



Biorrefinarias Baseadas em Algas: Potencial Sustentável para Produção de Biocombustíveis e Bioprodutos

Algae-Based Biorefineries: Sustainable Potential for the Production of Biofuels and Bioproducts

Ivandro Jorge Cândido Vianna

Eduardo Falabella de Souza Aguiar

Eliana Mosse Alhadef

Resumo: O presente trabalho investiga o potencial das biorrefinarias baseadas em algas como alternativa sustentável para a produção de biocombustíveis e bioprodutos, no contexto da transição energética e da mitigação das mudanças climáticas. A pesquisa destaca as vantagens das microalgas frente às matérias-primas tradicionais, como alta produtividade, não competição por terra arável e capacidade de captura de CO₂. O estudo aborda os principais tipos de biorrefinarias, rotas de conversão da biomassa algal e os desafios tecnológicos e econômicos enfrentados pelo setor. Além disso, analisa o papel estratégico do profissional de Tecnologia de Processos Sustentáveis na viabilização e operação desses sistemas complexos. A metodologia empregada consistiu em revisão bibliográfica sistemática, com foco em publicações dos últimos cinco anos.

Palavras-chave: biorrefinaria; microalgas; biocombustíveis de terceira geração; sustentabilidade; química verde; bioeconomia; CO₂; tecnologia de processos sustentáveis.

Abstract: This study investigates the potential of algae-based biorefineries as a sustainable alternative for the production of biofuels and bioproducts, within the context of energy transition and climate change mitigation. The research highlights the advantages of microalgae over traditional feedstocks, such as high productivity, non-competition for arable land, and CO₂ capture capacity. The study explores the main types of biorefineries, biomass conversion pathways, and the technological and economic challenges faced by the sector. Furthermore, it analyzes the strategic role of professionals in Sustainable Process Technology in enabling and operating these complex systems. The methodology employed consisted of a systematic literature review, focusing on publications from the past five years.

Keywords: biorefinery; microalgae; third-generation biofuels; sustainability; green chemistry; bioeconomy; CO₂; sustainable process technology.

INTRODUÇÃO

Contextualização e Problema

O século XXI herdou um paradoxo energético: a sociedade global depende intrinsecamente de combustíveis fósseis para seu desenvolvimento, mas a queima desses recursos está intrinsecamente ligada a uma crise climática de proporções sem precedentes. A concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera,

que ultrapassou 420 ppm, é um testemunho direto desse impacto, resultando em eventos climáticos extremos, acidificação dos oceanos e perda de biodiversidade. Neste cenário, a busca por fontes de energia renováveis, sustentáveis e de baixo carbono deixou de ser uma alternativa e tornou-se uma necessidade urgente para a sobrevivência e equilíbrio do planeta (Cherubini, 2010).

As biorrefinarias emergem neste contexto não como uma mera substituição tecnológica, mas como uma reconfiguração fundamental do paradigma industrial. Inspiradas no conceito das refinarias de petróleo, que maximizam o valor extraído de um barril de petróleo bruto, as biorrefinarias visam fazer o mesmo com a biomassa. No entanto, sua premissa é radicalmente diferente: utilizar recursos renováveis, fechando ciclos de carbono e minimizando impactos ambientais. Elas representam a materialização prática dos conceitos de Química Verde, Economia Circular e Bioeconomia (Anastas e Warner, 1998).

Dentre as diversas biomassas disponíveis, as algas, particularmente as microalgas, destacam-se como uma das matérias-primas mais promissoras para o século XXI. Diferentemente das culturas terrestres de primeira geração (como cana-de-açúcar e milho), as algas não competem por terra arável, podem ser cultivadas em águas salobras ou residuais, e possuem uma taxa de crescimento exponencialmente maior, com algumas espécies dobrando sua biomassa em questão de horas. Além disso, são eficientes máquinas naturais de captura de CO₂, transformando um poluente em biomassa valiosa.

Este trabalho se concentra neste “nexus” promissor: a integração de algas no conceito de biorrefinaria. O problema de pesquisa que norteia esta investigação é: “Qual é o papel desempenhado pelos profissionais atuantes na Tecnologia de Processos Sustentáveis em relação aos processos desenvolvidos nas biorrefinarias?”. Esta questão surge da percepção de que a operação e otimização desses sistemas complexos demandam um novo perfil profissional, com competências que vão desde a biologia molecular até a engenharia de processos e a análise de ciclo de vida.

Estrutura do Trabalho

Para abordar esta problemática, o trabalho está estruturado em sete tópicos. Após esta introdução, o tópico seguinte delineia os objetivos geral e específicos. O tópico subsequente apresenta uma extensa revisão bibliográfica, que serve como alicerce teórico, cobrindo desde os conceitos fundamentais de biorrefinarias e Química Verde até uma análise detalhada dos combustíveis fósseis, biocombustíveis e, finalmente, das algas. O tópico seguinte descreve a metodologia qualitativa de pesquisa bibliográfica adotada. Na sequência, um tópico sintetiza os resultados e discussões, integrando as evidências da literatura. Outro tópico traz as considerações finais, e o último tópico propõe sugestões para trabalhos futuros, apontando caminhos para a continuidade da pesquisa neste campo vital (John *et al.*, 2025).

OBJETIVOS

Objetivo Geral

O objetivo central deste trabalho é determinar a relevância e o potencial das biorrefinarias como plataformas integradas para a síntese sustentável de biocombustíveis e bioprodutos a partir de algas. Busca-se demonstrar como esse modelo pode contribuir de forma substantiva para a transição energética e para a construção de uma economia de baixo carbono.

Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Caracterizar o conceito e os diferentes tipos de biorrefinarias, contextualizando sua evolução e importância no cenário da Química Verde e da Bioeconomia.
2. Identificar e descrever os principais processos de conversão de biomassa empregados em biorrefinarias, com foco naqueles aplicáveis à biomassa algal.
3. Catalogar e analisar as características das algas como matéria-prima, incluindo sua classificação (micro e macroalgas), composição bioquímica (lipídios, carboidratos, proteínas) e fatores que influenciam seu crescimento (luz, nutrientes, pH).
4. Mapear as rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis a partir de algas, desde o cultivo e colheita até a conversão termoquímica, bioquímica e química.
5. Discutir as vantagens e os desafios da utilização de algas diante de outras matérias-primas para biocombustíveis, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais.
6. Contextualizar o papel do profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis no desenvolvimento e operação dessas biorrefinarias, destacando a necessidade de uma visão sistêmica e multidisciplinar.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Conceito de Biorrefinaria

O termo “biorrefinaria” ganhou força no final da década de 1990, paralelamente ao surgimento dos princípios da Química Verde. O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) a define como uma instalação que integra equipamentos e processos de conversão de biomassa para produzir combustíveis, energia e

produtos químicos de valor agregado. A analogia com uma refinaria de petróleo é útil, mas a diferença fundamental reside na matéria-prima: renovável versus fóssil (Cherubini, 2010).

Uma biorrefinaria de sucesso é aquela que maximiza o valor extraído de toda a biomassa, seguindo o conceito de “utilização integral da biomassa”. Isto significa que os coprodutos e resíduos de um processo tornam-se insumos para outro, minimizando desperdícios e criando cadeias de valor sinérgicas. Por exemplo, os resíduos proteicos da extração de óleo de microalgas para biodiesel podem ser direcionados para a produção de ração animal ou fertilizantes.

A sustentabilidade é um pilar intrínseco ao conceito. Isso envolve não apenas a redução das emissões de GEE, mas também a análise do ciclo de vida (LCA) dos produtos, o uso eficiente de água e energia, e a geração de impactos socioeconômicos positivos, como a criação de empregos verdes em zonas rurais.

Tipos de Biorrefinarias

A classificação das biorrefinarias é multifacetada, refletindo a diversidade de abordagens. Conforme Solarte-Toro e Cardona Alzate (2023), elas podem ser categorizadas:

- Pela Escala:
 - Menor Escala: Baixa capacidade de processamento, ideal para comunidades locais e tratamento de resíduos específicos.
 - Pequena Escala: Capacidade pequena a média, custos moderados, frequentemente focada em nichos de mercado.
 - Escala Híbrida: Combina características de pequena e grande escala, oferecendo flexibilidade.
 - Grande Escala: Alto custo de investimento e capacidade, buscando economia de escala, análoga a complexos petroquímicos.
- Pela Complexidade (Fases):
 - Fase I (Matéria-Prima Única, Produto Único): É a forma mais simples. Um exemplo é uma planta que produz apenas biodiesel a partir do óleo de algas. É o ponto de partida, mas não explora todo o potencial da biomassa.
 - Fase II (Matéria-Prima Única, Múltiplos Produtos): Aqui, uma única biomassa gera uma cesta de produtos. Por exemplo, um grão de milho pode ser fracionado para produzir amido (para etanol), óleo (para biodiesel), e o bagaço (para ração ou geração de energia).
 - Fase III (Múltiplas Matérias-Primas, Múltiplos Produtos): É o conceito mais avançado e integrado. Diferentes biomassas (ex.: algas, palha de cana, resíduos florestais) são processadas em uma rede complexa de tecnologias para produzir um amplo portfólio de produtos. Este modelo maximiza a resiliência e a eficiência de recursos.

- Pela Plataforma Tecnológica:
 - Biorrefinaria Lignocelulósica: Focada em biomassa rica em celulose, hemicelulose e lignina (ex.: madeira, palha).
 - Biorrefinaria de Açúcares (Sucroquímica): Utiliza açúcares fermentescíveis da cana-de-açúcar ou do milho.
 - Biorrefinaria de Biogás/Síntese: Converte biomassa em gás de síntese ($\text{CO} + \text{H}_2$) via gaseificação, que pode ser subsequentemente convertido em uma variedade de combustíveis e químicos via processo Fischer-Tropsch.
 - Biorrefinaria de Algas (Ficorrefinaria): Especializada no processamento de biomassa algal, visando a extrair lipídios, carboidratos e proteínas de forma fracionada.

Principais Matérias-Primas

A seleção da matéria-prima é um dos fatores mais críticos para a viabilidade de uma biorrefinaria.

Cana-de-Açúcar: É a espinha dorsal do setor de biocombustíveis no Brasil. Sua eficiência fotossintética e o bagaço e palha (biomassa lignocelulósica) permitem a produção de etanol de 1ª e 2ª geração, eletricidade (bioeletricidade) e outros produtos.

- Milho: Principal matéria-prima para o etanol nos EUA. A produção do etanol de milho é bem estabelecida, mas enfrenta críticas pela competição com a cadeia alimentar («food vs. fuel»).
- Óleos Vegetais e Gorduras Residuais: Soja, palma, girassol e sebo animal são fontes tradicionais para biodiesel. O uso de óleos residuais de fritura é particularmente interessante do ponto de vista da economia circular.
- Biomassa Lignocelulósica: Inclui resíduos agrícolas (palha, bagaço), florestais (serragem, cavaco) e culturas energéticas dedicadas (capim-elefante). Representa a base para os biocombustíveis de 2ª geração, mas requer pré-tratamentos mais complexos para desconstruir a lignina.
- Algas: Posicionam-se como a matéria-prima de 3ª geração. Suas vantagens são decisivas:
 - Alto Rendimento: Podem produzir até 60 vezes mais óleo por hectare do que a soja.
 - Não Competitividade: Crescem em tanques ou fotobiorreatores, não exigindo terras agrícolas.
 - Captura de CO_2 : Consomem dióxido de carbono como nutriente, podendo ser acopladas a fontes emissoras (termelétricas, indústrias de cimento).
 - Uso de Águas Não Potáveis: Podem ser cultivadas em água salgada, salobra ou até em efluentes tratados.

- **Composição Versátil:** Rica em lipídios (para biodiesel), carboidratos (para etanol e biogás) e proteínas (para ração e químicos).

Química Verde como Princípio Norteador

Os 12 Princípios da Química Verde, propostos por Anastas e Warner (1998), fornecem um roteiro ético e técnico para o desenvolvimento de processos de biorrefinaria. Princípios-chave incluem:

- **Prevenção:** É melhor prevenir a formação de resíduos do que tratá-los ou limpá-los após sua geração. As biorrefinarias buscam isso por meio da utilização integral da biomassa.
- **Economia de Átomos:** Os processos de síntese devem ser projetados para maximizar a incorporação de todos os materiais utilizados no produto final. O fracionamento da biomassa algal é um exemplo perfeito.
- **Uso de Matérias-Primas Renováveis:** Priorizar a biomassa em detrimento dos recursos fósseis. Este é o princípio fundador das biorrefinarias.
- **Projetos para a Degradação:** Os produtos químicos devem ser projetados para, ao final de sua função, se decompor em produtos inócuos e não persistirem no ambiente. Bioplásticos derivados de algas se encaixam neste princípio.
- **Uso de Solventes e Auxiliares Seguros:** Substâncias auxiliares (como solventes de extração) devem ser evitadas e, quando necessárias, devem ser inócuas. O CO₂ supercrítico é um “solvente verde” exemplar para extrair óleo de algas, pois é não tóxico, não inflamável e é facilmente removido.

A aplicação desses princípios garante que as biorrefinarias não sejam apenas “menos ruins” do que as indústrias fósseis, mas sim positivamente benéficas para o meio ambiente.

Outros Elementos a Serem Aplicados: A Questão da Lignina

A biomassa lignocelulósica (Cherubini, 2010) é composta por três polímeros principais: celulose (~40-50%), hemicelulose (~25-30%) e lignina (~15-30%). Enquanto a celulose e a hemicelulose são facilmente convertidas em açúcares e subsequentemente em biocombustíveis, a lignina representa um desafio e uma oportunidade.

Tradicionalmente, a lignina era queimada para geração de energia no local. No entanto, sua complexa estrutura aromática a torna uma fonte potencialmente valiosa para a indústria química. Pesquisas avançadas buscam transformar a lignina em:

- **Precusores de Bioplásticos:** Substituindo o bisfenol A (BPA).
- **Aditivos:** Para concreto, asfalto e resinas.
- **Produtos Químicos de Especialidade:** Fenol, benzeno, tolueno e xilenos (BTX) verdes.

- Fibras de Carbono: Para aplicações de alta tecnologia.

A capacidade de valorizar a lignina é um dos indicadores do nível de maturidade de uma biorrefinaria lignocelulósica. Da mesma forma, em uma ficorrefinaria, a busca é pela valorização de todos os componentes da alga: lipídios para biodiesel, carboidratos para etanol, e a “torta” proteica residual para ração ou fertilizantes.

Combustíveis Fósseis: A Matriz a Ser Superada

Para entender a relevância das biorrefinarias, é crucial contrastá-las com o paradigma dominante. Os combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) são formados ao longo de milhões de anos a partir da decomposição de matéria orgânica sob alta pressão e temperatura (Cherubini, 2010).

- Impactos:
 - Ambientais: São a principal fonte antropogênica de CO₂, além de emitirem outros poluentes como óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x), e material particulado. A extração causa desmatamento, vazamentos e contaminação de aquíferos.
 - Geopolíticos: A concentração das reservas em poucas regiões do globo gera instabilidade e conflitos.
 - Econômicos: Os preços são voláteis e sujeitos a flutuações do mercado e crises geopolíticas.
- Esgotabilidade: São recursos finitos. As reservas economicamente viáveis de petróleo, embora ainda extensas, enfrentam um declínio projetado, tornando a transição para alternativas uma questão de segurança energética.

A queima de combustíveis fósseis é responsável por mais de 75% das emissões globais de GEE, tornando a descarbonização do setor energético o maior desafio para mitigar as mudanças climáticas.

Biocombustíveis: A Alternativa Renovável

Biocombustíveis são combustíveis derivados de biomassas renováveis. Sua principal vantagem é o balanço neutro ou positivo de carbono: o CO₂ liberado na sua combustão é o mesmo que foi absorvido pela planta durante seu crescimento (fotossíntese) (John *et al.*, 2025).

- Gerações:
 - 1ª Geração: Produzidos a partir de açúcares, amidos e óleos vegetais de culturas alimentares. Ex.: Etanol de cana/milho, Biodiesel de soja/gordura animal. Enfrentam a crítica da competição com a produção de alimentos.
 - 2ª Geração (Biocombustíveis Avançados): Produzidos a partir de biomassas não-comestíveis, principalmente lignocelulósica. Ex.: Etanol celulósico, diesel de síntese via Fischer-Tropsch. Superam a questão «food vs. fuel», mas os custos de pré-tratamento e enzimas ainda são um desafio.

- 3ª Geração: Têm como fonte as algas. Oferecem as vantagens já enumeradas (alto rendimento, não competição, captura de CO₂) e são considerados a grande promessa para uma produção de biocombustíveis em larga escala e verdadeiramente sustentável.
- 4ª Geração: Envolve a engenharia genética de microalgas e cianobactérias para aumentar ainda mais a eficiência fotossintética, a produção de lipídios ou a secreção direta de hidrocarbonetos, integrando também tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS).

Algas: A Matéria-Prima do Futuro

Este tópico merece um detalhamento aprofundado, dada a centralidade no trabalho.

Conceito e classificação

As algas são organismos fotossintetizantes, predominantemente aquáticos, que variam de organismos unicelulares microscópicos (microalgas) a formas multicelulares complexas que podem atingir dezenas de metros (macroalgas) (Barros, 2021).

- Microalgas:
 - Características: Unicelulares, invisíveis a olho nu. Crescem em suspensão na água.
 - Vantagens para Biocombustíveis: Taxa de crescimento extremamente rápida (duplicação em 24h), altíssimo teor de lipídios (20-50% do peso seco, podendo chegar a 80% em condições de estresse), ocupam áreas não agrícolas.
 - Exemplos de Espécies: *Chlorella vulgaris* (rica em proteínas e lipídios), *Nannochloropsis* (muito utilizada para biodiesel), *Dunaliella salina* (fonte de β-caroteno).
- Macroalgas (Algas Marinhas):
 - Características: Multicelulares, semelhantes a plantas, formando florestas submarinas.
 - Vantagens: Crescimento muito rápido, não requerem fertilizantes, são ricas em carboidratos estruturais (agar, carragenana, alginatos) que podem ser fermentados para produzir etanol ou biogás. Não possuem lignina, facilitando a hidrólise.
- Classificação por Pigmento:
 - Rhodophyta (Algas Vermelhas): Fontes de agar e carragenana.
 - Phaeophyta (Algas Pardas): Fontes de alginatos.
 - Chlorophyta (Algas Verdes): Mais próximas evolutivamente das plantas terrestres.

Sistemas de cultivo

A escolha do sistema de cultivo é um balanço entre custo, controle e produtividade.

- **Sistemas Abertos:** Como lagoas “raceway” (canais em formato de “U” com pás de agitação).
 - Vantagens: Custo de capital e operação mais baixos.
 - Desvantagens: Baixo controle sobre as condições ambientais (temperatura, luz), alta susceptibilidade à contaminação por outras algas ou bactérias, elevada perda de água por evaporação.
- **Sistemas Fechados (Fotobiorreatores - PBRs):** Reatores construídos com tubos ou placas de material transparente (vidro ou plástico).
 - Vantagens: Controle total sobre pH, temperatura, nutrientes e CO₂; alta produtividade por volume; proteção contra contaminação.
 - Desvantagens: Custo de investimento inicial muito alto; podem sofrer com o biofilme (incrustação de algas nas paredes) e superaquecimento.
 - Tipos: PBRs tubulares (os mais comuns), PBRs de coluna e PBRs de placa plana.

Processos de Conversão da Biomassa Algal

Após o cultivo e a colheita (que pode envolver centrifugação, floculação ou filtração), a biomassa algal é convertida em biocombustíveis através de várias rotas:

1. **Rota Bioquímica:**
 - **Transesterificação:** O principal método para produção de biodiesel. Os lipídios (triglicerídeos) extraídos das microalgas reagem com um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador (base ou ácido), produzindo ésteres metílicos ou etílicos (biodiesel) e glicerol como coproduto.
 - **Fermentação Alcoólica:** Os carboidratos presentes nas algas são hidrolisados em açúcares simples e fermentados por leveduras (ex.: *Saccharomyces cerevisiae*) para produzir bioetanol.
 - **Digestão Anaeróbica:** Toda a biomassa úmida (ou os resíduos da extração de óleo) é decomposta por microrganismos na ausência de oxigênio, produzindo biogás (uma mistura de metano - CH₄ - e CO₂). O biogás pode ser purificado para biometano, um substituto direto do gás natural.
 - **Produção Biológica de Hidrogênio:** Algumas microalgas, sob condições específicas de estresse (anaerobiose, deficiência de enxofre), podem produzir gás hidrogênio (H₂) diretamente através da ação da enzima hidrogenase.
2. **Rota Termoquímica:**

- **Pirólise:** Aquecimento rápido da biomassa seca na ausência de oxigênio a $\sim 500^{\circ}\text{C}$. Produz um líquido escuro chamado bio-óleo, que pode ser refinado para obter combustíveis similares ao diesel e à gasolina. Também produz bio-carvão e gás.
- **Gaseificação:** Aquecimento da biomassa a temperaturas muito altas ($800\text{-}1000^{\circ}\text{C}$) com uma quantidade controlada de oxigênio/vapor. Converte a biomassa em gás de síntese (syngas), uma mistura de CO e H_2 . O “syngas” pode ser sintetizado em uma vasta gama de combustíveis líquidos (como diesel e “jet fuel”) via processo Fischer-Tropsch.
- **Liquefação Hidrotérmica:** Processo que imita a formação geológica do petróleo, usando água em condições subcríticas ($300\text{-}350^{\circ}\text{C}$, alta pressão) para converter biomassa úmida diretamente em bio-óleo cru. É particularmente adequado para algas, que têm alto teor de umidade.

A seleção da rota ideal depende da composição da alga (rica em lipídios, carboidratos ou proteínas), do teor de umidade e do produto final desejado. O conceito de biorrefinaria algal busca integrar várias dessas rotas para maximizar o valor da biomassa.

MATERIAIS E METODOLOGIA

Abordagem Metodológica

Este trabalho foi desenvolvido com base em uma pesquisa qualitativa do tipo exploratória e descritiva, utilizando o método de revisão bibliográfica sistemática. Esta abordagem foi escolhida por ser a mais adequada para mapear, sintetizar e analisar o estado da arte sobre um tema complexo e em rápida evolução, como é o caso das biorrefinarias a partir de algas. A revisão sistemática permite uma investigação rigorosa e minimiza vieses, fornecendo uma base sólida para a discussão e as conclusões apresentadas.

Estratégia de Busca e Fontes de Dados

A coleta de material foi realizada exclusivamente por meio de fontes secundárias, acessadas digitalmente. As principais bases de dados consultadas foram:

- **Portal de Periódicos da CAPES:** Considerado a mais abrangente e credenciada biblioteca virtual do Brasil, oferecendo acesso a milhares de periódicos internacionais de alto impacto.
- **Google Acadêmico (Google Scholar):** Utilizado por sua capacidade de indexar uma vasta gama de literatura acadêmica, incluindo artigos, teses, dissertações e livros de diversas fontes.

Para garantir a atualidade e relevância das informações, foi estabelecido como critério de inclusão a priorização de trabalhos publicados nos últimos cinco

anos (período de 2019 a 2024). No entanto, artigos seminais e obras de referência fundamentais para a compreensão dos conceitos básicos (ex.: princípios da Química Verde) foram incluídos independentemente do ano.

Critérios de Seleção e Palavras-Chave

O processo de seleção do material seguiu os seguintes critérios:

1. **Relevância Temática:** O trabalho deveria abordar diretamente um ou mais dos eixos centrais da pesquisa: biorrefinarias, biocombustíveis, algas (micro ou macroalgas), processos de conversão de biomassa e Química Verde.
2. **Qualidade e Credibilidade:** Foram priorizadas publicações em periódicos científicos revisados por pares, teses e dissertações de instituições de ensino reconhecidas, e capítulos de livros especializados.
3. **Abordagem:** Foram valorizados trabalhos que apresentassem uma visão integrada dos aspectos técnicos, ambientais e, quando aplicável, econômicos.

As palavras-chave utilizadas, isoladamente e em combinação, foram:

- “Biorrefinaria” (e “Biorefinery”)
- “Algas” (e “Algae”, “Microalgae”, “Macroalgae”)
- “Biocombustíveis de terceira geração” (e “Third-generation biofuels”)
- “Ficorrefinaria” (e “Phycorefinery”)
- “Cultivo de microalgas”
- “Biodiesel de algas”
- “Processos termoquímicos”
- “Química Verde”

Procedimento de Análise

Após a coleta, o material foi organizado e analisado de forma seletiva e interpretativa. O conteúdo foi categorizado tematicamente de acordo com a estrutura dos capítulos da revisão bibliográfica (ex.: conceitos, tipos de biorrefinarias, rotas de conversão algal). A análise consistiu em identificar convergências, divergências, lacunas de conhecimento e tendências emergentes na literatura, permitindo a construção de uma discussão coesa e fundamentada no tópico resultados e discussões.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico integra os achados da revisão bibliográfica, articulando-os para responder aos objetivos do trabalho e discutir o problema de pesquisa.

A Supremacia das Algas no Cenário das Biorrefinarias

A análise confirmou que as algas, em especial as microalgas, ocupam uma posição de destaque único no panorama das matérias-primas para biocombustíveis. Quando comparadas às fontes de 1ª e 2ª geração, as algas demonstram vantagens decisivas em termos de produtividade por área. Enquanto a soja produz em média 0,5 toneladas de óleo por hectare/ano, e a palma pode produzir até 6 toneladas, certas linhagens de microalgas podem ultrapassar 50 toneladas de óleo por hectare/ano. Este dado, por si só, justifica o investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) para superar os desafios de escala e custo (Barros, 2021).

Outro ponto de convergência na literatura é a versatilidade da biomassa algal. Diferente de uma cultura como a cana-de-açúcar (primariamente açucareira) ou a soja (primariamente oleaginosa), uma única cepa de microalga pode ser manipulada para acumular lipídios, carboidratos ou proteínas, dependendo das condições de cultivo (ex.: estresse nutricional por nitrogênio para aumentar lipídios). Esta “programabilidade” biológica faz da ficorrefinaria um modelo extremamente flexível e adaptável.

A Escolha do Sistema de Cultivo: Um Trade-Off Estratégico

A discussão sobre sistemas abertos versus fechados (Fotobiorreatores - PBRs) revela que não existe uma solução única. A tabela 1, adaptada de Barros (2021), sintetiza este dilema:

- **Sistemas Abertos (Lagoas Raceway):**

São a opção mais viável economicamente para commodities de baixo valor, como biocombustíveis, em grande escala. No entanto, os riscos de contaminação e a baixa eficiência no uso de CO₂ e água são entraves significativos. São mais adequados para espécies de algas robustas que podem tolerar condições ambientais variáveis.

- **Fotobiorreatores (PBRs) Fechados:**

Oferecem um controle sem precedentes, levando a produtividades volumétricas muito superiores. São essenciais para a produção de cepas de alto valor e compostos especializados (ex.: astaxantina, ácidos graxos ômega-3). Seu alto custo, no entanto, os torna economicamente inviáveis para a produção exclusiva de biodiesel atualmente.

A tendência apontada por estudos recentes é a de sistemas híbridos: utilizar PBRs para a produção do inóculo (iniciador) de alta qualidade e, posteriormente, transferir as algas para um sistema aberto para a etapa de crescimento massivo. Essa abordagem busca equilibrar custo, controle e produtividade.

A Integração de Rotas de Conversão: O Cerne da Ficorrefinaria

Ficou evidente que a viabilidade econômica de uma biorrefinaria de algas depende criticamente da valorização de todos os componentes da biomassa, e não apenas da fração lipídica para biodiesel. O esquema da figura 8 (Alvim, 2015) ilustra perfeitamente este conceito integrado:

1. Rota dos Lipídios: Após a extração (com solventes ou CO₂ supercrítico), os óleos são convertidos em biodiesel via transesterificação. O glicerol coproduto pode ser purificado e comercializado.
2. Rota dos Carboidratos: O resíduo sólido da extração de óleo, rico em carboidratos, pode ser submetido à hidrólise enzimática e subsequentemente à fermentação para produzir bioetanol.
3. Rota das Proteínas e Nutracêuticos: A fração proteica remanescente, que pode representar mais de 50% da biomassa residual, tem alto valor como suplemento para ração animal ou fertilizante orgânico. Adicionalmente, durante o processo, pigmentos de alto valor (como a ficocianina das algas vermelhas) podem ser extraídos para as indústrias cosmética e farmacêutica.
4. Rota da Digestão Anaeróbica: Os efluentes líquidos e os resíduos finais de todas as etapas podem ser direcionados para um digestor anaeróbico, produzindo biogás para gerar energia térmica e elétrica para a própria planta, fechando o ciclo energético e minimizando resíduos.

Esta abordagem de “biomassa zero a resíduo” é a materialização máxima dos princípios da Economia Circular e da Química Verde no contexto algal.

Desafios Persistentes e Fronteiras da Pesquisa

Apesar do potencial, a literatura é unânime em apontar os gargalos que impedem a comercialização em massa dos biocombustíveis de algas:

- **Custo de Produção da Biomassa:** O cultivo, a colheita e a desidratação das algas ainda são processos energeticamente intensivos e caros. A colheita, em particular, que envolve separar células microscópicas de grandes volumes de água, é um dos maiores desafios de engenharia.
- **Escalabilidade:** Transpor os resultados promissores de laboratório (escala de bancada) para uma escala piloto, demonstrativa e, finalmente, comercial, tem se mostrado um processo lento e repleto de obstáculos imprevistos.
- **Balanco Energético Integral (BEI):** É crucial que a energia contida nos biocombustíveis produzidos seja significativamente maior do que a energia fóssil gasta em todo o processo (cultivo, colheita, processamento). Estudos de ACV são fundamentais para validar a sustentabilidade do ciclo.
- **Estabilidade do Processo:** Manter culturas de algas produtivas e livres de contaminações por meses a fio em sistemas de grande escala é um desafio operacional complexo.

As fronteiras da pesquisa incluem:

- **Engenharia Metabólica:** Modificar geneticamente microalgas para que secretem hidrocarbonetos diretamente no meio de cultivo, eliminando a etapa custosa de colheita e extração.

- **Acoplamento a Efluentes:** Cultivar algas em águas residuais de indústrias ou esgoto tratado, reduzindo custos com nutrientes (nitrogênio e fósforo) e realizando um tratamento adicional da água.
- **Desenvolvimento de Coprodutos de Alto Valor:** A busca por moléculas bioativas únicas nas algas (antioxidantes, antivirais, polímeros especiais) é chave para melhorar a economia da biorrefinaria.

O Papel do Profissional em Tecnologia de Processos Sustentáveis

Em resposta ao problema de pesquisa, a discussão revela que o profissional atuante neste campo possui um perfil essencialmente multidisciplinar e sistêmico. Sua atuação não se limita a uma única etapa, mas abrange toda a cadeia:

- **A Montante:** Compreende a biologia das algas para otimizar o cultivo.
- **No Núcleo do Processo:** Projeta, opera e otimiza as unidades de conversão (reatores de transesterificação, fermentação, digestores anaeróbicos, PBRs), aplicando os princípios da Química Verde.
- **A Jusante:** Realiza a separação e purificação dos produtos.
- **Na Visão Sistêmica:** Utiliza ferramentas como Análise de Ciclo de Vida (LCA) e análise tecno-econômica para avaliar a sustentabilidade e viabilidade global do processo.

Este profissional é, portanto, o agente integrador, capaz de traduzir os avanços da biologia e da química em processos industriais viáveis e verdadeiramente sustentáveis, sendo o elo fundamental para que o potencial das biorrefinarias de algas se torne realidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu concluir, de forma robusta e fundamentada na literatura científica recente, que as biorrefinarias baseadas em algas representam um dos caminhos mais promissores e estratégicos para a descarbonização do setor energético e a transição para uma bioeconomia circular.

A relevância das biorrefinarias foi estabelecida não apenas como substitutas das refinarias fósseis, mas como um novo paradigma industrial, onde a eficiência é medida pela capacidade de transformar recursos renováveis em uma cesta diversificada de produtos, minimizando resíduos e impactos ambientais. Neste contexto, as algas confirmaram seu status de matéria-prima de elite da terceira geração, superando as gerações anteriores em termos de produtividade, não competitividade com a alimentação e serviços ecossistêmicos, como a captura de CO₂.

Os objetivos específicos foram plenamente atendidos. Foi possível detalhar os processos de síntese, desde os sistemas de cultivo até as rotas termoquímicas e bioquímicas de conversão, destacando a importância da abordagem integrada da ficorrefinaria. As vantagens das algas foram amplamente demonstradas, embora

sem deixar de lado uma análise crítica dos desafios econômicos e operacionais que ainda precisam ser superados, em especial os custos de produção da biomassa e a energia demandada na etapa de colheita.

Quanto ao problema de pesquisa, conclui-se que o papel do profissional de Tecnologia de Processos Sustentáveis é central e transformador. Ele atua como o arquiteto e o operador deste sistema complexo, exigindo uma formação que conjugue conhecimentos de engenharia, química, biologia e gestão ambiental. Sua expertise é a chave para otimizar as cadeias produtivas, garantir a sustentabilidade do ciclo de vida dos produtos e, finalmente, viabilizar comercialmente essas tecnologias.

Em última análise, este trabalho reforça que o investimento contínuo em P&D para biorrefinarias de algas não é uma opção, mas uma necessidade. A superação dos obstáculos atuais através de inovação tecnológica e políticas públicas de incentivo permitirá que este potencial seja plenamente realizado, pavimentando o caminho para um futuro energético mais limpo, seguro e sustentável.

SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE

Para dar sequência a esta pesquisa e contribuir para o avanço do conhecimento na área, as seguintes investigações são sugeridas:

1. Estudos Experimentais de Otimização: Realizar experimentos em escala de bancada e piloto para:
 - Testar e otimizar diferentes métodos de extração de lipídios (e.g., ultrassom assistido, micro-ondas, solventes verdes como o acetato de etila) em diversas espécies de microalgas, comparando rendimento, pureza e consumo energético.
 - Investigar a fermentação dos resíduos carboidratados após a extração de óleo, identificando as melhores linhagens de leveduras e condições de processo para maximizar a produção de bioetanol.
 - Avaliar a integração do cultivo de algas com efluentes reais (e.g., de suinocultura, indústria alimentícia), medindo a eficiência de remoção de nutrientes e o impacto na composição bioquímica da biomassa.
2. Análises de Viabilidade Aprofundadas:
 - Realizar Análises de Ciclo de Vida (LCA) completas e comparativas de diferentes rotas de fitorrefinaria, considerando diferentes misturas de produtos (ex.: biodiesel vs. biogás vs. ração animal) para identificar a configuração com o menor impacto ambiental global.
 - Desenvolver modelos de análise técnico-econômica (TEA) detalhados que incorporem cenários de variação no custo das matérias-primas, energia e valor de mercado dos coprodutos, identificando os pontos de equilíbrio e a sensibilidade econômica do negócio.
3. Investigação de Novas Fronteiras:

- Explorar o potencial de macroalgas nativas do litoral brasileiro como matéria-prima para biorrefinarias, caracterizando sua composição e avaliando rotas de conversão para etanol e biogás.
- Pesquisar o conceito de biorrefinaria híbrida, integrando algas com outras biomassas (ex.: bagaço de cana) para suprimir limitações nutricionais e melhorar o balanço energético geral.
- Investigar a valorização de frações minoritárias de alto valor, como a extração e purificação de pigmentos específicos (ficocianina, astaxantina) e polímeros naturais (alginatos, carragenana) para aplicações nas indústrias farmacêutica, cosmética e de alimentos.

A implementação dessas sugestões permitirá um salto qualitativo, transitando da compilação teórica para a geração de dados práticos e a proposição de modelos inovadores, consolidando a liderança do Brasil no cenário global de biocombustíveis avançados e bioeconomia.

REFERÊNCIAS

ALVIM, J. C. **Biorrefinarias: conceito, classificação, matérias-primas e produtos**. Journal of Bioenergy and Food Science, v. 1, n. 3, p. 61-77, 2014.

ANASTAS, P. T.; WARNER, J. C. **Green Chemistry: Theory and Practice**. Oxford University Press, 1998.

BARROS, G. S. **Abordagem sustentável de biomassas de micro e macroalgas**. 2021. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

CHERUBINI, F. **The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals**. Energy Conversion and Management, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

JOHN, S. *et al.* **Multi-product biorefineries for biofuels and value-added products: advances and future perspectives**. Academia Green Energy, vol. 2, 2025.

SOLARTE-TORO, J. C.; CARDONA ALZATE, C. A. **Conceptual design of biorefineries**. In: Biorefineries. Elsevier, 2023. p.1-34.