



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Laura Vienna Gonçalves Gomes

LIQUEFAÇÃO HIDROTÉRMICA DE BIOMASSA ALGAL PARA OBTENÇÃO DE BIO-ÓLEO: UMA REVISÃO

Ouro Preto

2024

Laura Vienna Gonçalves Gomes

Liquefação hidrotérmica de biomassa algal para obtenção de bio-óleo: uma revisão

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Tecnologias ambientais

Orientador: Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral

Ouro Preto

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633I Gomes, Laura Vienna Goncalves.
Liquefação hidrotérmica de biomassa algal para obtenção de bio-
óleo [manuscrito]: uma revisão. / Laura Vienna Goncalves Gomes. - 2024.
28 f.: il.: color., tab.. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Mateus de Souza Amaral.
Produção Científica (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro
Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Biocombustíveis. 2. Liquefação. 3. Microalgas. I. Amaral, Mateus
de Souza. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 662.6

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Laura Vienna Gonçalves Gomes

LIQUEFAÇÃO HIDROTÉRMICA DE BIOMASSA ALGAL PARA OBTENÇÃO DE BIO-ÓLEO: UMA REVISÃO

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia ambiental

Aprovada em 18 de outubro de 2024

Membros da banca

Doutor Mateus de Souza Amaral - Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora Marina de Medeiros Machado - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre Vitor Luiz Viana Pombal - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Mateus de Souza Amaral, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **Mateus de Souza Amaral, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/10/2024, às 08:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0799604** e o código CRC **62F68726**.

AGRADECIMENTOS

Em cada passo desta jornada, encontrei desafios que me ensinaram a perseverar e acreditar na transformação que o conhecimento proporciona. Hoje, com orgulho e gratidão, chego ao fim de um caminho que contemplo a vista panorâmica de minhas conquistas.

Agradeço à Deus e à minha família, que foram o alicerce seguro em cada curva do caminho, guiando-me com amor e apoio incondicional. Aos meus pais, Elizabete e José Claret cujo exemplo de dedicação e persistência iluminou o percurso até aqui. Aos meus irmãos, Thiago e Carol que compartilharam risos, lágrimas e incentivaram minhas conquistas. À minha avó Fiinha (*in memoriam*), fonte de carinho e sabedoria ancestral que sempre me manteve em suas orações

Ao meu orientador Mateus pela dedicação, pelos ensinamentos e por me guiar até aqui. À Universidade Federal de Ouro Preto, à Escola de Minas e ao Departamento de Química, pelo ensino de qualidade, apoio e infraestrutura oferecidos para a realização deste trabalho.

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis frente às mudanças climáticas impulsiona a busca por alternativas aos combustíveis fósseis, como o bio-óleo, obtido pela liquefação hidrotérmica (LHT) de biomassa de microalgas. Este trabalho faz uma revisão em formato de artigo científico acerca da aplicação da LHT como tecnologia promissora para a conversão de biomassa úmida em bio-óleo, sem a necessidade de etapas de secagem, fator que reduz os custos energéticos do processo. A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, baseada em trabalhos acadêmicos, livros, artigos, periódicos e legislações pertinentes, consultando bases de dados como Portal CAPES, Scielo, Science Direct, além de bibliotecas e repositórios universitários. Além disso, é proposta uma biorrefinaria conceitual que maximiza o aproveitamento dos subprodutos, como biocarvão e metano, promovendo uma abordagem circular de energia renovável. Os resultados demonstram que a LHT oferece uma rota viável para a produção de biocombustíveis, com potencial para substituir parcialmente o uso de combustíveis fósseis, embora desafios econômicos e tecnológicos ainda precisem ser superados. Conclui-se que a integração da LHT com sistemas de biorrefinaria pode viabilizar a produção sustentável de bio-óleo, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Palavras-chaves: Liquefação hidrotérmica, biomassa algal, bio-óleo.

ABSTRACT

The growing demand for sustainable solutions to climate change drives the search for alternatives to fossil fuels, such as bio-oil, obtained by hydrothermal liquefaction (LHT) of microalgae biomass. This work reviews the application of LHT as a promising technology for the conversion of wet biomass into bio-oil, without the need for drying steps, a factor that reduces the energy costs of the process. The methodology used was bibliographic research, based on academic works, books, articles, periodicals and pertinent legislation, consulting databases such as CAPES Portal, Scielo, Science Direct, as well as libraries and university repositories. In addition, a conceptual biorefinery is proposed that maximizes the use of by-products, such as biochar and methane, promoting a circular approach to renewable energy. The results demonstrate that LHT offers a viable route for biofuel production, with the potential to partially replace the use of fossil fuels, although economic and technological challenges still need to be overcome. It is concluded that the integration of LHT with biorefinery systems can enable the sustainable production of bio-oil, contributing to the mitigation of greenhouse gas emissions.

Keywords: Hydrothermal liquefaction, algal biomass, bio-oil.

SUMÁRIO

1.	DESENVOLVIMENTO	2
2.	ARTIGO CIENTÍFICO	2
	Introdução.....	2
	Microalgas	4
	Composição das microalgas.....	5
	Cultivo.....	7
	Fotobiorreatores	8
	Colheita da biomassa	9
	Liquefação hidrotérmica	10
	Proposta de biorrefinaria	12
	Desafios e perspectivas futuras.....	15
	Conclusão.....	16
	Referências	17

1. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho foi escrito em formato de artigo científico mediante aprovação da banca examinadora.

A metodologia utilizada foi a pesquisa bibliográfica, baseada em trabalhos acadêmicos, livros, artigos, periódicos e legislações pertinentes, consultando bases de dados como Portal CAPES, Scielo, Science Direct, além de bibliotecas e repositórios universitários.

2. ARTIGO CIENTÍFICO

Introdução

As práticas antrópicas desenvolvidas em todo o mundo têm desempenhado um aumento na concentração de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa, que foram impulsionados pelo crescimento populacional e econômico. Os efeitos desses gases estão se manifestando negativamente em mudanças climáticas em todo o planeta, sendo a causa provável para o aquecimento global observado nos últimos tempos [1]. Esse aquecimento está distribuído de maneiras diferentes pelo mundo e pode gerar uma sucessão de impactos com riscos potenciais à saúde humana e a níveis ecológicos como inundações, tempestades, ondas de calor e seca, aumento do nível do mar dentre outros problemas resultantes de uma grande mudança climática [2].

Sabe-se que a contribuição para esse aumento na temperatura terrestre vem de muitos setores, como a eletricidade, transporte, agricultura e uso do solo, desmatamento, resíduos dentre outros processos. Porém, a utilização intensiva de combustíveis fósseis ao longo dos anos tem gerado desafios ambientais e energéticos significativos, o que reforça a importância de investir em fontes alternativas de energia, como os biocombustíveis [3]. Comparativamente, essa opção oferece um perfil ambiental mais vantajoso, emitindo menores quantidades de poluentes durante a combustão e sendo produzidos através de processos mais limpos [4].

A produção de biocombustíveis a partir de biomassa é uma das técnicas que tem despertado o interesse de pesquisadores como uma possível contribuição para as demandas energéticas mundiais e conseqüentemente para o avanço das metas de redução de gases estufa no mundo [5]. A biomassa renovável vem se mostrando como um grande potencial em

desempenhar um papel sustentável e com características mitigatórias em relação à emissão de CO₂. Além disso, é uma opção que é encontrada em grande abundância por diversas fontes, que inclui resíduos de madeira, culturas agrícolas, resíduos urbanos e animais, plantas aquáticas, o que facilita sua utilização como fonte alternada de energia e produtos químicos [6].

A biomassa de microalgas tem sido uma grande aposta na conversão termoquímica de bio-óleo para suprir a demanda de biocombustíveis, e mitigar a utilização dos processos energéticos tradicionais que trazem malefícios ao meio ambiente. Nesse sentido algumas propriedades das microalgas se destacam para cumprir essa demanda, como a alta capacidade de crescimento e produção de biomassa, o que confere uma maior vantagem competitiva em relação às demais espécies, a não utilização de terras agricultáveis para seu cultivo, podendo ser cultivada até mesmo em águas residuais, a capacidade de captura de carbono de plantas industriais, custos inferiores no processo de coleta e processamento dentre outros atributos que têm sido citados como fundamentos para justificar a ampla utilização dessas espécies como uma alternativa mais sustentável e com potencial para substituir os processos existentes [7].

Entretanto, a conversão dessa biomassa não acontece de forma espontânea, alguns processos termoquímicos foram desenvolvidos ao longo dos anos para obtenção dos produtos líquidos e gasosos para diferentes tipos de biomassa, que são submetidas a um ambiente pressurizado e com elevada temperatura [6]. Dentre as variadas opções de processos termoquímicos como a pirólise, gaseificação, e combustão, destaca-se a Liquefação Hidrotérmica (HTL), um processo termoquímico que envolve o uso de água a temperaturas que podem variar entre 200 e 400 °C e pressão em torno de 4 a 22 MPa [8]. Tem como subprodutos o bio-óleo, uma fase gasosa, uma fase líquida e um resíduo sólido, sendo o bio-óleo a fase de maior interesse [9].

Nesse seguimento, este estudo visa revisar a obtenção de bio-óleo como produto principal de uma conversão termoquímica pela técnica de Liquefação Hidrotérmica, utilizando a biomassa de microalgas, a fim de avaliar sua aplicabilidade como uma tecnologia promissora que desempenha com um papel mitigatório na poluição ambiental ao mesmo tempo em que corresponde com as expectativas de um sistema sustentável e econômico para uma solução de produção de energia renovável.

Microalgas

As microalgas, também chamadas de micrófilos, são micro-organismos unicelulares ou pluricelulares fotossintéticos com dimensões microscópicas. São encontradas em águas doces e marinhas, podendo ter um tamanho e forma variável, mas invisíveis a olho nu [7]. Estima-se que existam de 200.000 a 800.000 espécies de microalgas, podendo ser divididas em procarióticas e eucarióticas [10].

Com a necessidade de se pensar nos desafios relacionados ao âmbito energético, ambiental e alimentar, a busca por tecnologias que envolvam o uso de microalgas se tornou mais frequente, visto que se trata de uma espécie que possui aplicabilidade em várias áreas de pesquisa, como no tratamento de águas residuais, captura de CO₂, geração de produtos de alto valor agregado e biocombustíveis [11].

As microalgas oferecem um grande potencial para a transformação em biocombustíveis devido ao alto teor de óleo que pode ser encontrado em algumas espécies, e são consideradas como matéria-prima de terceira geração para a produção de diferentes biocombustíveis [12]. Alguns dos produtos dessa classe são: o biodiesel, uma opção que pode ter um potencial de substituição dos combustíveis tradicionais por representar uma opção sustentável. O bioetanol, produto que traz uma contribuição para a redução de gases de efeito estufa, mas que ainda está em fase de avaliação e estudos para sua utilização comercial, e o biometano que é um biogás que pode ser utilizado tanto como gás combustível quanto na geração de eletricidade [13].

Assim como em qualquer processo, a utilização de microalgas tem pontos favoráveis e desfavoráveis, o Quadro 1 apresenta pontos que mostram as vantagens e desvantagens sobre a sua utilização.

Quadro 1- Vantagens e desvantagens em relação à utilização de biomassa microalgal.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> As algas apresentam uma elevada taxa de crescimento celular e produtividade em biomassa; <input checked="" type="checkbox"/> Elevada capacidade de promoção da biofixação do CO₂ atmosférico; <input checked="" type="checkbox"/> São fáceis de cultivar, podendo utilizar espaços até mesmo como águas residuais de origem urbana e industrial; <input checked="" type="checkbox"/> São cultivos que não necessitam de terras férteis e não competem com outras culturas na cadeia de alimentos; <input checked="" type="checkbox"/> Com investimento, pesquisa e avanços tecnológicos, pode ser tornar uma opção sustentável e viável economicamente. 	<ul style="list-style-type: none"> <input checked="" type="checkbox"/> Produção em grande escala ainda pouco estimulada; <input checked="" type="checkbox"/> Elevado custo de extração e processamento de biomassa se comparado às opções mais tradicionais; <input checked="" type="checkbox"/> Os combustíveis provenientes das microalgas ainda são mais caros do que os de origens fósseis.

Fonte: [13]

Nesse contexto, vale ressaltar também a importância ambiental das microalgas, elas podem atuar na mitigação da emissão de gases de efeito estufa, através do processo de sequestro de carbono [12]. Podem ser cultivadas em águas residuais, o que oferece uma grande vantagem em relação aos outros processos já que reduzem consideravelmente a utilização de água doce, além de consumir os nutrientes disponíveis para nutrir uma grande variedade de microalgas, ao mesmo tempo em que removem esses compostos exercendo uma função de tratamento da água [14]. Além disso, a conversão termoquímica dessas espécies vai gerar um subproduto denominado "Biocarvão", um resíduo que pode ser utilizado como agente corretivo de solos e adsorvente para remoção de contaminantes de águas residuais [15].

Composição das microalgas

Dentre os vários compostos bioativos produzidos pelas microalgas, há uma formação majoritária de lipídios, carboidratos e proteínas, e para além das três principais as microalgas também contêm pigmentos e vitaminas [16]. Todos esses produtos químicos são considerados de alto valor pois possuem ampla aplicação em diversos setores, como na indústria farmacêutica com propriedades antioxidantes, imunológicas e anti-inflamatórias, bem como na indústria

cosmética, produção alimentícia, dentre outras [11]. Entretanto, a sua composição pode ser mutável a depender da influência de fatores como iluminação, fotoperíodo, pH, temperatura, nutrientes minerais, suplemento de CO₂, além do fato de que essas mudanças também podem ocorrer de acordo com a variabilidade das espécies existentes [17]. Na Tabela 2 consta a composição de algumas microalgas em diferentes condições de estresse.

Tabela 1 - Composição Bioquímica de microalgas em diferentes condições de estresse.

Espécies	Composição Bioquímica (% de matéria seca)		
	Proteínas	Carboidratos	Lipídios
<i>Chlorella vulgaris</i>	10-25	10-59	5-16
<i>Isochrysis galbana</i>	12-30	-	24-47
<i>Nannochloropsis oculata</i>	18	29	34
<i>Nannochloropsis sp.</i>	10-43	20-29	33-61
<i>Pavlova sp.</i>	34-54	30-44	16-29
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	16-25	15-17	32-41
<i>Scenedesmus obliquus</i>	30-40	17-40	35-50
<i>Tetraselmis sp.</i>	22-48	17-42	16-28
<i>Tetraselmis maculata</i>	52	15	3
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	21-52	1,9
<i>Spirogyra sp.</i>	6-20	33-64	11-21
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6

Fonte:[16, 52].

As microalgas podem acumular lipídios em cerca de 15 a 40% em seu peso total, no entanto em condições ambientais excepcionais podem representar um valor de até 70 a 90% [16]. Essa característica configura para as microalgas um aspecto chamativo e interessante para a produção de biocombustíveis e suplementos alimentares. Alguns fatores podem estar relacionados à alta produtividade de lipídios, como a ausência de nitrogênio, a temperatura, o pH e a elevada salinidade.

Os lipídios podem ser extraídos por diversas técnicas, duas delas são a extração com solvente e a extração sem solvente. A primeira exige altas condições de temperatura e elevada utilização de energia, o que exprime uma desvantagem em relação ao processo, já a segunda opção apresenta uma vantagem por se tratar de um processo mais simples além de ser uma opção mais benéfica ao meio ambiente [18]. A quantidade de lipídios e seus componentes nas células das microalgas podem ter uma variação a depender da espécie, adotando uma classificação basicamente de lipídios neutros (triglicerídeos e colesterol) e lipídios polares, por exemplo, os fosfolipídios. Os lipídios neutros, como os triglicerídeos, são considerados como o principal material para a produção do biodiesel [19].

Os carboidratos podem significar até 50% da matéria seca de microalgas. A glicose, amido, frutose, celulose são exemplos de mono e polissacarídeos provenientes dessas algas unicelulares [16]. Cada uma dessas moléculas pode representar funções específicas aplicáveis, por exemplo, os polissacarídeos podem desempenhar uma função de resposta imunológica bem como exercer atividade anti-inflamatória, antiviral e antioxidante. Além disso, a extração de polissacarídeos do carboidrato microalgal pode atuar na produção de bioetanol, cosméticos, indústria alimentícia e de bebidas, dentre outros. Porém, apesar dos inúmeros benefícios, o mercado não aceita tão bem a utilização dessas moléculas para determinados fins por representar uma alternativa mais cara em relação às opções já existentes [16].

Um outro grupo de substâncias que compõem a maioria das espécies de microalgas são as proteínas. Diferentes espécies de microalgas podem ser consideradas uma grande fonte não convencional de proteínas devido a sua composição, que pode variar de 6 a 70% em seu peso seco, apesar de que a maioria das espécies apresentam níveis de aproximadamente 50% de teor proteico. A extração dessas moléculas da biomassa de microalgas tem uma aplicação relacionada à nutrição humana, sendo comercializada em forma de cápsulas, líquidos, tabletes, bem como na composição de massas, doces, bebidas, podendo ser aplicável também na indústria cosmética e farmacêutica [11, 17, 20].

Cultivo

As microalgas podem se desenvolver sob variados regimes metabólicos, são eles: autotróficos, heterotróficos e mixotróficos. O crescimento via metabolismo autotrófico sucede através da fotossíntese, em que acontece a fixação do carbono do CO₂, utilizando a

luminosidade. O Heterotrófico decorre por absorção de moléculas orgânicas dissolvidas no meio de cultura. Já o metabolismo mixotrófico engloba os dois últimos processos, a microalga absorve CO₂ sob condições luminosas e quando submetida a ambientes escuros realiza absorção de compostos orgânicos [21].

O meio de cultivo é um ambiente específico e demarcado que deve ser propício para o desenvolvimento dos organismos, devem dispor de luz para organismos que fazem fotossíntese como as microalgas, e todos os elementos essenciais para o crescimento das mesmas, como macronutrientes, micronutrientes e vitaminas em baixas concentrações. Assim, é possível utilizar não só meios naturais, mas também artificiais que contenham nutrientes necessários para o desenvolvimento das microalgas. Em relação a cultivos de espécies marinhas, o meio empregado pode ser a própria água do mar, ou a elaboração de uma solução sintética de água com sais enriquecida com nutrientes [22, 23].

Inúmeras vantagens estão associadas ao cultivo de microalgas. A capacidade de se desenvolver em sistemas de água doce e marinha e gerar um alto rendimento de biomassa em uma curta área, além do baixo custo para colheita e preparação são fatores que elevam sua vantagem competitiva em relação a outras culturas [7]. Para mais, as microalgas podem ser cultivadas também em terras não agricultáveis, o que se torna também uma grande vantagem por não fazer uso de terras que poderiam ser utilizadas para fins de produção alimentícia ou outras plantações no geral [24].

Fotobiorreatores

Os fotobiorreatores (FBR) são equipamentos extremamente importantes e fornecem fonte luminosa para as microalgas, auxiliando-as na conversão de biomassa. Na maioria das vezes elas sofrem diminuição exponencial da luz, causado pelo sombreamento natural quando começam a crescer, fazendo com que necessitem de um dispositivo que otimize o aproveitamento da luz incidente no reator [25].

O cultivo de algas tem características únicas e requer sistemas específicos para controlar os parâmetros que sustentam a alta produtividade da biomassa [26]. Por isso, os FBR contam com dois métodos principais, sendo eles cultivos em sistemas abertos ou fechados.

O cultivo em FBR aberto, em grande parte, é encontrado em tanques, piscinas e lagoas abertas. Por conseguir abranger grande volume de cultivo, suas principais vantagens são um

capital mínimo para os custos operacionais e a escalabilidade, mas conta com limitações no controle rigoroso da concentração de oxigênio, pH, temperatura, evolução do cultivo e tem grande propensão à contaminação [25, 27]. O projeto mais empregado de reatores abertos são os chamados "*Raceways*", pois utiliza pouco material e tem um método de construção e operação relativamente simples, eles recebem este nome devido ao seu formato que se parece com um circuito de corrida e as produtividades podem variar de 0,19 a 23,5 g.m⁻².dia⁻¹ de biomassa seca [10, 28].

Por outro lado, o cultivo em sistema fechado conta com inúmeras vantagens quando se trata de termos de qualidade. Ao contrário do sistema aberto, no fechado é possível controlar de maneira mais efetiva a luz, temperatura, além de fazer a aeração de ar e acompanhar a evolução do cultivo. Em grande parte, eles são menores, ocupam menos espaços e contam com diferentes tipos de geometria, sendo as principais: placa plana, que podem ser iluminados artificialmente e de placa plana externa que permite a incidência de luz natural. Podem ser também do tipo tubular e coluna de bolha. Todas as geometrias oferecem vantagens e limitações, como custos de operação, cultivo em grande escala, iluminação, controle de temperatura e evaporação [29, 30]. Porém, caso não seja feito o acompanhamento adequado, o sistema fechado pode gerar superaquecimento, crescimento de algas bentônicas, problemas de limpeza e alto acúmulo de oxigênio dissolvido [27].

Colheita da biomassa

A colheita da biomassa, que ocorre logo após o cultivo, é considerada um processo muito importante para a produção em grande escala de biocombustíveis a partir da biomassa microalgal, isso se deve ao fato de que esses micro-organismos crescem em culturas muito diluídas, o que acarreta em um alto consumo energético no processamento desses líquidos para o sucesso da colheita [31]. Alguns dos métodos mais usuais para a colheita de microalgas são: floculação, eletrofloculação, flotação, filtração e centrifugação [32].

A floculação é um processo em que é adicionado produtos químicos a fim de promover a junção de células de microalgas, através da ligação entre elas, ou da neutralização ou ainda pela inversão de cargas elétricas da parede da célula. [31]. Os agentes flocculantes mais utilizados para a colheita são alguns sais, polímeros e bases [32].

A etapa de eletrofloculação acontece devido à característica de eletronegatividade das microalgas. É inserido ao meio de cultivo eletrodos que permitem a passagem de corrente elétrica podendo assim realizar a separação das células. Já no processo de biofloculação, os agentes flocculantes podem ser microrganismos, como bactérias ou fungos, que formam aglomerados com as células de microalgas colaborando com a decantação por gravidade [32].

No processo de flotação, são geradas bolhas que tem como função propiciar a subida das células com a finalidade de promover sua separação do meio líquido. Vale salientar que cultivos de microalgas em ambientes marinhos provavelmente não irão flocular, devido ao elevado teor de sais no meio [32]. Esse método pode ser considerado o inverso da sedimentação gravimétrica que é uma técnica que estimula a decantação das células por gravidade e assim como as demais, possibilita sua separação, porém, com menor eficiência [23].

A técnica de filtração consiste em reter as células das microalgas em uma membrana com poros estreitos, que permitirão somente a fase líquida o acesso ao outro lado [31]. A filtração pode acontecer em pequena ou grande escala, na primeira opção utiliza-se um frasco de Kitasato ou algum instrumento parecido, e na segunda analisa-se a viabilidade do processo de acordo com o tamanho das células, se forem grandes, serão retidas facilmente pelo filtro, caso contrário o processo se torna inviável pela quantidade considerável de tempo que irá demandar [23].

E por fim, a centrifugação é uma técnica mais rápida de separação, e se dá pela ação da força centrífuga através de um equipamento próprio, esse método não utiliza produtos químicos, o que garante a conservação de suas características iniciais. Apesar de requerer um menor tempo para realizar o procedimento, esta demanda um maior gasto energético [23].

Liquefação hidrotérmica

A conversão de biomassa em produtos pode se dar de diversas formas, seja por métodos biológicos tradicionais como fermentação e digestão, ou através de tecnologias de processamento termoquímico como combustão, gaseificação, pirólise ou liquefação. Nos métodos conservadores, observa-se um desafio em relação ao tempo de transformação e baixo rendimento no produto. Já os demais processos possuem uma maior facilidade em converter a matéria em produtos gasosos, sólidos e líquidos. [33].

Nesse sentido, a liquefação hidrotérmica (LHT) de biomassa de microalgas para a produção de bio-óleo surge como uma tecnologia promissora [34]. O processo de conversão

termoquímica via LHT é regido em temperaturas elevadas que podem variar de 200 a 400 °C sob atmosfera inerte entre 4 e 22 MPa de pressão, tendo como principal vantagem a possibilidade de utilização de biomassas úmidas, tornando dispensável as pré-etapas de secagem, além de trazer uma facilidade para o processo em termos de desenvolvimento de operações em regimes contínuos [8].

Alguns parâmetros operacionais são utilizados para avaliar a qualidade e rendimento desse produto energético. E podem ser estudados separadamente ou em conjunto, de modo estimar sua influência na melhoria do produto final. Alguns deles são: temperatura, taxa de aquecimento, catalisador, tempo de reação, pressão, dentre outros. A temperatura e o tempo são os parâmetros que mais afetam o rendimento do biocrude [35]

A temperatura tem uma função importante nos processos de conversão térmica, e exerce influência significativa no rendimento e qualidade do bio-óleo. A fonte de calor é a responsável por realizar reações de decomposição de moléculas da biomassa [36]. O aumento adequado da temperatura pode gerar resultados favoráveis de conversão, não obstante, se houver uma ascensão muito elevada, efeitos contrários ao esperado podem ser observados. Isso acontece porque quando a temperatura está abaixo do ponto crítico da água, a decomposição das moléculas ocorre de forma gradual, já quando há um aumento exacerbado da temperatura e uma ultrapassagem desse ponto crítico, tem-se uma tendência à formação de reações de polimerização entre as moléculas do produto líquido, que darão origem a um resíduo sólido que por sua vez pode se decompor em produto gasoso a medida em que maior quantidade de calor é fornecido [9].

Assim como a temperatura, o tempo de residência ou também chamado por tempo de permanência, é um parâmetro operacional nos processos de conversão termoquímica que exerce influência no rendimento e qualidade do subproduto principal: o bio-óleo. Este tempo pode ser definido como "um período de reação em uma temperatura máxima, excluindo os tempos de aquecimento e resfriamento" [37]. O comportamento desse parâmetro, analisado singularmente em relação ao rendimento do biocrude revela que ao valer-se de um tempo de reação muito pequeno, é possível que haja reações incompletas de polimerização. Por outro lado, reações de maior duração podem causar degradação e polimerização, reduzindo assim o rendimento do bio-óleo [9]. Além dos parâmetros físicos mencionados anteriormente, a espécie de microalga

empregada também deve ser levada em consideração sobre o rendimento de bio-óleo obtido via liquefação hidrotérmica conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 2 - Rendimento de bio-óleo obtido via liquefação hidrotérmica de diferentes espécies de microalgas.

Espécie	Rendimento (%)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	43,00
<i>Spirulina algae</i>	32,60
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	54,20
<i>Spirulina platensis</i>	39,90
<i>Tetraselmis</i>	29,00
<i>Gaditana</i>	50,80
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	25,80

Fonte: [6, 16]

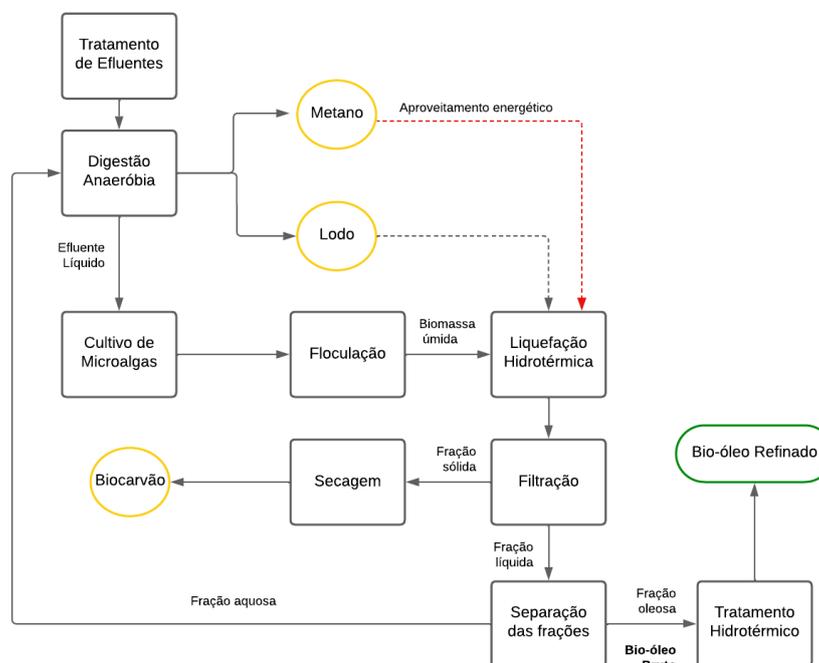
Proposta de biorrefinaria

O produto principal obtido através da LHT de biomassa algal é o bio-óleo que pode ser destinado à produção de biocombustíveis líquidos. Todavia, esse produto possui algumas características que implicam no comprometimento da sua qualidade e aplicação direta, como alta viscosidade e presença de heteroátomos indesejados em sua composição [8]. Nesse contexto, torna-se primordial o emprego de operações de refino do bio-óleo como o tratamento hidrotérmico que consiste resumidamente, na reação do bio-óleo com a água em altas condições de temperatura na presença de catalisadores e/ou H₂, é considerado um tratamento efetivo e economicamente viável para o aperfeiçoamento das características do bio-óleo, como a remoção de heteroátomos, redução da viscosidade e aumento do poder calorífico [34, 38].

Além do bio-óleo, a LHT produz uma fração aquosa com 30 a 60% do conteúdo de carbono da matéria-prima empregada e mais de 50% do nitrogênio a depender dos parâmetros operacionais. Esse aspecto faz com que a fração aquosa se torne um subproduto proveitoso e um fator importante para o sucesso da LHT, é considerada uma fonte de nutrientes para aumentar a sustentabilidade econômica geral, pois ela pode ser recirculada para nutrir o cultivo de microalgas e estimular o crescimento celular, reduzindo assim os custos de insumos para o

cultivo e o uso de água. Outra alternativa interessante é a aplicação desse produto na digestão anaeróbia para a produção de metano conforme mostra o fluxograma na figura 1 [6, 8, 39].

Figura 1 – Proposta conceitual de biorrefinaria empregando cultivo de microalgas



Modelo simplificado de uma biorrefinaria que emprega o processo de liquefação hidrotérmica de biomassa algal. O esquema destaca as etapas de digestão anaeróbia, cultivo de microalgas, flocculação, secagem e liquefação hidrotérmica, resultando na geração de metano, biocarvão, bio-óleo bruto e refinado. O processo visa otimizar a conversão de biomassa e resíduos em fontes de energia renovável e produtos de valor agregado, como parte de uma abordagem de economia circular.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Apesar de que a LHT tenha como produto principal componentes líquidos (aquoso e oleoso), frações gasosas e sólidas também são produzidas em menores volumes, porém ambas com potencial de aplicações. A fração gasosa produzida pelo HTL, apresenta um rendimento em torno de 5 - 20% e é composto principalmente de CO₂, mas também de quantidades menores de gás hidrogênio (H₂), óxido de carbono (CO), gás metano (CH₄) e alcanos de cadeia curta [40, 41]. A produção gasosa tende a aumentar em temperaturas superiores a 300 °C, como as porcentagens de H₂ e CH₄ [42, 43]. A integração e reutilização dessa fração são economicamente viáveis, por exemplo, para introduzir o gás no cultivo de microalgas devido à sua alta concentração de CO₂ e produzir um gás melhorado e mais rico em CH₄.

A fração sólida denominada biocarvão ou biochar, pode ser submetida a etapas de secagem e ativação para ser empregada com biocarvão com propriedades adsorventes de poluentes de efluentes líquidos e alimentar animais devido ao alto teor de proteína que pode ser usado diretamente como ração animal [15, 33]. Este produto também tem aptidão para alterar positivamente a fertilidade do solo, melhorando a capacidade de retenção hídrica e de nutrientes, a fim de favorecer o aumento da produção agrícola [12]. O biochar, apresenta uma grande diferença de rendimento, entre 2-70%, principalmente por causa dos parâmetros operacionais e da biomassa utilizada como matéria-prima [44]. Em geral, matérias-primas com maiores proporções de carboidratos apresentam alto rendimento de biochar, ou seja, é inversamente proporcional à produção de biocrude [45].

Dessa maneira, a conversão termoquímica via rota úmida pode ser empregada em um contexto de biorrefinaria que explora todos os componentes de alto valor da biomassa, um conceito em que através de uma instalação única é possível a conversão da biomassa em múltiplos subprodutos que podem ser reciclados fazendo o reaproveitamento de nutrientes e resíduos obtidos no processo. As etapas são organizadas de modo que todos os componentes sejam utilizados e o máximo de perda de matéria seja evitada. Todo o cuidado deve ser tomado para que os produtos não sejam contaminados ou danificados [14].

A Figura 1 propõe um esquema simplificado de uma biorrefinaria conceitual empregando LHT de biomassa algal cultivada em fotobiorreatores do tipo *raceway*, que é o fotobiorreator mais utilizado em cultivos microalgais em grande escala, visando a produção de biocombustíveis [46]. Tal modelo de biorrefinaria poderia ser integrado a uma estação de tratamento de esgoto que possui digestão anaeróbica.

O reaproveitamento de água residual, oferece diversas vantagens tanto econômicas quanto ambientais. As microalgas cultivadas em sistemas abertos, utilizando efluentes como fonte de nutrientes, podem ser aproveitadas para produzir um óleo a um custo inferior ao obtido em sistemas de cultivo tradicionais. Esse processo promove a economia de água e nutrientes, além de contribuir para a remoção de compostos como nitrogênio e fósforo presentes no efluente [47].

A implementação de um sistema que combine as diferentes tecnologias pode desempenhar um papel crucial na redução dos custos operacionais, diminuir a área necessária para cultivo, aumentar a eficiência do tratamento e possibilitar a recuperação de energia por

meio da biomassa produzida durante a remoção de agentes eutrofizantes presentes no efluente tratado [48].

Desafios e perspectivas futuras

A liquefação hidrotérmica (HTL) de biomassa, particularmente de microalgas, continua a ser uma tecnologia promissora para a produção de biocombustíveis sustentáveis, em resposta à crescente demanda por fontes de energia alternativas que possam substituir os combustíveis fósseis. No entanto, essa técnica enfrenta desafios significativos, tanto no que diz respeito à sua viabilidade técnica quanto econômica. Um dos principais obstáculos envolve os altos custos associados ao cultivo, colheita e extração do óleo das microalgas [47].

Embora microalgas, como *Chlorella vulgaris*, tenham uma elevada produtividade de óleo, com valores que podem chegar a até 70% da biomassa em condições ideais, o processo de extração ainda é custoso e requer desenvolvimento tecnológico adicional para ser viável em larga escala [47, 49].

Em termos de eficiência energética, a HTL oferece vantagens consideráveis, como a possibilidade de processar biomassa úmida sem necessidade de secagem, o que economiza energia em comparação com outras rotas termoquímicas, como a pirólise [50]. No entanto, a implementação comercial em larga escala ainda depende de uma melhor compreensão dos parâmetros críticos do processo, como temperatura, pressão e tempo de residência, que precisam ser otimizados para maximizar o rendimento de bio-óleo e minimizar subprodutos indesejados [6].

Outro aspecto importante, ressaltado neste trabalho, é o potencial das microalgas em termos de mitigação ambiental. Além de serem uma fonte renovável, as microalgas possuem a capacidade de fixar CO₂ atmosférico, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Essa característica torna a HTL de microalgas uma tecnologia alinhada com os objetivos globais de sustentabilidade ambiental. Entretanto, estudos indicam que, para que essa rota se torne viável, é necessário integrar a HTL com outros processos em uma biorrefinaria, otimizando o aproveitamento dos coprodutos e reciclando recursos, como a água e os nutrientes utilizados no cultivo [24, 47].

Perspectivas futuras para a HTL de biomassa algal incluem o desenvolvimento de novos fotobiorreatores mais eficientes, capazes de reduzir os custos de produção e melhorar a

eficiência da captura de luz e fixação de carbono [51]. Além disso, pesquisas em andamento exploram a combinação de HTL com outros processos de conversão bioquímica, buscando aumentar o rendimento de biocombustíveis e produtos químicos de alto valor agregado, o que pode aumentar a viabilidade econômica e tornar essa rota mais competitiva no mercado energético global [52].

Assim, embora a liquefação hidrotérmica apresente grandes oportunidades para a produção sustentável de biocombustíveis, o avanço da tecnologia depende de uma abordagem integrada, que una inovação tecnológica, otimização de processos e o desenvolvimento de cadeias produtivas sustentáveis [47].

Conclusão

Com base na revisão da literatura apresentada é evidente que as microalgas apresentam um potencial promissor como matéria-prima renovável para a produção de biocombustíveis. A elevada taxa de crescimento celular e produtividade em biomassa e a alta capacidade de biofixação do CO₂ atmosférico são dois exemplos das várias vantagens associadas à utilização desse microrganismo.

Entretanto, os métodos tradicionais de processamento se baseiam na rota seca da biomassa, implicando em altos custos de processo que acabam por enfraquecer a competitividade de qualquer produto com fins energéticos provenientes das microalgas. Nesse sentido, a tecnologia de liquefação hidrotérmica pode se revelar como uma possível solução para tal problema, pois permite o processamento da biomassa úmida para a produção do bio-óleo, um produto com características próximas ao petróleo, eliminando operações unitárias de secagem.

Essa tecnologia de conversão termoquímica pode ser empregada dentro de uma biorrefinaria algal, cujo produto principal seria o bio-óleo, e permitir a diversificação de biocombustíveis pelo aproveitamento da fração aquosa oriunda da liquefação hidrotérmica, que pode ser empregada na digestão anaeróbia para a produção de metano que tem potencial para um aproveitamento energético. Além disso, o biocarvão gerado no processo também possui vasta possibilidade de aplicação, com destaque para sua utilização, após ativação, como adsorvente no tratamento de efluentes.

Para que a HTL de biomassa algal atinja a maturidade comercial e se torne uma alternativa viável aos combustíveis fósseis, é necessário que mais estudos sejam realizados, especialmente em torno da integração da HTL em sistemas de biorrefinaria e a reutilização de subprodutos, como sugerido na literatura. A superação dos desafios tecnológicos associados aos custos e à eficiência do processo será crucial para consolidar essa tecnologia como uma rota sustentável para a produção de biocombustíveis e outros produtos químicos de valor agregado.

Referências

1. FIELD, Christopher B.; BARROS, Vicente R. (Ed.). **Climate change 2014—Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects**. Cambridge University Press, 2014.
2. RITCHIE, Hannah; ROSER, Max. CO₂ and greenhouse gas emissions. **Our world in data**, 2017. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>.
3. MENDES, C. D'U. S. Mapeamento tecnológico do biodiesel e tecnologias correlatas sob o enfoque dos pedidos de patentes. 2008. 78 f. Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2008.
4. ANP-Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2015). Anuário.
5. ALPER, Koray; TEKIN, Kubilay; KARAGÖZ, Selhan. Pyrolysis of agricultural residues for bio-oil production. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, n. 1, p. 211-223, 2015
6. GOLLAKOTA, A. R. K.; KISHORE, Nanda; GU, Sai. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1378-1392, 2018.
7. COÊLHO, Diego de Freitas et al. Microalgae: cultivation aspects and bioactive compounds. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 62, 2019.
8. ROSENDAHL, Lasse (Ed.). **Direct thermochemical liquefaction for energy applications**. Woodhead Publishing, 2017.
9. CAO, Leichang et al. Hydrothermal liquefaction of agricultural and forestry wastes: state-of-the-art review and future prospects. **Bioresource technology**, v. 245, p. 1184-1193, 2017.
10. AL HATTAB, Mariam; GHALY, Abdel. Production of biodiesel from marine and freshwater microalgae: a review. **Advances in Research**, p. 107-155, 2015.

11. LEVASSEUR, Wendie; PERRE, Patrick; POZZOBON, Victor. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. **Biotechnology advances**, v. 41, p. 107545, 2020.
12. YU, Kai Ling et al. Microalgae from wastewater treatment to biochar–feedstock preparation and conversion technologies. **Energy conversion and management**, v. 150, p. 1-13, 2017.
13. GENDY, Tahani S.; EL-TEMAMY, Seham A. Commercialization potential aspects of microalgae for biofuel production: an overview. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 22, n. 1, p. 43-51, 2013.
14. ROUX, Jean-Maxime; LAMOTTE, Hadrien; ACHARD, Jean-Luc. An overview of microalgae lipid extraction in a biorefinery framework. **Energy Procedia**, v. 112, p. 680-688, 2017
15. ARUN, Jayaseelan et al. Enrichment of bio-oil after hydrothermal liquefaction (HTL) of microalgae *C. vulgaris* grown in wastewater: Bio-char and post HTL wastewater utilization studies. **Bioresource technology**, v. 261, p. 182-187, 2018.
16. KOYANDE, Apurav Krishna et al. Bio-processing of algal bio-refinery: a review on current advances and future perspectives. **Bioengineered**, v. 10, n. 1, p. 574-592, 2019.
17. BECKER, E. Wolfgang. **Microalgae: biotechnology and microbiology**. Cambridge University Press, 1994.
18. CHEW, K. W., Chia, S. R., Show, P. L., Yap, Y. J., Ling, T. C., & Chang, J. S. (2017). Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of Environmental Management**, 190, 331-344
19. HUANG, GuanHua et al. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied energy**, v. 87, n. 1, p. 38-46, 2010.
20. SATHASIVAM, Ramaraj et al. Microalgae metabolites: A rich source for food and medicine. **Saudi journal of biological sciences**, v. 26, n. 4, p. 709-722, 2019.
21. KLEIN, Bruno Colling; BONOMI, Antonio; MACIEL FILHO, Rubens. Integration of microalgae production with industrial biofuel facilities: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1376-1392, 2018.

22. GUILLARD, Robert RL. Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates. In: **Culture of marine invertebrate animals**. Springer, Boston, MA, 1975. p. 29-60.
23. LOURENÇO, Sergio O. **Cultivo de microalgas marinhas: princípios e aplicações**. São Carlos: RiMa, 2006.
24. CHEW, Kit Wayne et al. Microalgae biorefinery: high value products perspectives. **Bioresource technology**, v. 229, p. 53-62, 2017
25. TSYGANKOV, A. A. Laboratory scale photobioreactors. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 37, n. 4, p. 333-341, 2001.
26. BARBOSA, Rúben Christian; SOARES, Jimmy; MARTINS, Marcio Arêdes. Low-cost and versatile sensor based on multi-wavelengths for real-time estimation of microalgal biomass concentration in open and closed cultivation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, p. 105641, 2020.
27. NARALA, Rakesh R. et al. Comparison of microalgae cultivation in photobioreactor, open raceway pond, and a two-stage hybrid system. **Frontiers in Energy Research**, v. 4, p. 29, 2016.
28. SUALI, Emma; SARBATLY, Rosalam. Conversion of microalgae to biofuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4316-4342, 2012.
29. KIRNEV, P. C. S. et al. Technological mapping and trends in photobioreactors for the production of microalgae. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 36, n. 3, p. 1-9, 2020.
30. PEGALLAPATI, Ambica Koushik; NIRMALAKHANDAN, Nagamany. Internally illuminated photobioreactor for algal cultivation under carbon dioxide-supplementation: Performance evaluation. **Renewable energy**, v. 56, p. 129-135, 2013.
31. RASTOGI, Rajesh P. et al. Algal Green Energy–R&D and technological perspectives for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2946-2969, 2018.
32. BARROS, Ana I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 41, p. 1489-1500, 2015.
33. YANG, Jie et al. A review on hydrothermal co-liquefaction of biomass. **Applied Energy**,

v. 250, p. 926-945, 2019.

34. XU, Donghai et al. Catalytic hydrothermal liquefaction of algae and upgrading of biocrude: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 103-118, 2018.

35. IA et al BASAR. Uma revisão sobre os principais parâmetros operacionais e de projeto para otimizar e desenvolver a liquefação hidrotérmica de biomassa para aplicações de biorrefinaria. **Green Chemistry**, v. 23, n. 4, p. 1404–1446, 1 mar. 2021.

36. GUEDES, Raquel Escrivani; LUNA, Aderval S.; TORRES, Alexandre Rodrigues. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 129, p. 134-149, 2018.

37. XUE, Yuan et al. A review on the operating conditions of producing bio-oil from hydrothermal liquefaction of biomass. **International Journal of Energy Research**, v. 40, n. 7, p. 865-877, 2016.

38. BARREIRO, Diego López et al. Heterogeneous catalytic upgrading of biocrude oil produced by hydrothermal liquefaction of microalgae: State of the art and own experiments. **Fuel Processing Technology**, v. 148, p. 117-127, 2016.

39. LENG, Lijian et al. Valorization of the aqueous phase produced from wet and dry thermochemical processing biomass: A review. **Journal of Cleaner Production**, p. 126238, 2021.

40. TIAN, C. et al. Liquefação hidrotérmica para biorrefinaria de algas: Uma revisão crítica. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 38, p. 933–950, 2014.

41. TOOR, SS; ROSENDAHL, L.; RUDOLF, A. Liquefação hidrotérmica de biomassa: Uma revisão de tecnologias de água subcrítica. **Energy** , v. 36, n. 5, p. 2328–2342, 2011.

42. AKHTAR, J.; AMIN, NAS Uma revisão sobre condições de processo para rendimento ótimo de bio-óleo na liquefação hidrotérmica de biomassa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , v. 15, n. 3, p. 1615–1624, 2011.

43. GUO, Y. et al. Uma revisão da produção de bio-óleo a partir da liquefação hidrotérmica de algas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 776–790, 1 ago. 2015.

44. PONNUSAMY, VK et al. Revisão sobre produção sustentável de biochar por meio de

liquefação hidrotérmica: Propriedades físico-químicas e aplicações. **Bioresource Technology**, v. 310, p. 123414, 1 ago. 2020.

45. BILLER, P.; ROSS, AB Rendimentos potenciais e propriedades do óleo da liquefação hidrotérmica de microalgas com diferentes conteúdos bioquímicos. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 215–225, 2011.

46. BHADRA, Sitav; SALAM, P. Abdul; SARKER, Nilay Kumar. Microalgae-based biodiesel production in open raceway ponds using coal thermal flue gas: A case of West Bengal, India. **Environmental Quality Management**, v. 29, n. 3, p. 27-36, 2020.

47. ESPINOSA, Lauren; TAPANES, Neyda de la Caridad Om; ARANDA, Donato Alexandre Gomes; CRUZ, Yordanka Reyes. As microalgas como fonte de produção de biodiesel: discussão de sua viabilidade. **AS&T**, v. 2, n. 1, p. 1-24, jun. 2014.

48. SILVEIRA, E. O.; WINK, M.; ZAPPE, A. L.; KIST, L. T.; MACHADO, Ê. L. Sistema integrado com microalgas e wetland construído de fluxo vertical no tratamento de efluentes urbanos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 305-313, mar./abr. 2019. DOI: 10.1590/S1413-41522019161655.

49. CHISTI, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, 25(3), 294-306.

50. ROSENDAHL, L. (2018). Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power. **John Wiley & Sons**.

51. TEIXEIRA, C. (2007). Fotobiorreatores e suas aplicações em cultivos de microalgas. **Brazilian Journal of Microbiology**, 38(3), 312-318.

52. LEVASSEUR, W., PERRE, P., & POZZOBON, V. (2020). Microalgae for biofuels: A scientific perspective. **Biotechnology Advances**, 38, 107419.