “Bioeconomia: uma agenda para o Brasil”. Nesse documento, a bioeconomia é definida como

resultado de uma revolução de inovações aplicadas no campo das ciências biológicas, diretamente ligada à invenção, ao desenvolvimento e ao uso de produtos e processos biológicos nas áreas da saúde humana, produtividade primária pecuária e biotecnologia (HARVARD BUSINESS REVIEW, 2013, p.4).

3.2 Bioeconomia Circular

O termo “Bioeconomia Circular”, como modelo econômico de produção, emergiu na Europa a partir da publicação das estratégias atualizadas do Plano de Ação da Economia Circular da Comissão Europeia, em 2015. Nesta publicação, a bioeconomia circular foi definida como: “a aplicação do conceito de economia circular a insumos e produtos biológicos” (CNI, 2019).

Stegmann, Londo e Junginger (2020) observaram que a literatura apresenta diferentes abordagens em relação ao termo “bioeconomia circular”. Alguns autores, como Carus e Dammer (2018), Velazquez-Lucio et al., (2018) e Venkata Mohan et al., (2019) definem a bioeconomia circular como a interseção entre a economia circular e a bioeconomia. Por outro lado, outra corrente de pensamento mais ampla, incluindo D’Amato, Veijonaho e Toppinen (2020) e Hetemäki et al., (2017), adota uma perspectiva que vai além, definindo a bioeconomia circular como: “mais do que apenas bioeconomia ou economia circular”.

4 BIOECONOMIA, BIORREFINARIAS E O BRASIL

O Brasil não possui uma Política Nacional de Bioeconomia; entretanto, o governo brasileiro tem desenvolvido diversas estratégias relacionadas à bioeconomia desde a década de 1970 (HARVARD BUSINESS REVIEW, 2013; MCTIC; CGEE, 2018).

A Confederação Nacional da Indústria destaca que as estratégias de bioeconomia no Brasil “são executadas de forma desarticulada, por diferentes ministérios, inexistindo um consenso sobre o tema ou mesmo sobre o que seria a bioeconomia” (PEREIRA, 2020, p. 25).

O termo bioeconomia, como estratégia política no Brasil, surge a partir de 2013, introduzido pelo setor industrial por meio do documento “Bioeconomia: uma agenda para o Brasil” (HARVARD BUSINESS REVIEW, 2013). Além disso, a CNI publicou o documento “Bioeconomia: oportunidades, obstáculos e agenda”, em 2014 (CNI, 2014), o que também endossou a relevância e importância de se discutir a temática de forma mais ampla.

Em 2016, a bioeconomia passou a integrar a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (2016-2019) (ENCTI), lançada por meio do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicação (MCTIC). No mesmo ano, foram traçadas as áreas estratégicas para o desenvolvimento e consolidação da bioeconomia por meio do projeto “Mapeamento de Competências em Temáticas Estratégicas em Bioeconomia” (CGEE, 2017).

Em 2017, a bioeconomia foi incorporada à agenda agrícola pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), por meio dos documentos “Bioeconomia: Moldando o futuro da agricultura” e “Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira” (EMBRAPA, 2018). A partir do ano de 2018, diferentes ministérios iniciaram políticas baseadas em bioeconomia, como o “Plano de ação em CT&I: bioeconomia” (MCTIC; CGEE, 2018). Por fim, em 2019, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) conduziu o Programa Bioeconomia Brasil: Sociobiodiversidade (BRASIL, 2019).

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), os principais atores da bioeconomia no Brasil são: I) instituições governamentais; II) instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento, incluindo universidades e outras instituições públicas e privadas; III) empresas privadas (pequeno, médio e grande porte), confederações e produtores (pequeno, médio, grande); IV) consumidores; V) instituições de investimento e fomento (IPEA, 2017).

Sob a coordenação do MCTIC, a Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação (ENCTI 2016-2019) conduziu a elaboração dos “Planos de Ação em CT&I” (PACTI), com o objetivo de superar desafios nacionais em áreas estratégicas, incluindo a bioeconomia. O Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Bioeconomia” (PACTI Bioeconomia) é composto por cinco Linhas Temáticas de atuação: I) biomassa; II) processamento e biorrefinarias; III) bioprodutos; IV) observatório brasileiro de bioeconomia; e V) instância central coordenadora da bioeconomia (MCTIC; CGEE, 2018).

4.1 Biorrefinarias de microalgas

No contexto brasileiro, o desenvolvimento de biorrefinarias foi impulsionado na década de 1970, com a implementação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool), em 1975. Esse programa tinha como objetivo aumentar a produção do etanol a partir da cana-de-açúcar para uso como combustível automotivo em substituição à gasolina. Isso ocorreu em resposta ao aumento do preço do petróleo, ocasionado pela crise mundial enfrentada pelo setor energético àquela época. Desde então, o Brasil continuou investindo em inovações e tecnologias no setor de biorrefinarias (BRASIL; SILVA; SIQUEIRA, 2017; KLEIN et al., 2019).

Embora o mercado mundial das microalgas e seus derivados esteja em ascensão e significativamente aquecido (ABU-GHOSH et al., 2021), a exploração comercial desses recursos já acontece há longos anos. As atividades comerciais das microalgas e dos bioprodutos remonta à década de 1960 (LEE, 1997). Nesse contexto, é relevante mencionar que o Japão, ainda na década de 1960, foi pioneiro na exploração comercial em larga escala desses microrganismos, conforme apontado por Bhattacharya e Goswami (2020).

As biorrefinarias de microalgas, também referidas como biorrefinarias de terceira geração, são instalações integradas que combinam diversas rotas para a obtenção, extração e conversão da biomassa de microalgas em uma variedade de bioprodutos com alto valor agregado (DE BHOWMICK; SARMAH; SEN, 2019; KHAN et al., 2019; THOMASSEN et al., 2016; YU et al., 2018). Uma biorrefinaria baseada na biomassa de microalgas é geralmente composta por processos a jusante e a montante, que englobam importantes etapas: cultivo; colheita e separação, extração e conversão (SIDDIKI et al., 2022).

4.1.1 Microalgas

Microalgas são microrganismos fotossintetizantes, autotróficos, que utilizam dióxido de carbono (CO₂), luz solar, macro e micronutrientes presentes em água doce (rios, lagoas, efluentes) ou salina (mar) como fonte de nutrientes para produção de energia e conversão em biomassa (MORAIS JUNIOR et al., 2020b). Além disso, desempenham um importante papel ecológico, atuando como produtoras primárias e bioindicadoras da saúde dos ecossistemas. Isso ocorre porque respondem rapidamente a alterações da qualidade da água causadas por fontes antropogênicas (LEMLEY; ADAMS; BATE, 2016).

De acordo com Moreno-García et al., (2021) e Rajesh Banu et al., (2020), as microalgas destacam-se como uma promissora fonte de matéria-prima renovável para biorrefinarias. Esses microrganismos apresentam diversas vantagens quando comparados a matérias-primas tradicionais, como resíduos agrícolas e resíduos florestais. Tais vantagens incluem: I) cultivo em diferentes águas residuais, dispensando o uso de água potável (MARQUES et al., 2020); II) não competem com a produção de alimentos, pois podem ser cultivadas em áreas inférteis; III) realizam a biofixação de CO₂ (YU et al., 2020); IV) rápido crescimento; V) produção ao longo de todo o ano; VI) dispensam o uso de pesticidas e herbicidas (MOHD ISA; LOO; SABARATNAM, 2020).

4.1.2 Biomassa

A biomassa produzida por microalgas apresenta uma composição rica em compostos orgânicos, tais como: lipídios, carboidratos, proteínas e pigmentos, variando em suas concentrações. Esses compostos têm potencial para serem convertidos em uma variedade de bioprodutos, de interesse tanto industrial como comercial (KHAN et al., 2022; MORENO-GARCIA et al., 2017). Diversos fatores, como condições de cultivo, fonte de nutrientes, disponibilidade de nutrientes, espécie escolhida e interações entre fatores físicos, químicos, biológicos e hidrodinâmicos, influenciam diretamente o crescimento das células e a produção e composição da biomassa (OKORO et al., 2019).

4.1.3 Cultivo

O cultivo do microrganismo constitui a primeira e mais importante etapa no processo de produção da biomassa. Assim, ao longo dos anos, diversas tecnologias foram desenvolvidas e aperfeiçoadas com o objetivo de criar condições ideais para o crescimento das células e produção de biomassa (CHEW et al., 2018). A escolha do sistema de cultivo é influenciada principalmente pela espécie de microalga, tipo de meio de cultivo (sintético, águas residuais), menor taxa de contaminação, objetivo do cultivo, características do bioproduto desejado, demanda de energética e, por fim, aspectos externos como área e clima (FABRIS et al., 2020).

Os sistemas tradicionalmente utilizados, tanto em larga escala como em pequena escala, são classificados como sistemas abertos e fechados (BHATIA et al., 2021). O Quadro 1 apresenta, de forma resumida, os principais tipos de sistemas de cultivo, bem como suas vantagens e desvantagens.

Quadro 1 - Principais sistemas de cultivo de microalgas

TANQUES ABERTOS	
<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> ● menor custo de instalação; ● menor custo de manutenção, ● maior escalabilidade; ● maior facilidade de limpeza; ● fácil manutenção. 	<p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> ● sistemas expostos ao ambiente; ● maior risco de contaminação da cultura e do meio de cultivo; ● menor controle de condições de cultivo, ● maior interferência de fatores ambientais (chuva, temperatura); ● ocupam grandes áreas; ● maiores perdas por evaporação; ● demandam grandes quantidades de água; ● baixa produtividade de biomassa.
FOTOBIOREACTORES FECHADOS	
<p>Vantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> ● alta produtividade de biomassa; ● menor contaminação da cultura e do meio de cultivo; ● maior controle das condições de cultivo; ● menor demanda de água e menor perda de água por evaporação; ● maior controle de parâmetros (pH, temperatura, luminosidade). 	<p>Desvantagens</p> <ul style="list-style-type: none"> ● maior custo de instalação; ● maior custo de manutenção; ● maior custo de operação.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

4.1.4 Colheita e extração

A colheita da biomassa representa, aproximadamente, 30% do custo total de produção (BHATIA et al., 2020; BRASIL; SILVA; SIQUEIRA, 2017a). Assim, ao associar métodos de colheita e separação, espera-se o aumento da eficiência do processo e, principalmente, a redução de custos (CAETANO et al., 2020). Os métodos de colheita tradicionalmente empregados incluem: centrifugação, sedimentação, floculação, separação magnética e filtração. Portanto, a escolha do método de colheita deve considerar aspectos como: I) características específicas da espécie; II) condições de cultivo; III) bioproduto final; e IV) demanda de energética (CUEVAS-CASTILLO et al., 2020).

A extração de biocompostos de interesse pode ser realizada tanto com a biomassa úmida como seca. Para o processo de secagem, diversos métodos podem

ser empregados, como liofilização, secagem na estufa, pulverização e secagem ao sol (CHEN; CHANG; LEE, 2015). Os processos de extração consideram, principalmente, a composição bioquímica das células e a aplicação final do componente extraído. Nesse contexto, são apresentadas diversas rotas de extração, como: assistida por micro-ondas, ultrassom (LEE et al., 2010; HARUN et al., 2010), ruptura enzimática (DEMUEZ et al., 2015) e, mais comumente utilizada, a extração com solvente orgânico (NAGHDI et al., 2016).

4.1.5 Conversão

O processo de conversão da biomassa em bioprodutos intermediários e/ou produtos finais, assim como nas etapas anteriores apresentadas, pode ser realizado por meio de diferentes métodos e rotas de conversão (HAGHPANAH; SOBATI; PISHVAEE, 2022; OKEKE et al., 2022). Na exploração biotecnológica em larga escala da biomassa de microalgas, apesar de o avanço tecnológico dos últimos anos terem resultado no desenvolvimento de melhores condições de cultivo, produção e conversão da biomassa, ainda existem desafios a serem superados. Portanto, é necessário consolidar um mecanismo de produção sustentável, ou seja, biorrefinarias tradicionais e integradas, com objetivo de explorar todo o potencial da biomassa, e, assim, tornar mais eficiente a extração de produtos e coprodutos (FABRIS et al., 2020).

5 ANÁLISE DA MATRIZ SWOT

No Quadro 2, é apresentada uma visão geral das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças do cenário de biorrefinarias de microalgas no Brasil, alinhada aos princípios da bioeconomia circular.

Quadro 2 - Matriz de análise SWOT para biorrefinarias de microalgas no Brasil

I N T E R N O	<p style="text-align: center;">FORÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Microalgas têm rápido crescimento; - Alta produtividade de biomassa; - Microalgas podem ser cultivadas em terras não aráveis; - Produção da biomassa não pressiona a demanda alimentícia; - Águas residuais podem ser utilizadas para o cultivo das microalgas; - Potencial de biorremediação: - Biofixação de dióxido de carbono (CO₂); - Ampla gama de bioprodutos de valor agregado. 	<p style="text-align: center;">FRAQUEZAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Riscos de contaminação da cultura de algas por outros microrganismos; - Viabilidade técnica e econômica; - Alto gasto energético para coleta da biomassa; - Maior tempo de retenção hidráulica (para tratamento biológico de águas residuais); - Dependência de importação de equipamentos e insumos. - Aceitação limitada de alguns produtos pelo mercado.
E X T E R N O	<p style="text-align: center;">OPORTUNIDADES</p> <ul style="list-style-type: none"> - Diversidade climática e geográfica brasileira; - Crescente demanda global por cadeias de produção e produtos sustentáveis; - Cumprimento das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS); - Potencial para geração de créditos de carbono; - Transferência de tecnologia e inovação; - Políticas públicas para mitigação de mudanças climáticas - Integração de cadeias de produção; - Empregos e crescimento econômico; - Aplicabilidade em vários tipos de processos industriais. 	<p style="text-align: center;">AMEAÇAS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concorrência com outras matérias-primas: soja, milho, petróleo, cana-de-açúcar; - Ausência de uma Política Nacional de Bioeconomia; - Políticas públicas específicas de incentivo à produção e cultivo de biomassa a partir de cepas nativas; - Modernização de marcos regulatórios; - Aceitação popular; - Insegurança de mercado nacional; - Baixo investimento em PD&I.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

5.1 Fatores internos

O ambiente interno apresenta um cenário favorável, tendo sido indicadas oito variáveis para a categoria Forças e seis para a categoria Fraquezas, que estão distribuídas entre aspectos técnicos, relacionados a custos e a encadeamentos na cadeia produtiva, conforme descrito a seguir:

5.1.1 Forças

Os resultados da análise das forças da biorrefinaria de microalgas demonstram que esses microrganismos emergem como fonte promissora de matéria-prima sustentável, graças ao seu rápido crescimento e alta produtividade de biomassa. Naturalmente, as microalgas têm a capacidade de duplicar a sua biomassa em um curto espaço de tempo favorecendo a produção contínua e em larga escala (GAURAV; NEETI; SINGH, 2024). O fato de poderem ser cultivadas em terras não aráveis representa um diferencial significativo, pois não competem com a produção agrícola e não pressionam a demanda alimentar, reduzindo o conflito de uso da terra, ao contrário de algumas culturas de biocombustíveis.

Além disso, as microalgas podem crescer bem em águas residuais, dispensando o uso de água potável em seu cultivo, a depender do uso final de sua biomassa. A utilização de águas residuais para o cultivo desses microrganismos oferece um benefício adicional da fitorremediação (DUARTE et al., 2021), possibilitando a remoção de nutrientes como o fósforo das águas residuais domésticas além de outros contaminantes em excesso nas águas.

Este benefício já foi evidenciado na literatura científica, como demonstrado no estudo conduzido por (MARQUES et al., 2021), onde a microalga *Nannochloropsis oculata* foi cultivada em laboratório por 21 dias para testar a remoção de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) da água produzida do petróleo do campo petrolífero de Buracica (BA-Brasil), alcançando uma eficiência de remoção de 94% dos HPAs presentes na água. Ñañez et al., (2024) cultivaram a microalga *Chlorella vulgaris* por 15 dias utilizando como meio de cultura uma mistura de água proveniente de um campo petrolífero da Bacia do Recôncavo, (BA-Brasil) e efluente da indústria avícola. A microalga foi capaz de crescer e remover um total de 92% dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos presentes na água.

Além disso, diversos estudos têm demonstrado a capacidade das microalgas de biofixar o CO₂ antropogênico proveniente de várias fontes como: da produção do cimento (DICKINSON et al., 2023), gases de combustão carvão de usinas de energia (CHENG et al., 2019), gases de combustão de caldeiras (KUO et al., 2016), usinas químicas (YE et al., 2022), e transformá-lo em uma biomassa de alto valor agregado. Esse processo tem grande relevância e contribui para a mitigação das emissões de gases do efeito estufa.

5.1.2 Fraquezas

Os resultados revelam que as fraquezas enfrentadas pelas biorrefinarias de microalgas no Brasil podem impactar a sua viabilidade, sustentabilidade e eficiência. Dentre elas está o risco de contaminação da cultura por outros microrganismos, principalmente quando cultivadas em sistemas abertos,

comprometendo a pureza e a qualidade da biomassa produzida. Além disso, a viabilidade técnica e econômica ainda é uma lacuna em debate, exigindo avanços no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e econômicas que possam garantir a competitividade das biorrefinarias no mercado.

Estudos anteriores (RAJESH BANU et al., 2020) que avaliaram a viabilidade econômica da produção de microalgas mostraram que a alta demanda de energia elétrica para a coleta da biomassa limita a sustentabilidade ambiental das biorrefinarias e aumenta os gastos operacionais. Segundo ZHANG et al., (2024) a coleta da biomassa é responsável por cerca de 50%- 80% do custo total de produção.

Um dos principais entraves para o desenvolvimento da cadeia de produção ainda é o alto custo da geração de matéria-prima, agravada pela dependência de importação de equipamentos e insumos como: fotobiorreatores tanto de escala de laboratório como industrial, sistema de monitoramento, bombas para aeração do sistema, cepas, biomassas, acessórios como spargers e sensores. Esta dependência está atrelada à falta de uma cadeia de abastecimento nacional, conforme demonstrado por Andrade, Telles e Leite Castro (2020), em cujo estudo se descobriu que o Brasil carece de um alinhamento da oferta e demanda de microalgas.

5.2 Fatores externos

As oportunidades e ameaças derivam de fatores externos ao contexto em estudo e não estão sob o controle direto da empresa, organização ou operação em análise. Neste contexto foram encontradas dezessete variáveis, sendo dez como Oportunidades e sete como Ameaças, distribuídas entre variáveis ambientais, políticas, econômicas e tecnológicas.

5.2.1 Oportunidades

Dentre as oportunidades, observou-se que o Brasil, por oferecer condições climáticas apropriadas e uma rica biodiversidade, favorece a produção de cepas distintas e a criação de bioprodutos com características específicas para atender a uma grande variedade de usos (BRASIL; SILVA; SIQUEIRA, 2017).

Diante do crescente interesse global por cadeias de produção e produtos sustentáveis, as biorrefinarias de microalgas no Brasil têm uma excelente oportunidade. Ao produzirem bioprodutos de baixo impacto ambiental a biorrefinaria não apenas atende a essa demanda, mas também contribui para alcançar os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) (OLIVEIRA et al., 2022).

As biorrefinarias de microalgas estão alinhadas com o ODS 6 – Água limpa e Saneamento, pois tem potencial para fitorremediar águas residuais (MARQUES et al., 2021; ÑAÑEZ et al., 2024), ODS 7– Energia Limpa e Acessível, pois a partir da biomassa de microalgas biogás e biocombustíveis podem ser gerados (RAMIREZ et al., 2024), ODS8 – Trabalho Crescente e Crescimento econômico por meio da criação de empregos diretos e indiretos nas várias etapas do processo desde o cultivo até venda do produto final (SUTHERLAND et al., 2021), ODS9 – Industria,

Inovação e Infraestrutura ao desenvolver novos processos e tecnologias, e, ODS13– Ação Contra a Mudança Global do Clima uma vez que as microalgas naturalmente capturam o CO₂ (GUO et al., 2019; KASSIM; MENG, 2017; SANAYE MOZAFFARI SABET; GOLZARY, 2022).

A biofixação de CO₂ por microalgas pode gerar créditos de carbono (SCHNEIDER et al., 2024). Nesse contexto, é importante ressaltar que o Brasil está entre os países com uma das maiores emissões de gás metano (CH₄) seguido do CO₂ no mundo (ESTEVA, C., G., PAVÃO, E., ASSAD, E, 2023). Em resposta às pressões da agenda climática mundial, o governo brasileiro tem implementado políticas como o Plano Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC), cujos objetivos são, dentre outros, o de “identificar, planejar e coordenar as ações para mitigar as emissões de gases de efeito estufa geradas no Brasil, bem como àquelas necessárias à adaptação da sociedade aos impactos que ocorram devido à mudança do clima” (PNMC, 2008, p. 26). Adicionalmente, o Brasil também estabeleceu metas para reduzir as emissões de gases do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis por meio da Política Nacional de Biocombustíveis, também conhecida como *RenovaBio* (BRASIL, 2017).

As biorrefinarias mais modernas são impulsionadas pela adoção de tecnologias da Indústria 4.0 e de inovações biotecnológicas, tornando os processos de produção automatizados e competitivos. O desenvolvimento das biorrefinarias não apenas contribui para a geração de renda em regiões estratégicas, mas também para a criação de empregos locais e a diversificação da economia brasileira.

5.2.2 Ameaças

As ameaças externas enfrentadas pelas biorrefinarias de microalgas incluem a concorrência com outras matérias-primas, como soja, milho, cana-de-açúcar e o petróleo, visto que no Brasil essas cadeias de produção tradicionais já estão bem estabelecidas. Estudos anteriores, como o de Colling Klein, Bonomi e Maciel Filho (2018), Klein et al. (2019), Moncada, Tamayo e Cardona (2014) e Sano Coelho et al. (2021) investigaram a integração das biorrefinarias de microalgas a essas cadeias de produção.

Além disso, a necessidade de modernização de marcos regulatórios, a falta de uma Política Nacional de Bioeconomia e de políticas públicas específicas de incentivo à produção e cultivo de biomassas a partir de cepas nativas restringem a capacidade do setor de crescer de forma estratégica (DOS SANTOS et al., 2021).

Outro ponto importante é a necessidade de aceitação popular dos bioprodutos derivados de microalgas, uma vez que são necessárias estratégias de comunicação para promover os benefícios, aplicações e consumo consciente destes produtos. Um exemplo alvissareiro, contudo, é a ampla aceitação, no mercado brasileiro, dos biofertilizantes de microalgas (RIBEIRO et al., 2020), que possuem produção e comercialização amparados pela Instrução Normativa nº 61, de 08 de julho de 2020, que estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura (BRASIL, 2020).

Por fim, uma ameaça crítica é o baixo investimento em Pesquisa Desenvolvimento e Inovação (PD&I), que restringe a criação e implementação de tecnologias e a melhoria de processos de produção. No entanto, ao longo dos anos várias instituições de ensino e pesquisa no Brasil têm se dedicado a estudos sobre a produção de microalgas e bioprodutos. Pesquisadores de instituições renomadas como a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), e de diversas universidades, como a Universidade Federal do Ceará (UFC), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Universidade Federal da Bahia (UFBA), Universidade de Brasília (UNB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal de Viçosa (UFV), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade Federal de São Paulo (USP), Universidade Federal do Paraná (UFPR), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Passo Fundo (UPF) e Universidade Salvador (UNIFACS), tem contribuído para o avanço da biotecnologia de microalgas no país (MATOS, 2021).

5.3 Análise cruzada das variáveis

A análise cruzada das variáveis da matriz SWOT examina as interrelações positivas, negativas e neutralidades entre os fatores internos (forças e fraquezas) e externos (oportunidades e ameaças) de uma empresa, organização ou operação em análise, definindo inter-relações positivas, negativas e neutralizações, conforme se detalha a seguir:

5.3.1 Inter-relações positivas

As inter-relações positivas são identificadas por meio do cruzamento das forças internas das biorrefinarias de microalgas e das oportunidades externas associadas ao contexto brasileiro. Na análise apresentada no Quadro 3, é possível identificar as forças que, quando maximizadas, podem impulsionar significativamente o aproveitamento das oportunidades identificadas pela análise ambiental.

Quadro 3 - Matriz de análise das inter-relações positivas

OPORTUNIDADES	FORÇAS							
	Rápido crescimento	Alta produtividade	Cultivo em terras não aráveis	Não pressiona demanda alimentícia	Cultivo em águas residuais	Potencial de biorremediação	Biofixação de CO ₂	Ampla gama de bioprodutos
Diversidade climática e geográfica brasileira	•	•						•
Crescente demanda global por cadeias de produção e produtos sustentáveis	•	•	•	•	•	•	•	•
Cumprimento das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)			•	•	•	•	•	
Potencial para geração de créditos de carbono	•	•	•	•	•	•	•	•
Políticas para Mitigação das Mudanças Climáticas		•		•	•	•	•	
Potencial para transferência de tecnologia e inovação	•	•	•		•	•	•	•
Integração de cadeias de produção		•	•		•	•	•	•
Empregos e crescimento econômico								•
Aplicabilidade em vários tipos de processos industriais	•	•			•	•	•	•

● - Expressa conexão entre variáveis

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O quadro 3 mostra uma grande inter-relação positiva entre as variáveis internas e externas do modelo de biorrefinarias de microalgas, notadamente no que se refere às características de alta produtividade, da possibilidade de utilização de águas residuais para cultivo, capacidade de biorremediação e de biofixação de CO₂, além da sua utilização em uma ampla gama de bioprodutos.

Esses pontos fortes do modelo reforçam, em especial, a possibilidade de aproveitamento da crescente demanda global por cadeias de produção e produtos sustentáveis, bem como o potencial de geração de créditos de carbono. Naturalmente as microalgas demonstram uma alta produtividade de biomassa e têm a capacidade de capturar e utilizar o CO2 para seu crescimento sem pressionar a demanda alimentícia alinhando-se as metas de descarbonização, redução das emissões para mitigação das mudanças climáticas. Os cultivos de microalgas, onde os nutrientes para o crescimento das cepas podem ser obtidos a partir de águas residuais, com benéfico adicional da fitorremediação, alinham-se com políticas de uso sustentável dos recursos naturais, reutilização de recursos e eficiência energética, além de incentivar a transição para uma bioeconomia circular.

5.3.2 Inter-relações negativas

Por outro lado, as inter-relações negativas são identificadas por meio do cruzamento das fraquezas internas do modelo de biorrefinarias de microalgas e das ameaças externas associadas ao contexto brasileiro. A análise realizada no Quadro 4 permitiu evidenciar as ameaças que podem ampliar as dificuldades enfrentadas pelo modelo.

Quadro 4 - Matriz de análise das inter-relações negativas

AMEAÇAS	FRAQUEZAS					
	Riscos de contaminação	Viabilidade Técnica e Econômica	Alto gasto energético	Maior tempo de retenção hidráulica	Dependência de importações	Aceitação limitada pelo mercado
Concorrência com outras matérias-primas	•	•	•		•	•
Ausência de uma Política Nacional de Bioeconomia	•	•	•		•	•
Políticas públicas específicas de incentivo à produção e cultivo de biomassa a partir de cepas nativas		•	•			
Modernização de marcos regulatórios	•	•				
Aceitação popular						•
Insegurança de mercado nacional	•	•				
Baixo investimento em PD&I.	•	•	•	•	•	•

● - Expressa conexão entre variáveis

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O baixo investimento em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) representa uma ameaça significativa para as biorrefinarias de microalgas. A redução dos investimentos, juntamente com a concentração das pesquisas de microalgas em algumas regiões do país e a falta de investimentos adequados, limita o desenvolvimento de tecnologia e podem comprometer a otimização de processos, o desenvolvimento de produtos e equipamentos. Além disso, a reduzida parceria entre indústrias brasileiras e instituições de pesquisa também contribui para maximização desta ameaça, conseqüentemente a viabilidade técnica e econômica das biorrefinarias de microalgas no Brasil é colocada em risco.

Outra ameaça que merece atenção é concorrência com outras matérias-primas. Fraquezas como: o risco de contaminação do cultivo, o alto gasto energético para o cultivo e separação da biomassa, bem como a dependência de importação e aceitação limitada pelo mercado são fatores que, quando não mitigados, podem maximizar a concorrência com outras matérias-primas. Cabe ressaltar que o Brasil possui biorrefinarias de outras matérias-primas renováveis com cadeias de produção bem estabelecidas e produtos consolidados no mercado. A concorrência com essas biorrefinarias pode representar um desafio adicional para o desenvolvimento e consolidação das biorrefinarias de microalgas, especialmente se os produtos derivados de microalgas forem mais caros e não houver um mercado para absorvê-los.

Por fim, a ausência de uma Política Nacional de Bioeconomia é uma ameaça para o crescimento e expansão do setor de microalgas, bem como para a competitividade das biorrefinarias. A falta de incentivos regulatórios e diretrizes bem estabelecidas dificulta o desenvolvimento do setor, levando a obstáculos como: baixa obtenção de investimento e financiamento, ausência de regulamentação sanitária e ambiental, a dificuldade de padronizar processos e produtos, bem como barreiras legais para uso de microalgas em outras cadeias de produção e para a entrada de produtos no mercado, baixo apoio do governamental para pesquisa e desenvolvimento.

5.3.3 Neutralizações

As neutralizações pretendem identificar como as fraquezas internas das biorrefinarias de microalgas podem ser mitigadas ou minimizadas por oportunidades externas do contexto brasileiro, e como as ameaças externas do cenário brasileiro podem ser neutralizadas por forças internas das biorrefinarias. Por meio da análise cruzada apresentada no Quadro 6, foi possível determinar as interações entre forças e ameaças, bem como identificar estratégias para reduzir os impactos negativos das ameaças.

Observa-se que o baixo investimento em PD&I é uma ameaça significativa, no entanto essa ameaça pode ser neutralizada por todas as forças das biorrefinarias apresentadas no Quadro 6. O rápido crescimento das células e alta produtividade de biomassas podem atrair pesquisas e investimentos voltados para o desenvolvimento de sistemas de cultivos cada vez mais eficientes, visando à economia de recursos como água e energia, a captura e utilização do CO₂, o desenvolvimento de sistemas de controle e monitoramento dos cultivos, bem como a otimização dos cultivos e da produção de biomassas, a fabricação nacional de fotobiorreatores, estudos de mercado para os bioprodutos, estudos acerca da

cadeia brasileira de produção de microalgas. Estes são apenas alguns dos exemplos do potencial das forças deste setor.

A concorrência com outras matérias-primas pode ser enfrentada por meio de diversas forças das biorrefinarias de microalgas, o rápido crescimento gerando uma alta quantidade de biomassa em um curto período de tempo em comparação com outras matérias-primas podem aumentar a competitividade dos produtos de microalgas no mercado, assim como a ampla gama de bioprodutos que possibilita diversificação da oferta e a criação de nichos de produtos diminuindo a concorrência direta. Outra força competitiva para a mitigar a concorrência é o cultivo em terras não destinadas à agricultura, o que proporciona as biorrefinarias uma variedade de áreas para instalação.

Quadro 6 - Matriz de análise das neutralizações entre forças internas e ameaças externas

AMEAÇAS	FORÇAS							
	Rápido crescimento	Alta produtividade	Cultivo em terras não aráveis	Não pression a demanda alimentícia	Cultivo em águas residuais	Potencial de fitorremediação	Biofixação de CO ₂	Ampla gama de bioprodutos
Concorrência com outras matérias-primas	•	•	•					•
Falta de uma Política Nacional de Bioeconomia						•	•	
Políticas públicas específicas de incentivo à produção e cultivo de biomassa a partir de cepas nativas;		•	•			•	•	
Modernização de marcos regulatórios;		•			•	•	•	
Aceitação popular								•
Insegurança de mercado nacional		•					•	•
Baixo investimento em PD&I.	•	•	•	•	•	•	•	•

● - Expressa conexão entre variáveis

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Uma ameaça que também requer atenção no setor de microalgas no Brasil é a ausência de Políticas públicas específicas de incentivo à produção e cultivo de biomassa a partir de cepas nativas, juntamente com a ausência de uma Política nacional de bioeconomia e a necessidade da modernização de marcos regulatórios. Na busca por minimizar os impactos negativos dessas ameaças é fundamental demonstrar o papel das microalgas na biofixação das emissões antropogênicas de CO₂ e nos cumprimentos das metas climáticas, além disso o potencial de fitorremediar águas residuais, do uso de áreas inférteis para instalação das biorrefinarias e a alta produtividade de biomassa, bem como a conversão em uma variedade de produtos com valor agregado. Essas forças destacam-se como estratégias para obter apoio político e incentivos para o avanço do setor, além de contribuir para a redução da insegurança de mercado nacional.

Ao analisar os cruzamentos apresentados no Quadro 7, foi possível determinar as interações entre fraquezas internas e oportunidades externas, bem como identificar como as fraquezas podem ser mitigadas por meio das oportunidades do cenário brasileiro.

Diversas oportunidades externas podem ser aproveitadas para mitigar as fraquezas internas das biorrefinarias de microalgas no Brasil, o risco de contaminação pode ser mitigado pelo potencial para transferência de tecnologia e inovação, através da implementação de tecnologias avançadas de controle e monitoramento da qualidade dos cultivos e da biomassa produzida. Além disso a viabilidade técnica e econômica, que está intimamente ligada ao desenvolvimento de tecnologia e a inovação, também pode ser mitigada por essa oportunidade juntamente com a integração de cadeias de produção e aplicabilidade em vários tipos de processos industriais sob a perspectiva do uso sustentável de recursos naturais e da circularidade de resíduos.

Quadro 7 - Matriz de análise das neutralizações entre fraquezas internas e oportunidades externas

OPORTUNIDADES	FRAQUEZAS					
	Riscos de contaminação	Viabilidade Técnica e Econômica	Alto gasto energético	Maior tempo de retenção hidráulica	Dependência de importações	Aceitação limitada pelo mercado
Diversidade climática e geográfica brasileira					•	
Crescente demanda global por cadeias de produção e produtos sustentáveis		•			•	
Cumprimento das metas dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)						
Potencial para geração de créditos de carbono						•
Políticas para Mitigação das Mudanças Climáticas						•
Potencial para transferência de tecnologia e inovação	•	•	•		•	
Integração de cadeias de produção		•	•		•	
Empregos e crescimento econômico						
Aplicabilidade em vários tipos de processos industriais		•				

● - Expressa conexão entre variáveis.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O alto gasto energético para o cultivo das cepas e processamento da biomassa pode ser reduzido por meio da integração com outras cadeias de produção, melhorando assim a eficiência energética. Adicionalmente, o potencial de transferência de tecnologia e inovação pode ser explorado para desenvolver processos de cultivo e processamento da biomassa mais eficientes em termos de uso de energia.

A dependência de importações de cepas e de biomassas pode ser neutralizada pela diversidade climática e geográfica brasileira. Adicionalmente, a dependência da importação de fotobiorreatores e outros componentes pode ser reduzida pelo desenvolvimento de tecnologia local, por meio transferência de tecnologia e inovação.

Por fim, a aceitação limitada pelo mercado pode ser neutralizada por meio de políticas para mitigação das mudanças climáticas que incentivem a exploração da biotecnologia de microalgas no Brasil. É evidente que um respaldo legal traz segurança para trair investidores e fomentar o desenvolvimento do setor. Tais políticas devem fornecer métricas claras para mensurar os impactos ambientais, sociais e econômicos, tanto positivos e quanto negativos, de todo o processo de cultivo, produção de biomassa e dos bioprodutos, incluindo métricas de quantificação da biofixação do CO₂, de tal modo que a geração de créditos de carbono possa ser explorada no mercado de carbono nacional e internacional.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar o panorama atual de biorrefinarias no Brasil, com foco no potencial uso de biomassa de microalgas. Apesar de o Brasil ser reconhecido como um mercado promissor para biomassa de microalgas e deter uma infraestrutura consolidada de biorrefinarias de cana-de-açúcar e lignocelulósicas, existem lacunas entre os estudos científicos e as aplicações industriais das biomassas de microalgas a serem superados. Até o momento, a literatura científica ainda não apresenta estudos que investiguem o estado atual das biorrefinarias de microalgas no Brasil, considerando impactos ambientais e regulatórios, sob a perspectiva da bioeconomia circular.

Os resultados obtidos indicam que, sob a perspectiva de uma bioeconomia circular, o modelo de biorrefinaria de microalgas alinha-se aos princípios da bioeconomia circular ao promover a utilização eficiente dos insumos biológicos, a redução de resíduos e a reciclagem de subprodutos. Embora a produção em escala industrial da biomassa e bioprodutos de microalgas, assim como as plantas de biorrefinarias, esteja em constante evolução, o Brasil enfrenta desafios significativos, como a viabilidade técnica e econômica, insegurança do mercado nacional devido à falta de uma cadeia de produção robusta e a dependência de importação de equipamentos e insumos, que podem comprometer a eficiência e competitividade deste setor.

Destaca-se, adicionalmente, a urgência não apenas uma Política Nacional de Bioeconomia, dada a dispersão de políticas públicas no Brasil, mas também da implementação políticas específicas de incentivo ao cultivo e produção biomassa e bioprodutos de microalgas no Brasil. Essa abordagem poderia reduzir significativamente a dependência de importação de cepas, especialmente de biomassas de baixa qualidade e de equipamentos essenciais, como os fotobiorreatores.

Por outro lado, algumas oportunidades únicas, como a rica diversidade climática e geográfica, a crescente demanda de global por produtos eco-friendly alinhada aos objetivos do Plano Nacional de Mudanças Climáticas (PNMC) e dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) em particular aos ODS 6, ODS 7, ODS 8, ODS 9 e ODS 13, juntamente com a transferência de tecnologia e incentivos

como créditos de carbono, podem impulsionar a bioeconomia circular no país e posicionar o Brasil como líder de processos e bioprodutos sustentáveis.

Ainda, os resultados da análise cruzada das interrelações positivas, negativas e neutralidades entre os fatores internos (forças e fraquezas) da biorrefinaria de microalgas e externos (oportunidades e ameaças) no contexto brasileiro proporcionaram uma compreensão mais profunda sobre as forças e fraquezas que influenciam as biorrefinarias de microalgas e como elas podem maximizar ou prejudicar as oportunidades externas. Também foi possível identificar as ameaças externas que podem impactar negativamente as biorrefinarias de microalgas como o baixo investimento em PD&I, ausência de uma Política nacional de bioeconomia, marcos regulatórios que precisam ser modernizados e a concorrência com outras matérias-primas.

Portanto, este estudo fornece um panorama do atual e potencial do cenário de biorrefinarias de microalgas no Brasil.

7 AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pela concessão da bolsa e a Universidade Salvador - UNIFACS pelo apoio técnico.

Circular Bioeconomy and biorefinery: concepts, opportunities and challenges considering the use of microalgae biomass in Brazil

ABSTRACT

Recent emphasis has been placed on the biomass of microalgae of various species as a source of renewable raw material to generate bioenergy and bioproducts with high industrial and commercial value. Although Brazil is recognized as a promising market for microalgae biomass and has a consolidated infrastructure of sugarcane and lignocellulosic biorefineries, some challenges must be overcome for its production at scale. This article aims to investigate Brazil's current landscape of biorefineries, focusing on the potential use of microalgae biomass. A literature review, documentary research, and a SWOT analysis were used. The results show that, despite its high biomass productivity and extraordinary capacity to biofix CO₂, limitations related to high costs and low availability of raw materials and equipment compromise the viability of its production process. However, the identified opportunities appear as alternatives to overcome the challenges associated with the threats. This study offers insights to guide future actions toward the development of this sector in Brazil and, at the same time, deepens the understanding of the potential of biorefineries and microalgae from the perspective of the circular bioeconomy.

KEYWORDS: Biotechnology, Microalgae biomass, Third-generation biorefinery, green economy, SWOT analysis.

REFERÊNCIAS

ABU-GHOSH, S. et al. Unconventional high-value products from microalgae: A review. *Bioresource Technology*, v. 329, n. January, p. 124895, 2021.

ANDRADE, D. S.; TELLES, T. S.; LEITE CASTRO, G. H. The Brazilian microalgae production chain and alternatives for its consolidation. *Journal of Cleaner Production*, v. 250, p. 119526, mar. 2020.

BENYUS, J. M. *Biomimética: inovação inspirada pela natureza*. São Paulo: Editora Cultrix, 2003.

BHATIA, L. et al. Third-generation biorefineries: a sustainable platform for food, clean energy, and nutraceuticals production. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2020.

BHATIA, S. K. et al. Wastewater based microalgal biorefinery for bioenergy production: Progress and challenges. *Science of the Total Environment*, v. 751, p. 141599, 2021.

BHATTACHARYA, M.; GOSWAMI, S. Microalgae – A green multi-product biorefinery for future industrial prospects. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, v. 25, n. March, 2020.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 121, de 18 de junho de 2019. Institui o programa: Bioeconomia Brasil- Sociobiodiversidade. *Diário Oficial da União: sessão 1, Brasília, 19 jun. 2019*. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-121-de-18-de-junho-de-2019-164325642>>.

BRASIL, B. S. A. F.; SILVA, F. C. P.; SIQUEIRA, F. G. Microalgae biorefineries: The Brazilian scenario in perspective. *New Biotechnology*, v. 39, p. 90–98, out, 2017.

BRAUNGART, M.; MCDONOUGH, W. *Cradle to Cradle: criar e reciclar ilimitadamente*. 1. Ed. São Paulo: Editora Gustavo Gili, 2014.

BUGGE, M. M.; HANSEN, T.; KLITKOU, A. What is the bioeconomy? A review of the literature. *Sustainability (Switzerland)*, v. 8, n. 7, 2016.

CAETANO, N. S. et al. Flocculation of *Arthrospira maxima* for improved harvesting. *Energy Reports*, v. 6, p. 423–428, 2020.

CALICIOGLU, Ö.; BOGDANSKI, A. Linking the bioeconomy to the 2030 sustainable development agenda: Can SDG indicators be used to monitor progress towards a sustainable bioeconomy? *New Biotechnology*, v. 61, p. 40–49, mar. 2021.

CASTRO, J. DE S. et al. Microalgae based biofertilizer: A life cycle approach. *Science of The Total Environment*, v. 724, p. 138138, 2020.

CGEE. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Panorama da Bioeconomia no Brasil e Identificação das Áreas Estratégicas. Relatório Final. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2017. Disponível em:
<https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/2665_Panorama+da+Bioeconomia+no+Brasil+e+Identifica%C3%A7%C3%A3o+das+areas+estrategicas.pdf/e5bb2-2aa8-48dc-8002-be57cf1b688f?version=1.0>

CHEN, C. L.; CHANG, J. S.; LEE, D. J. Dewatering and Drying Methods for Microalgae. *Drying Technology*, v. 33, n. 4, p. 443–454, 2015.

CHENG, J. et al. Modification and improvement of microalgae strains for strengthening CO₂ fixation from coal-fired flue gas in power plants. *Bioresource Technology*, v. 291, p. 121850, nov. 2019.

CHEW, K. W. et al. Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v. 91, p. 332–344, 2018.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Bioeconomia: oportunidades, obstáculos e agenda. v. 35. Brasília: CNI, 2014. Disponível em:
<https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/d6/dd/d6ddea79-f42c-4b79-a286-5648d6d2ca79/v35_bioeconomia_oportunidades_obstaculos_e_agenda_web.pdf>

COLLING KLEIN, B.; BONOMI, A.; MACIEL FILHO, R. Integration of microalgae production with industrial biofuel facilities: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 1376–1392, fev. 2018.

COMISSÃO EUROPEIA. Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. Brussels, 2012.

CUEVAS-CASTILLO, G. A. et al. Advances on the processing of microalgal biomass for energy-driven biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 125, p. 109606, 2020.

D'AMATO, D.; VEIJONAHU, S.; TOPPINEN, A. Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. *Forest Policy and Economics*, v. 110, n. December 2018, p. 101848, 2020.

DE BHOWMICK, G.; SARMAH, A. K.; SEN, R. Performance evaluation of an outdoor algal biorefinery for sustainable production of biomass, lipid and lutein valorizing flue-gas carbon dioxide and wastewater cocktail. *Bioresource Technology*, v. 283, n. January, p. 198–206, 2019.

DE CARVALHO, J. C. et al. Biorefinery integration of microalgae production into cassava processing industry: Potential and perspectives. *Bioresource Technology*, v. 247, p. 1165–1172, jan. 2018.

DICKINSON, K. E. et al. Photosynthetic conversion of carbon dioxide from cement production to microalgae biomass. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 107, n. 23, p. 7375–7390, 21 dez. 2023.

DOS SANTOS, M. G. B. et al. Microalgae Biomass Production for Biofuels in Brazilian Scenario: A Critical Review. *BioEnergy Research*, v. 14, n. 1, p. 23–42, 15 mar. 2021.

DUARTE, I. F. et al. Mecanismos de remediação dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos do petróleo utilizando microalgas e cianobactérias com vistas a bioeconomia circular. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 11, p. e512101119954, 7 set. 2021.

ELLEN MACARTHUR, F. Rumo À Economia Circular: o racional de negócio para acelerar a transição. Ellen MacArthur Foundation, 2015. Disponível em: < https://archive.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf>.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/documents/10180/9543845/Vis%C3%A3o+2030+-+o+futuro+da+agricultura+brasileira/2a9a0f27-0ead-991a-8cbf-af8e89d62829?version=1.1>>.

FABRIS, M. et al. Emerging Technologies in Algal Biotechnology: Toward the Establishment of a Sustainable, Algae-Based Bioeconomy. *Frontiers in Plant Science*, v. 11, n. March, p. 1–22, 2020.

FERRAZ, D.; PYKA, A. Circular economy, bioeconomy, and sustainable development goals: a systematic literature review. *Environmental Science and Pollution Research*, 13 set. 2023.

FIGGE, F.; THORPE, A. S.; GUTBERLET, M. Definitions of the circular economy: Circularity matters. *Ecological Economics*, v. 208, p. 107823, jun. 2023.

GAO, F. et al. Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal. *Ecological Engineering*, v. 92, p. 55–61, 2016.

GAURAV, K.; NEETI, K.; SINGH, R. Microalgae-based biodiesel production and its challenges and future opportunities: A review. *Green Technologies and Sustainability*, v. 2, n. 1, p. 100060, jan. 2024.

GUO, C.-L. et al. Enhanced CO₂ biofixation and protein production by microalgae biofilm attached on modified surface of nickel foam. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 42, n. 4, p. 521–528, 6 abr. 2019.

HARVARD BUSINESS REVIEW. Bioeconomia: uma agenda para o Brasil. Brasília: CNI, 2013. Disponível em: <
https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/78/86/7886aeb1-57a8-4be2-9ad9-f8f31b176a8f/bioeconomia_uma_agenda_para_brasil.pdf>

HAWKEN, P.; LOVINS, A.; LOVINS, H. *Capitalismo natural: criando a próxima revolução industrial*. São Paulo: Pensamento-Cultrix, 2000.

HETEMÄKI, L. et al. Leading the way to a European circular bioeconomy strategy. *European Forest Institute: Joensuu, Finland*, v 5, p.52, 2017.

KASSIM, M. A.; MENG, T. K. Carbon dioxide (CO₂) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. *Science of The Total Environment*, v. 584–585, p. 1121–1129, abr. 2017.

KEEN, M. R.; SCHWARZ, A.-M.; WINI-SIMEON, L. Towards defining the Blue Economy: Practical lessons from Pacific Ocean governance. *Marine Policy*, v. 88, p. 333–341, fev. 2018.

KHAN, S. A. et al. Microalgae based biofertilizers: A biorefinery approach to phycoremediate wastewater and harvest biodiesel and manure. *Journal of Cleaner Production*, v. 211, p. 1412–1419, 2019.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 127, n. September, p. 221–232, 2017.

KLEIN, B. C. et al. Low carbon biofuels and the New Brazilian National Biofuel Policy (RenovaBio): A case study for sugarcane mills and integrated sugarcane-microalgae biorefineries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 115, p. 109365, nov. 2019.

KUO, C.-M. et al. Simultaneous microalgal biomass production and CO₂ fixation by cultivating *Chlorella* sp. GD with aquaculture wastewater and boiler flue gas. *Bioresource Technology*, v. 221, p. 241–250, dez. 2016.

LEE, Y. K. Commercial production of microalgae in the Asia-Pacific rim. *Journal of Applied Phycology*, v. 9, n. 5, p. 403–411, 1997.

LEMLEY, D. A.; ADAMS, J. B.; BATE, G. C. A review of microalgae as indicators in South African estuaries. *South African Journal of Botany*, v. 107, p. 12–20, 2016.

MARQUES, I. M. et al. A photobioreactor using *Nannochloropsis oculata* marine microalgae for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and sorption of metals in produced water. *Chemosphere*, v. 281, p. 130775, out. 2021.

MARQUES, I. M. et al. Bioremediation of urban river wastewater using *Chlorella vulgaris* microalgae to generate biomass with potential for biodiesel production. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 7, p. e823974882, 2020.

MATOS, Â. P. Advances in Microalgal Research in Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 64, 2021.

MINTZBERG, H.; AHLSTRAND, B.; LAMPEL, J. *Safári de Estratégia*. Porto Alegre: Artmed, 2000.

MCTIC; CGEE. Plano de Ação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Bioeconomia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2018. Disponível em: <https://repositorio.mctic.gov.br/bitstream/mctic/4355/1/2018_plano_acao_ciencia_tecnologia_inovacao_bioeconomia.pdf>.

MOHD ISA, N. F.; LOO, P.-L.; SABARATNAM, V. Waste-grown heterotrophic microorganisms improve the production of *Apocyclops dengizicus*. *Aquaculture*, v. 528, p. 735566, 2020.

MONCADA, J.; TAMAYO, J. A.; CARDONA, C. A. Integrating first, second, and third generation biorefineries: Incorporating microalgae into the sugarcane biorefinery. *Chemical Engineering Science*, v. 118, p. 126–140, out. 2014.

MORAIS JUNIOR, W. G. et al. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. *Aquaculture*, v. 528, p. 735562, 2020a.

MORENO-GARCÍA, A. F. et al. Sustainable biorefinery associated with wastewater treatment of Cr (III) using a native microalgae consortium. *Fuel*, v. 290, n. August 2020, 2021.

MORENO-GARCIA, L. et al. Microalgae biomass production for a biorefinery system: Recent advances and the way towards sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 76, n. March, p. 493–506, 2017.

MORIGUCHI, Y. Material flow indicators to measure progress toward a sound material-cycle society. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 9, n. 2, p. 112–120, 2007.

MOUGENOT, B.; DOUSSOULIN, J. P. Conceptual evolution of the bioeconomy: a bibliometric analysis. *Environment, Development and Sustainability*, n. 0123456789, 2021.

MURRAY, A.; SKENE, K.; HAYNES, K. The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, v. 140, n. 3, p. 369–380, 22 fev. 2017.

NAGARAJAN, D. et al. Resource recovery from wastewaters using microalgae-based approaches: A circular bioeconomy perspective. *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122817, 2020.

NAKAGAWA, M. Ferramenta: Análise SWOT. *Sebrae*, p. 3, 2011. Disponível em: < https://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/Anexos/ME_Analise-Swot.PDF>.

ÑAÑEZ, K. B. et al. Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from produced water using the microalgae *Chlorella vulgaris* cultivated in mixotrophic and heterotrophic conditions. *Chemosphere*, v. 356, p. 141931, maio 2024.

OECD. ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT. The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda. 1. Ed. Paris: OECD Publish, 2009. Disponível em: < <https://www.oecd.org/sti/emerging-tech/34823102.pdf>>.

OKORO, V. et al. Microalgae cultivation and harvesting: Growth performance and use of flocculants - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 115, p. 109364, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109364>

OLIVEIRA, A. C. V.; SILVA, A. DE S.; MOREIRA, Í. T. A. Economia Circular: Conceitos E Contribuições Na Gestão De Resíduos Urbanos. *RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico*, v. 3, n. 44, p. 273–289, 2019.

OLIVEIRA, C. Y. B. et al. An overview on microalgae as renewable resources for meeting sustainable development goals. *Journal of Environmental Management*, v. 320, p. 115897, out. 2022.

PEREIRA, G. Bioeconomia e a Indústria brasileira. Brasília: CNI, 2020. Disponível em: <
https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/cd/ed/cded4159-a4c5-474d-9182-dd901b317e1c/bioeconomia_e_a_industria_brasileira.pdf>.

PHADERMROD, B.; CROWDER, R. M.; WILLS, G. B. Importance-Performance Analysis based SWOT analysis. *International Journal of Information Management*, v. 44, p. 194–203, 2019.

QUINTELLA, C. M.; HANNA, S. A.; SANTOS, S. C. DOS. Brazil's biotechnology assessment of potential to achieve sustainable development goals, benchmarking against the USA. *World Patent Information*, v. 77, p. 102275, jun. 2024.

RAJESH BANU, J. et al. Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. *Fuel*, v. 302, n. March, p. 121086, 2021.

RAJESH BANU, J. et al. Microalgae based biorefinery promoting circular bioeconomy-techno economic and life-cycle analysis. *Bioresource Technology*, v. 302, p. 122822, abr. 2020.

REBOLLEDO-LEIVA, R.; MOREIRA, M. T.; GONZÁLEZ-GARCÍA, S. Progress of social assessment in the framework of bioeconomy under a life cycle perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 175, p. 113162, 1 abr. 2023.

REIKE, D.; VERMEULEN, W. J. V.; WITJES, S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 135, p. 246–264, 2018.

RIBEIRO, D. M. et al. A low-cost approach for *Chlorella sorokiniana* production through combined use of urea, ammonia and nitrate-based fertilizers. *Bioresource Technology Reports*, v. 9, p. 100354, fev. 2020.

SANAYE MOZAFFARI SABET, N.; GOLZARY, A. CO₂ biofixation at microalgae photobioreactors: hydrodynamics and mass transfer study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 19, n. 11, p. 11631–11648, 14 nov. 2022.

SANO COELHO, R. et al. Techno-economic assessment of heterotrophic microalgae biodiesel production integrated with a sugarcane bio-refinery. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 15, n. 2, p. 416–429, 30 mar. 2021.

SATYA, A. D. M. et al. Progress on microalgae cultivation in wastewater for bioremediation and circular bioeconomy. *Environmental Research*, v. 218, p. 114948, fev. 2023.

SCHNEIDER, A. T. et al. Microalgae and Its Potential to Generate Carbon Credits. Em: *Algae Mediated Bioremediation*. [s.l.] Wiley, 2024. p. 539–547.

SIDDIKI, SK. Y. A. et al. Microalgae biomass as a sustainable source for biofuel, biochemical and biobased value-added products: An integrated biorefinery concept. *Fuel*, v. 307, n. September 2021, p. 121782, 2022.

STEGMANN, P.; LONDO, M.; JUNGINGER, M. The circular bioeconomy: Its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation & Recycling: X*, v. 6, p. 100029, 2020.

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.

SYDNEY, E. B. et al. Microalgal biorefineries: Integrated use of liquid and gaseous effluents from bioethanol industry for efficient biomass production. *Bioresource Technology*, v. 292, p. 121955, nov. 2019.

TALAN, A. et al. Biorefinery strategies for microbial bioplastics production: Sustainable pathway towards Circular Bioeconomy. *Bioresource Technology Reports*, v. 17, n. November 2021, p. 100875, 2022.

TAN, E. C. D.; LAMERS, P. Circular Bioeconomy Concepts—A Perspective. *Frontiers in Sustainability*, v. 2, n. July, p. 1–8, 2021.

THOMASSEN, G. et al. A techno-economic assessment of an algal-based biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 18, n. 6, p. 1849–1862, 2016.

VANDENBERGHE, L. P. S. et al. Beyond sugar and ethanol: The future of sugarcane biorefineries in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 167, p. 112721, out. 2022.

VELAZQUEZ-LUCIO, J. et al. Microalgal biomass pretreatment for bioethanol production: A review. *Biofuel Research Journal*, v. 5, n. 1, p. 780–791, 2018.

YAASHIKAA, P. R.; SENTHIL KUMAR, P.; VARJANI, S. Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, v. 343, n. August 2021, p. 126126, 2022.

YE, Q. et al. Life-cycle assessment of flue gas CO₂ fixation from coal-fired power plant and coal chemical plant by microalgae. *Science of The Total Environment*, v. 848, p. 157728, nov. 2022.

YU, K. L. et al. Biochar production from microalgae cultivation through pyrolysis as a sustainable carbon sequestration and biorefinery approach. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 20, n. 9, p. 2047–2055, 2018.

YU, Q. et al. Enhanced biomass and CO₂ sequestration of *Chlorella vulgaris* using a new mixotrophic cultivation method. *Process Biochemistry*, v. 90, p. 168–176, 2020.

ZHANG, H. et al. multi-objective optimization of a novel microalgae harvesting method based on buoy-bead flotation and feasibility analysis by life cycle assessment. *Separation and Purification Technology*, v. 329, p. 125143, jan. 2024.

Recebido: 03 nov. 2024.

Aprovado: 17 dez. 2024.

DOI: 10.3895/rbpd.v14n1.17566

Como citar: OLIVEIRA, A. C. V.; SILVA, A. S. S.; SPINOLA, C. A.; MOREIRA, I. T. A. Bioeconomia Circular e biorrefinaria: conceitos, oportunidades e desafios considerando o uso de biomassa de microalgas no Brasil. *R. Bras. Planej. Desenv.* Curitiba, v. 14, n. 01, p. 236-268, jan./abr. 2025. Disponível em: <<https://periodicos.utpr.edu.br/rbpd>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Adna Caroline Vale Oliveira
Av. Milton Santos, s/nº - Ondina, Salvador - BA

Direito autorial: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

