



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA - PPEQ**

LORENA RODRIGUES CUNHA

**BIOPETRÓLEO A PARTIR DA BIOMASSA DE
MICROALGAS VIA LIQUEFAÇÃO
HIDROTERMAL: UMA AVALIAÇÃO
ENERGÉTICA E AMBIENTAL**

SALVADOR

2023

LORENA RODRIGUES CUNHA

**BIOPETRÓLEO A PARTIR DA BIOMASSA DE
MICROALGAS VIA LIQUEFAÇÃO HIDROTERMAL: UMA
AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFBA (área de concentração: Processos e sistemas químicos) como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Dr. Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

Coorientador: Prof. Dr. Ícaro Thiago Andrade Moreira

Coorientador: Prof. Dr. Diego Lima Medeiros

SALVADOR

2023




UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA




A Comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação
“BIOPETRÓLEO A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS VIA LIQUEFAÇÃO HIDROTÉRMICA: UMA AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E AMBIENTAL” de **LORENA RODRIGUES CUNHA** como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestra em Engenharia Química.

Salvador, 10 de agosto de 2023.


Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **ANA KATERINE DE CARVALHO LIMA LOBATO**
Data: 02/10/2023 22:11:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Profa. Dra. Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato
(Orientadora - UNIFACS)

Documento assinado digitalmente
 **OLIVIA MARIA CORDEIRO DE OLIVEIRA**
Data: 16/09/2023 18:51:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Olivia Maria Cordeiro de Oliveira
(UFBA)

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS GUIMARAES CARDOSO**
Data: 01/10/2023 13:37:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Lucas Guimarães Cardoso
(PPEQ UFBA)

Documento assinado digitalmente
 **ICARO THIAGO ANDRADE MOREIRA**
Data: 16/09/2023 19:47:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ícaro Thiago Andrade Moreira
(UFBA)



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



EPUFBA

Prof. Dr. Diego Lima Medeiros
(UFMA)

C972 Cunha, Lorena Rodrigues.

Biopetróleo a partir da biomassa de microalgas via liquefação hidrotermal: uma avaliação energética e ambiental/ Lorena Rodrigues Cunha. – Salvador, 2023.

54 f.: il. color.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato.

Coorientadores: Prof. Dr. Diego Lima Medeiros.

Prof. Dr. Ícaro Thiago Andrade Moreira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2023.

1. Microalga. 2. Biocombustíveis. 3. Ciclo de vida - avaliação. 4. Biomassa. I. Lobato, Ana Katerine de Carvalho Lima. II. Medeiros, Diego Lima. III. Moreira, Ícaro Thiago Andrade. IV. Universidade Federal da Bahia. V. Título.

CDD: 579.82

Agradecimentos

Ao Senhor Jesus Cristo, por sua infinita graça em minha vida e por me conceder saúde, sabedoria e resiliência para conquistar meus sonhos.

A minha família, por acreditarem em mim, em especial a minha mãe, a minha avó e minhas tias por todo o apoio incondicional neste e em todos os anos para a concretização dos meus sonhos. A minha filha Cecília por seu amor e parceria ao longo dessa trajetória.

Aos amigos, em especial Vinícius Galiza, Ricardo Saráchaga e Edson Lopes (in memoriam) por todo incentivo, apoio e dedicação no início da concretização desse sonho.

A minha orientadora Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato, pela confiança e profissionalismo. Aos meus coorientadores Ícaro Thiago Andrade Moreira e Diego Lima Medeiros, pela competência, dedicação, empatia e por todos os conhecimentos compartilhados. Obrigada pela confiança, incentivo e por me atenderem com paciência todas as vezes que precisei.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.

Resumo

A transição para uma matriz energética mais sustentável e com menor impacto é um objetivo global, e as bioenergias desempenham um papel significativo nessa transição. Encontrar oportunidades de melhorias na produção e consumo de recursos energéticos apoia o aumento da eficiência de energia e diminui o seu impacto no ambiente. Este estudo realizou a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) para identificar a demanda energética e a pegada de carbono na produção de biopetróleo por liquefação hidrotermal (LHT). Foram consideradas as espécies *Scenedesmus acutus* (SC), *Chlorella vulgaris* (CV) e *Nannochloropsis granulata* (NG) para a comparação de três cenários de produção da biomassa de microalgas: alto teor de proteína (HP), alto teor de carboidrato (HC) e alto teor lipídico (HL). O fluxo de referência foi 1 kg de biomassa de microalgas em sólidos totais processados em LHT. O banco de dados ecoinventTM 3.6 e métodos de avaliação para demanda de energia acumulada (CED) em megajoules (MJ) e potencial de aquecimento global (IPCC-2021 – GWP de 100 anos) em quilogramas de dióxido de carbono equivalente (kg CO_{2eq}) foram usados no openLCA[®] 1.11.0. O cenário mais favorável foi o NG-HL, que apresentou a menor demanda de energia e pegada de carbono, 19,1 MJ kg⁻¹ e 0,85 kg CO_{2eq}/kg de biopetróleo, respectivamente. O NG-HL alcançou o maior rendimento de biopetróleo 68%_{m/m} com 42,1 MJ kg⁻¹ PCS. Além disso, foram desenvolvidas duas análises de sensibilidade, a primeira para avaliar o efeito do tempo antes da colheita da biomassa de microalgas e uma segunda que visou compreender a influência da demanda de calor no LHT. O retorno sobre o investimento em energia (EROI) variou de 0,8 a 2,4 MJ MJ⁻¹_{CED} nos cenários avaliados. O tempo de colheita tardia considerada na análise de sensibilidade aumentou a demanda de energia em 84% e a pegada de carbono em 70% em NG-HL. Além disso, a demanda de calor no LHT é um parâmetro chave no desempenho energético e ambiental do biopetróleo, que variou de -19–30% na análise de sensibilidade das categorias avaliadas ao mudar de 5,9 MJ kg⁻¹ em LHT para 3–10 MJ kg⁻¹. Foi identificado que a biomassa de microalgas para produção de biopetróleo com a utilização fonte de calor residual pode reduzir a demanda de energia e a pegada de carbono. A abordagem proposta neste estudo apoia a tomada de decisão na LHT com base na composição da biomassa, tempo de cultivo antes da colheita e demanda de calor na LHT para reduzir a demanda de energia e a pegada de carbono de bioprodutos de microalgas. Devido à necessidade de otimização de parâmetros técnicos, como a eficiência da produção e custos operacionais, a implementação na cadeia de abastecimento de biopetróleo a partir de microalgas enfrenta desafios em escala comercial, que reflete a necessidade de estudos posteriores.

Palavras-chave: Avaliação de ciclo de vida, Biomassa de microalgas, Biopetróleo, Demanda de energia, Pegada de carbono.

Abstract

The transition to a more sustainable energy matrix with less impact is a global objective, and bioenergies play a significant role in this transition. Finding opportunities for improvements in the production and consumption of energy resources supports increased energy efficiency and lessens its impact on the environment. This study carried out a Life Cycle Assessment (LCA) to identify the energy demand and carbon footprint in the production of biopetroleum by hydrothermal liquefaction (HTL). The species *Scenedesmus acutus* (SC), *Chlorella vulgaris* (CV) and *Nannochloropsis granulata* (NG) were considered for the comparison of three microalgae biomass production scenarios: high protein content (HP), high carbohydrate (HC) and high lipid (HL). The reference flow was 1 kg of microalgae biomass in total processed solids in HTL. The ecoinventTM 3.6 database and assessment methods for cumulative energy demand (CED) in megajoules (MJ) and global warming potential (IPCC-2021 – 100-year GWP) in kilograms of carbon dioxide equivalent (kg CO_{2eq}) were used in openLCA[®] 1.11.0. The most favorable scenario was the NG-HL, which presented the lowest energy demand and carbon footprint, 19.1 MJ kg⁻¹ and 0.85 kg CO_{2eq} /kg of biopetroleum, respectively. NG-HL achieved the highest biopetroleum yield 68.3%_{w/w} with 42.1 MJ kg⁻¹ HHV. In addition, two sensitivity analyzes were developed, the first to obtain more realistic values from the literature regarding the cultivation time before harvesting and the second aimed at understanding the influence of heat demand on the HTL. The return on energy investment (EROI) ranged from 0.8 to 2.4 in the evaluated scenarios. The late harvest time considered in the sensitivity analysis increased the energy demand by 84% and the carbon footprint by 70% in NG-HL. In addition, the heat demand in the HTL is a key parameter in the energy and environmental performance of the biopetroleum, which ranged from -19–30% in the sensitivity analysis of the evaluated categories when changing from 5.9 MJ kg⁻¹ in HTL for 3 –10 MJ kg⁻¹. It has been shown that microalgae biomass for bioepetroleum production using waste heat sources can reduce energy demand and carbon footprint. The approach proposed in this study supports decision-making in HTL based on biomass composition, growing time before harvest and heat demand in HTL to reduce the energy demand and carbon footprint of microalgae bioproducts. Due to the need to optimize technical parameters, such as production efficiency and operating costs, the implementation of biopetroleum from microalgae in the supply chain faces challenges on a commercial scale, which reflects the need for further studies.

Keywords: Life cycle analysis, Microalgae biomass, Biopetroleum, Energy demand, Carbon footprint.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Microscopia das células:(a) <i>Scenedesmus acutus</i> ,(b) <i>Nannochloropsis granulata</i> e (c) <i>Chlorella vulgaris</i>	17
Figura 2 – <i>Raceway open pond</i>	18
Figura 3 – Liquefação hidrotermal	22
Figura 4 – Bioprodutos de microalgas	23
Figura 5 – Sistema de produto de processamento de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal.	28
Figura 6 – Produção de biopetróleo nos cenários base	35
Figura 7 – Demanda de energia nos cenários base.Onde SC representa <i>Scenedesmus acutus</i> ; CV representa <i>Chlorella vulgaris</i> ; NG representa <i>Nannochloropsis granulata</i> ; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.	36
Figura 8 – Pegada de carbono nos cenários base.Onde SC representa <i>Scenedesmus acutus</i> ; CV representa <i>Chlorella vulgaris</i> ; NG representa <i>Nannochloropsis granulata</i> ; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.	37
Figura 9 – Demanda de energia e pegada de carbono nos cenários de menor demanda de calor.Onde SC representa <i>Scenedesmus acutus</i> ; CV representa <i>Chlorella vulgaris</i> ; NG representa <i>Nannochloropsis granulata</i> ; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.	38
Figura 10 – Demanda de energia e pegada de carbono nos cenários de maior demanda de calor.Onde SC representa <i>Scenedesmus acutus</i> ; CV representa <i>Chlorella vulgaris</i> ; NG representa <i>Nannochloropsis granulata</i> ; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais características das técnicas de colheita de microalgas.	19
Tabela 2 – Inventário de primeiro plano do cultivo, colheita e liquefação hidrotérmica de processamento de biomassa de microalgas de 1 kg em sólido total	26
Tabela 3 – Inventário de primeiro plano do cultivo, colheita e liquefação hidrotermal de 1 kg de biomassa de microalgas processada em sólidos totais.	29
Tabela 4 – Componentes da biomassa e composição elementar das espécies de microalgas em sólidos totais.	30
Tabela 5 – Coeficientes do modelo preditivo de liquefação hidrotermal para a conversão dos componentes da biomassa de microalgas em produtos.	31
Tabela 6 – Rendimento do produto para processamento de 1 kg de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal nos cenários base.	35
Tabela 7 – Demanda energética e pegada de carbono da produção de biopetróleo	43
Tabela 8 – Análise de sensibilidade do tempo de cultivo antes da colheita nos cenários base.	54
Tabela 9 – Demanda de energia e pegada de carbono para 1 kg de sólidos totais do processamento de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal (LHT) em cenários de linha de base e análise de sensibilidade para demanda de calor	54
Tabela 10 – Demanda de energia e pegada de carbono para produção de 1 kg de biopetróleo em liquefação hidrotérmica (LHT) nos cenários base e análise de sensibilidade para demanda de calor	55

Sumário

1	Introdução	11
2	Objetivos	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	Revisão bibliográfica	14
3.1	O Papel da bioenergia no contexto energético global	14
3.2	Diversidade e potencial dos biocombustíveis e bioenergia a partir de biomassa	15
3.3	Microalgas	16
3.4	Sistemas de cultivo	17
3.5	Técnicas de colheita	19
3.6	Técnicas de beneficiamento	20
3.7	Liquefação hidrotermal	21
3.8	Bioprodutos	22
3.9	Avaliação do ciclo de vida	23
3.10	Aspectos e impactos da liquefação hidrotermal	25
4	Metodologia	27
4.1	Sistemas de produção e caracterização dos cenários	27
4.2	Produtos da liquefação hidrotermal e indicadores de energia	31
4.3	Recursos, variabilidade e análise de sensibilidade	32
5	Resultados	34
5.1	Efeito da composição da biomassa	34
5.2	Análise do desempenho energético e da pegada de carbono	36
5.3	Análises de sensibilidade	37
6	Discussões	40
7	Conclusão	44
	Referências	45
A	Apêndice	54

1 Introdução

As emissões globais de dióxido de carbono (CO_2) ultrapassaram os níveis pré-pandêmicos registrando um crescimento de mais de 6% em 2021. Esse aumento foi impulsionado pelo estímulo econômico e pelo progresso na distribuição de vacinas, o que gerou um aumento na atividade econômica e no consumo de energia (IEA, 2023). Em 2022, as emissões provenientes da combustão de energia e dos processos industriais aumentaram 0,9%, o que representa um acréscimo de 321 megatoneladas (Mt), atingindo um recorde histórico de 36,8 gigatoneladas (Gt) (IEA, 2023). Essa estimativa reforça a necessidade da transformação completa da economia global para alcançar as emissões líquidas zero até 2050 e limitar o aumento da temperatura global a $1,5^\circ\text{C}$ por meio de políticas e práticas sustentáveis na eficiência energética e transição para fontes renováveis (IEA, 2021).

A energia derivada da biomassa desempenha um papel importante na redução das emissões de carbono, especialmente em setores difíceis de descarbonizar, como a manufatura, o transporte pesado e a aviação (Napp et al., 2019). A bioenergia é considerada uma fonte de energia renovável, pois utiliza materiais orgânicos, como resíduos florestais, culturas energéticas e resíduos agrícolas, para gerar calor, eletricidade e biocombustíveis (Embrapa, 2016).

Ao contrário dos combustíveis fósseis, o dióxido de carbono proveniente da queima da biomassa, pode ser reabsorvido pelas plantas durante seu crescimento, resultando em emissões líquidas de carbono reduzidas ou até mesmo neutras (Hanif et al., 2022). No entanto, expandir o uso da bioenergia de forma sustentável na rede energética global apresenta desafios significativos. Um dos principais desafios é a necessidade de métodos de produção mais limpos, que garantam a eficiência energética e reduzam ao máximo as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo de todo o ciclo de vida da biomassa em escala industrial (IEA, 2023).

A otimização dos processos industriais em larga escala, como a produção de biocombustíveis de segunda e terceira geração, a partir de resíduos celulósicos e agrícolas, são alternativas que podem auxiliar na superação dos desafios na transição para uma matriz energética mais sustentável (Gil, 2022). A implementação de recursos energéticos renováveis como a energia solar, eólica, hidrelétrica, biomassa e geotérmica, nos processos industriais de biocombustíveis, também podem contribuir com a diversificação da matriz energética e nas reduções de GEE, por apresentarem baixa ou nenhuma emissão de gases poluentes (Gómez et al., 2023).

A utilização da biomassa de microalgas para produção de combustíveis renováveis por liquefação hidrotermal (LHT) pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis,

por meio da conversão da biomassa de alto teor de umidade em biopetróleo bruto líquido (Dandamudi et al., 2020). Apesar de haver um crescimento significativo no uso de recursos energéticos renováveis, impulsionado por avanços tecnológicos, incentivos governamentais, preocupações ambientais e redução dos custos de instalação e operação, são necessários maiores investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias mais eficientes (EPE, 2023).

Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar através do ciclo de vida a produção de biopetróleo proveniente da biomassa de microalgas por liquefação hidrotermal em escala industrial a partir da análise da demanda energética e ambiental. O presente trabalho está estruturado conforme descrito.

No capítulo 2 são apresentados os objetivos, geral e específicos, do trabalho. No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a bioenergia no contexto energético global, a diversidade e potencial de biocombustíveis e bioenergia a partir de biomassa. Além da aplicação das microalgas, os sistemas de cultivo, as técnicas de colheita e beneficiamento da biomassa de microalgas. Também são apresentados os principais bioprodutos com suas aplicações, bem como os estudos relacionados sobre avaliação de ciclo de vida na produção de biopetróleo utilizando a biomassa de microalgas e o beneficiamento por liquefação hidrotermal.

O capítulo 4 apresenta a metodologia empregada para o estudo da produção de biopetróleo a partir da biomassa de microalgas por liquefação hidrotermal em diferentes regimes nutricionais das espécies selecionadas. Também são apresentadas as equações e metodologias de quantificação do rendimento do biopetróleo com seus coprodutos e demais análises. No capítulo 5 os resultados referentes a produção de biopetróleo, a demanda energética e ambiental e as análises de sensibilidade. O capítulo 6 as discussões sobre o efeito da composição da biomassa e o desempenho dos cenários estudados.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho com sugestões para pesquisas futuras. Nos apêndices constam as tabelas complementares com os resultados da demanda energética e pegada de carbono a partir da análise de sensibilidade do tempo de cultivo e da variação do parâmetro de calor na entrada da liquefação hidrotermal. Nos anexos são apresentados os dois artigos científicos. O primeiro artigo Pegada de carbono da liquefação hidrotermal da biomassa de microalgas cultivadas em disponibilidade e limitação de nutrientes publicado na revista *Journal of Bioengineering, Technologies and Health*. O segundo artigo Liquefação hidrotermal da biomassa de microalgas cultivadas em regime variado de nutrientes e espécies: a demanda de energia e a pegada de carbono submetido a revista *Journal Biomass and Bioenergy*.

2 Objetivos

2.1 Objetivo geral

Este trabalho de mestrado tem como objetivo avaliar o ciclo de vida da produção de biopetróleo a partir da biomassa de microalgas por liquefação hidrotermal a partir da análise energética e ambiental.

2.2 Objetivos específicos

Considerando o objetivo geral apresentado acima, este trabalho tem como objetivos específicos:

- identificar os cenários mais satisfatórios a partir dos rendimentos preditivos de biopetróleo e seus coprodutos das microalgas *Secnedesmus acutus*, *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis granulata* em regimes nutricionais distintos;
- avaliar a demanda energética e ambiental, retorno do investimento em energia e a pegada de carbono dos cenários em estudo;
- avaliar o efeito do tempo antes da colheita da biomassa de microalgas, identificando a influência desse parâmetro através da produtividade;
- avaliar o efeito do parâmetro calor na entrada da liquefação hidrotermal a partir da demanda de energia e pegada de carbono nos cenários de demanda de calor inferior e superior.

3 Revisão bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o papel da bioenergia e o potencial dos biocombustíveis a partir da biomassa. Além da aplicação da biomassa de microalgas e os principais sistemas de cultivo, técnicas de colheita e beneficiamento. Os principais bioprodutos com suas aplicações e conceitos sobre a avaliação do ciclo de vida também são apresentados subsequentemente.

3.1 O Papel da bioenergia no contexto energético global

A bioenergia emerge como a principal força motriz das fontes de energia renovável em escala global e apresenta grande relevância no cenário energético futuro (Manikandan et al., 2023). Os fundamentos que cercam sua implementação, tais como a disponibilidade de biomassa, a competição entre diversos usos da mesma e as implicações de sustentabilidade, figuram como elementos cruciais a serem abordados (Chauhan, 2023).

Apesar das incertezas que permeiam esse horizonte, as estimativas apontam para a capacidade da biomassa em desempenhar um papel de destaque no sistema global de fornecimento de energia (Kumar et al., 2023). Projeções indicam a possibilidade de ampliar a contribuição da bioenergia dos atuais 56 exajoules (EJ) para expressivos 145 EJ até o ano de 2060, com um enfoque crescente na bioenergia moderna, em detrimento do uso tradicional da biomassa (Ishizaki e Hasumi, 2014). É fundamental destacar que a bioenergia desempenha um papel específico e essencial na descarbonização de setores que carecem de alternativas viáveis ou que enfrentam severas limitações, a exemplo do transporte rodoviário de carga, da aviação e do transporte marítimo (Binod et al., 2010).

O potencial futuro da bioenergia está intrinsecamente ligada à capacidade de mobilização de quantidades substanciais de biomassa (Ahanchi et al., 2022). Nesse contexto, o comércio de biomassa, seja de forma direta ou indireta, emergirá como um componente de crescente importância no desenvolvimento dessa fonte energética (Aghbashlo et al., 2021). Entretanto, políticas direcionadas para energia e clima são necessárias para assegurar um fornecimento energético competitivo, sustentável e seguro (Sauter et al., 2013). Avanços recentes no campo das energias renováveis e melhorias tecnológicas têm conduzido a uma redução substancial nos custos de investimento, sobretudo para energia eólica e solar fotovoltaica, tornando a bioenergia competitiva em muitos contextos, especialmente quando se dispõe de matérias-primas de biomassa acessíveis a baixo custo, ou até mesmo com custos negativos, a exemplo das microalgas (Kinney e Clemente, 2005).

A implementação de medidas contundentes são premissas para o avanço da bioenergia e a transição para um sistema energético com baixas emissões de carbono (Singh, 2012).

Essas políticas devem incluir metas de redução de emissões, energias renováveis e estratégias de eliminação progressiva dos combustíveis fósseis (Dreher et al., 2011). Este suporte político deve ser diferenciado conforme as tecnologias, as matérias-primas e o porte das instalações, levando em consideração as especificidades de cada contexto, com vistas a promover o desenvolvimento equilibrado do mercado e a diversificação adequada dos sistemas energéticos (Yacobucci, 2011).

A sustentabilidade da biomassa, as pesquisas demonstram que as vias das bioenergias resultam em menores emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com os sistemas de energia baseados em combustíveis fósseis (Singh e Olsen, 2011). As emissões de GEE podem ser ainda mais reduzidas e aproximadas da neutralidade de carbono se a biomassa for produzida com baixo consumo de energia ou proveniente de fluxos de resíduos, com eficiência de conversão elevada e o uso de energia renovável (Collet et al., 2015). Outros aspectos incluem a quantidade e o tipo de combustíveis fósseis utilizados na produção, transporte e processamento da biomassa, bem como a eficiência do processo de conversão (Carraretto et al., 2004).

A produção de bioenergia, pode gerar oportunidades substanciais para proporcionar benefícios sociais, ambientais e econômicos associadas as metas de mitigação das mudanças climáticas e as aspirações energéticas (Cavalett e Ortega, 2010). A bioenergia se apresenta como uma força propulsora para os mercados agrícolas e possui o potencial de impulsionar o desenvolvimento sustentável nas comunidades rurais (Walter et al., 2011). Os benefícios e impactos dos biocombustíveis e da produção de bioenergia são intrinsecamente dependentes do contexto específico em que se inserem e serão detalhadas na seção seguinte.

3.2 Diversidade e potencial dos biocombustíveis e bioenergia a partir de biomassa

A produção de biocombustíveis e a geração de bioenergia a partir de biomassa e matérias orgânicas representam abordagens cruciais na busca por fontes de energia sustentáveis e renováveis, capazes de substituir os tradicionais derivados do petróleo (Carraretto et al., 2004). A diversidade de fontes disponíveis, como materiais lignocelulósicos, óleos vegetais, óleo de peixe, gorduras animais e microalgas, torna essas alternativas versáteis e viáveis do ponto de vista termodinâmico (Savi et al., 2017).

A utilização de biomassa como fonte de energia surge como uma promissora solução para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para mitigar o impacto ambiental, como indicado por estudos recentes (Li et al., 2023; Li et al., 2021b). A biomassa, composta por matéria orgânica não fóssil proveniente de gramíneas, árvores, flores, caules e outros recursos naturais, apresenta um potencial viável como fonte de energia renovável (Rozzi et al., 2020). Contudo, é importante ressaltar que, mesmo quando se considera o consumo direto de produtos agrícolas, como fibras, grãos e frutos, uma proporção subs-

tancial da biomassa total provém das terras agrícolas (Ab Rasid et al., 2021).

A biomassa abrange todo material biológico e pode ser categorizada como biomassa lignocelulósica ou não lignocelulósica (Börjesson e Tufvesson, 2011). As estimativas apontam que, até 2050, a energia renovável de biomassa deverá dominar cerca de dois terços do uso direto de energia renovável. Além disso, a utilização de resíduos provenientes de substratos lignocelulósicos se mostra como uma fonte promissora para a geração de bioenergia, podendo substituir os recursos energéticos convencionais (Cherubini e Strømman, 2011).

Numerosos processos de conversão permitem a transformação de diferentes fontes de biomassa em uma variedade de produtos químicos e combustíveis para valorizar a biomassa (Menten et al., 2013). A valorização da biomassa oferece benefícios significativos para a indústria de bioenergia, reduzindo custos e oferecendo abordagens financeiramente viáveis. Nesse contexto, é crucial adotar abordagens de baixo custo, explorando novas tecnologias, incluindo ingredientes de alta qualidade, técnicas acessíveis de fabricação e métodos inovadores de validação de produtos (Eloffy et al., 2022).

A primeira geração de biomassa envolve culturas desenvolvidas especificamente para a produção de biodiesel e etanol a partir de culturas não destinadas à alimentação humana, amido e açúcar (Singh e Olsen, 2013). A segunda geração utiliza matérias-primas diferentes, como resíduos agroindustriais, palha de arroz, palha de trigo, cavacos de madeira, entre outros (Lin e Lu, 2021). A terceira geração recorre principalmente a microrganismos aquáticos não comestíveis, derivados de microalgas, apresentando rendimentos até 10 vezes maiores que os biocombustíveis de segunda geração (Elgarahy et al., 2023).

As fontes de microrganismos geneticamente modificados fazem parte da quarta geração de biomassa. As microalgas se destacam devido ao potencial de aprimoramento genético para atingir uma maior produtividade (Ghosh e Das, 2020). A biomassa ocupa uma posição de destaque entre as fontes de energia renovável no fornecimento global de energia, figurando como a terceira opção mais importante (Jennita Jacqueline et al., 2022). As microalgas e seus sistemas de produção serão apresentados nas seções posteriores.

3.3 Microalgas

As microalgas são microrganismos unicelulares, geralmente encontrados em águas salgadas e doces que podem se adaptar a diferentes condições ambientais e crescerem rapidamente. Esses microrganismos conseguem converter a energia solar de maneira eficiente e são responsáveis por uma parte das atividades fotossintéticas terrestre. Além disso, as microalgas possuem potencial para geração de energia a partir de processos biotecnológicos e recursos renováveis (Kim, 2015).

A classificação dos diferentes grupos de microalgas é realizada de acordo com as características estruturais das espécies, conforme as pigmentações das estruturas celula-

res de cada filo, as *Cyanophyceae* são classificadas como algas azuis, *Rhodophyta* são as algas vermelhas, *Chlorophyta* algas verdes e *Pheophyceae* algas marrons. As microalgas *Scenedesmus acutus*, *Chlorellavulgaris* e *Nannochloropsis granulata* estudadas no presente trabalho, fazem parte do filo *chlorophyta* (Champenois et al., 2015; Chew et al., 2017).

Na figura 1 é apresentada uma microscopia das células de *Scenedesmus acutus*, *Chlorella vulgaris* e *Nannochloropsis granulata*. As microalgas são compostas principalmente de proteínas, carboidratos e lipídeos e os diâmetros das células variam de 3 a 20 μm (Ali e Saleh, 2012). Estas espécies possuem uma alta biofixação de CO_2 , alta produtividade de lipídios e alto teor de ácidos graxos ômega-3, comumente utilizadas na produção de biocombustíveis, tais como biodiesel (Ma et al., 2016; Sacristán de Alva et al., 2013).

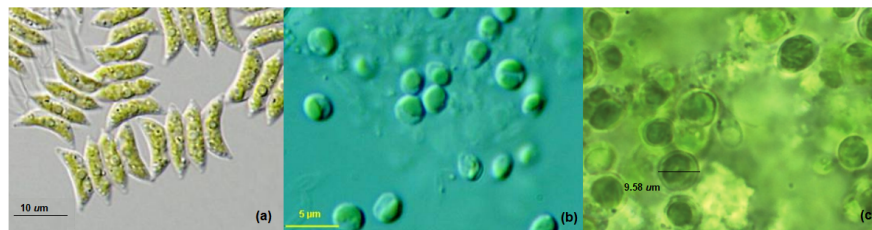


Figura 1 – Microscopia das células: (a) *Scenedesmus acutus*, (b) *Nannochloropsis granulata* e (c) *Chlorella vulgaris*

Fonte: Bigelow NCMA.

Algumas espécies de microalgas acumulam compostos de valor agregado, que podem ser utilizadas na alimentação humana, aplicados como aditivos na indústria de alimentos e farmacêutica. (Valverde et al., 2016). As proteínas são um dos compostos presentes nas microalgas, são polímeros formados por aminoácidos ligados entre si e possuem uma compactada estrutura molecular (Soni et al., 2017). Os carboidratos são compostos que possuem a função de fornecimento de energia (Wang et al., 2022). Os lipídeos são utilizados na formação das membranas plasmáticas e como reserva de energia nas microalgas. As concentrações dos compostos presentes nas células das microalgas variam conforme as espécies e condições de cultivo (Schüler et al., 2017). A seguir são apresentados com maiores detalhes os principais sistemas de cultivo de microalgas.

3.4 Sistemas de cultivo

Os sistemas de cultivo de microalgas são utilizados para maximizar o crescimento e controlar a composição desses microorganismos (Díez-Montero et al., 2020). Os sistemas fechados, mais conhecidos como fotobiorreatores, são capazes de atingir altos níveis de concentração e qualidade da biomassa de microalgas (Zuccaro et al., 2020). Além disso, os fotobiorreatores apresentam os seguintes benefícios em relação aos sistemas abertos:

melhor controle da temperatura, pH, entrada de nutrientes e iluminação, reduzido risco de contaminação e evaporação (Zhou et al., 2020). Entre os mais utilizados encontram-se os em placas, em colunas e tubulares (Eriksen, 2008).

Os sistemas em lagoas abertas são mais econômicos em relação aos fotobiorreatores, por serem mais simples de construir e operar, estarem sob condições naturais de temperatura, iluminação e pouco ou nenhum controle sobre os fatores ambientais (Kumar et al., 2022). Estes sistemas podem variar o formato (circulares ou alongados) e a profundidade destes tanques devem estar entre 15 a 30 cm para que a incidência luminosa ocorra de forma adequada (Banerjee e Ramaswamy, 2017).

Na figura 2 é apresentado o sistema aberto tipo *raceway open ponds* estudado no presente trabalho, em que o meio de cultura é água salina e a agitação no sistema é feito através de injeção de ar ou por pás giratórias que permitem a circulação constante de nutrientes e água, garantindo a suspensão e mistura das microalgas (Pawar, 2016). Esse processo ocorre de forma contínua com a entrada de nutrientes e CO₂ (Banerjee e Ramaswamy, 2017).



Figura 2 – *Raceway open pond*

Fonte: Santos, 2013.

A produção de microalgas foi iniciada a partir do inóculo, em que culturas puras são fornecidas continuamente ao sistema de modo a manter a produção de acordo com o planejamento. O inóculo contém 10% do volume total do *raceway*, mantido em condição de esterilidade (Becker, 2004). Após a etapa de cultivo, em que houve o crescimento das microalgas, estas seguem para a etapa de colheita (Díez-Montero et al., 2020). Na seção subsequente são apresentadas as principais técnicas de colheita da biomassa de microalgas.

3.5 Técnicas de colheita

A técnica de colheita é uma etapa crítica no processo de produção da biomassa de microalgas, pois são organismos microscópicos e, portanto, requerem técnicas específicas na separação do meio de cultivo (Esteves et al., 2020). A escolha da técnica não dependerá apenas da espécie de microalga e do produto, mas são também levados em consideração fatores como potencial de exploração do recurso biológico, os custos operacionais, demanda energética do processo, risco de contaminação e eficiência na separação (Barros et al., 2015).

As espécies de microalgas que possuem células maiores tendem a uma elevada eficiência na separação por serem mais fáceis de sedimentar e autoflocularem (Xu et al., 2023). Um método aplicado que pode aumentar a eficiência na separação é a combinações de técnicas, estas incluem a sedimentação, filtração e centrifugação, estudadas no presente trabalho, conforme apresentado na Tabela 1. (Ferreira et al., 2020).

Tabela 1 – Principais características das técnicas de colheita de microalgas.

Técnicas de colheita	Concentração de sólidos (SST)	de	Confiabilidade	Limitações
Filtração	1-6%		Média	Periódicas manutenções nos filtros
Sedimentação	0.5-1.5%		Média	Processo lento
Centrifugação	>22%		Elevada	Elevado consumo de energia
Eletroflotação	3-5%		Elevada	Substituições periódicas dos eletrodos
Floculação	N.I.		Elevada	Alto custo dos floculantes e risco de contaminação

Adaptado de (Enamala et al., 2018). N.I. = Não informado.

A sedimentação por gravidade é considerado uma técnica simples e de baixo custo, em que as microalgas se depositam naturalmente no fundo de uma lagoa ou tanque, aproveitando sua densidade celular (Ortiz et al., 2021). A filtração consiste em um processo físico de separação do fluido e as partículas sólidas em suspensão, que são retidas por membranas ou filtros. As membranas são caracterizadas por serem mais seguras e eficientes neste processo (Pires et al., 2012).

A centrifugação é uma técnica extremamente eficiente na separação da biomassa de microalgas, a eficiência da remoção equivale a 80-90% . O processo envolve aplicação

da força centrífuga, em que a velocidade e a duração variam conforme as características das espécies (Najjar e Abu-Shamleh, 2020). A eletroflotação ocorre por um processo eletroquímico, em que as microalgas são flotadas através de microbolhas de oxigênio e hidrogênio produzidas durante a eletrólise (Kyzas e Matis, 2016).

A floculação é uma técnica em que é adicionado agentes floculantes químicos tais como, sulfato férrico ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$), cloreto férrico (FeCl_3) e sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Os flocos são formados e decantam a partir da interação entre essas moléculas, que possuem cargas positivas com as microalgas, que geralmente apresentam cargas negativas e a eficiência da remoção é de 95% (Zardo, 2011). A maioria das técnicas de colheita apresentam limitações, tais como risco de contaminação, consumo elevado de energia. A etapa posterior a colheita é o beneficiamento da biomassa de microalgas e na seção a seguir são apresentados detalhes das principais técnicas.

3.6 Técnicas de beneficiamento

O beneficiamento da biomassa de microalgas refere-se às etapas de conversão que ocorrem após a colheita, com o objetivo de gerar produtos de maior valor agregado a partir da biomassa colhida (Sousa et al., 2023). A biomassa de microalgas pode ser transformada em diferentes produtos finais através de rotas bioquímicas, termoquímicas, reações químicas ou combustão direta (Brennan e Owende, 2010).

As rotas termoquímicas envolvem processos químicos em alta temperatura para conversão da biomassa em bioproductos (Hossain et al., 2022). Entre as rotas termoquímicas tem-se a gaseificação, pirólise e liquefação hidrotermal. Estes processos decompõem termicamente a biomassa de microalgas resultando na formação de produtos como biopetróleo, gases combustíveis e biocarvão (Chen et al., 2022).

A gaseificação é um processo em que a biomassa é aquecida em uma atmosfera de ar ou vapor a altas temperaturas geralmente acima de 700°C e pressões controladas, produz gás combustível, conhecido como gás de síntese (Adnan e Hossain, 2018). O gás de síntese é composto principalmente por hidrogênio (H) e monóxido de carbono (CO), que podem ser empregados para a produção de energia elétrica, térmica e síntese de produtos químicos (Adnan e Hossain, 2019).

A pirólise é uma técnica de conversão que ocorre na ausência de oxigênio e em elevadas temperaturas, geralmente entre 400°C e 600°C (Pannase R.K. Singh, 2020). Esse processo remove a umidade e compostos voláteis da biomassa, produzindo biopetróleo, gases e um material sólido com maior densidade energética, conhecido como biocarvão, que pode ser utilizado como combustível ou como um aditivo para melhorar as propriedades do solo (Yang et al., 2023). O processo necessita de uma etapa de secagem da biomassa anterior ao beneficiamento para redução do teor de umidade (Khan J.H. Shin, 2018).

A liquefação hidrotermal envolve a decomposição da biomassa em altas pressões e temperaturas, produz biopetróleo, biocarvão e gases (Liu et al., 2023). No entanto, apesar da liquefação hidrotermal ser considerada uma tecnologia promissora, é importante avaliar aspectos como a eficiência energética e impacto ambiental para a conversão da biomassa de microalgas (Batista A. Converti, 2023). A seguir são apresentados mais detalhes sobre o processo de liquefação hidrotermal.

3.7 Liquefação hidrotermal

A liquefação hidrotermal (LHT) é um processo termoquímico, em que moléculas da biomassa são hidrolisadas e são obtidos: óleo bruto, fase gasosa, fase sólida e efluente aquoso (Guo et al., 2019). O processo ocorre em condições subcríticas com temperaturas na faixa de 250°C e 400°C e pressões entre 10 MPa e 25 MPa (Chen et al., 2016). A água em estado líquido que se mantém em equilíbrio com o vapor saturado desempenha o papel de catalisador e reagente na reação (Rudol, 2011; Eboibi et al., 2014).

A LHT se apresenta como um processo vantajoso por não necessitar da etapa de secagem prévia da biomassa para sua conversão (Guo et al., 2019). O óleo bruto também conhecido como biopetróleo é o produto líquido principal do processo, é imiscível em água, possui um alto conteúdo energético, que pode ser refinado e utilizado como combustível (Ramírez-Romero et al., 2023). O rendimento total do biopetróleo depende das condições do processo e da composição da biomassa (López Barreiro et al., 2013).

A fase gasosa produzida na LHT pode conter dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e monóxido de carbono (CO), que são liberados como subprodutos. Esses gases podem ser utilizados como fonte de energia e direcionados para outros processos industriais (He et al., 2000).

A LHT também produz efluente aquoso como subproduto, essa água residuária gerada pelo processo é rica em nutrientes e orgânicos, tais como açúcares, aromáticos, múltiplos fenóis e pode ser utilizada para fins adicionais, como a produção de biogás (Rout et al., 2023). Ao final do processo de liquefação hidrotermal, uma fase sólida é gerada, geralmente chamada de hidrocarboneto sólido ou biocarvão. Esse material pode ser utilizado como uma fonte de energia adicional, como combustível, ou como um aditivo para melhorar as propriedades do solo (Arun et al., 2020). Na figura 3 é apresentado o processo de liquefação hidrotermal e seus bioprodutos, estudados no presente trabalho.

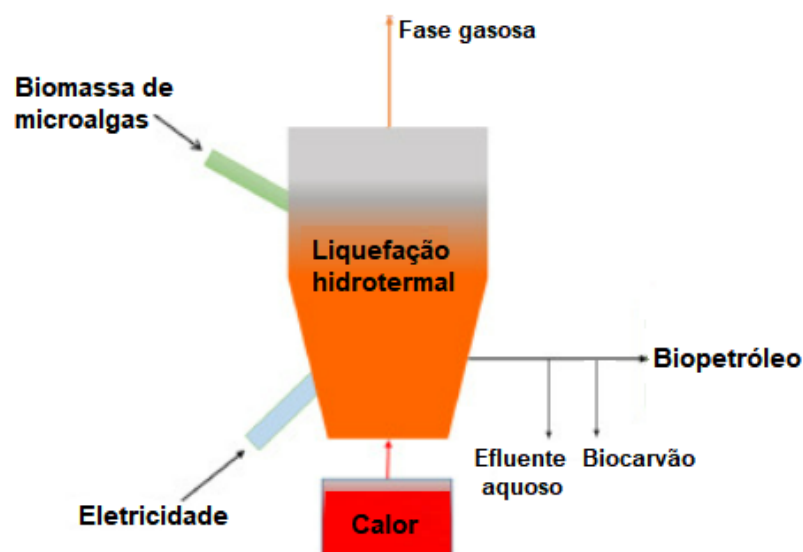


Figura 3 – Liquefação hidrotermal

A escolha da técnica de beneficiamento da biomassa de microalgas depende das condições operacionais e do produto de valor agregado desejado (Elliott et al., 2015). Na seção seguinte são apresentados diferentes bioprodutos da biomassa de microalgas.

3.8 Bioprodutos

A biomassa de microalgas pode ser utilizada para produzir variedades de bioprodutos com diferentes aplicações (Calijuri et al., 2022). Na indústria de alimentos os carotenoides e as ficocianinas são utilizados como corantes (Dufossé et al., 2005). As ficocianinas são pigmentos azuis produzidos a partir da microalga *Spirulina* e aplicados em alimentos, como geleias, produtos lácteos, gomas (Martinez et al., 2017).

Na aquicultura as microalgas são aplicadas na alimentação de alguns moluscos, peixes e crustáceos (Silva et al., 2003). Nas indústrias farmacêuticas, os carotenoides e luteína compostos da microalga *Heterochlorella luteoviridis* estão presentes em medicamentos relacionados com a diminuição dos riscos de doenças cardiovasculares, doenças maculares e o câncer (Peng et al., 2016; Chung et al., 2017).

As microalgas *Chlorella vulgaris* e a *Tetraselmis chui* apresentam um alto teor de proteína e pode ser utilizada na produção de alimentos funcionais, como barras energéticas, shakes, cápsulas e pós nutricionais (Bartek et al., 2021). Na indústria de cosméticos os extratos de microalgas são empregados em cremes, loções, máscaras faciais, produtos para cuidados com o cabelo e outros produtos de beleza (Khoo et al., 2023).

A biomassa de microalgas pode ser utilizada para a produção de biogás, bioetanol e biocarvão e aplicados em processos de combustão, compostos químicos, fertilizantes

e rações animais (Choo et al., 2020). No entanto, viabilizar a produção e comercialização de bioprodutos de microalgas em larga escala depende de aprimoramentos dos sistemas, da seleção de espécies mais produtivas, desenvolvimento de técnicas de colheita e processamento (Yousuf, 2020).

As pesquisas e os desenvolvimentos nesse campo continuam avançando para superar os obstáculos técnicos e econômicos e explorar ainda mais o potencial das microalgas (Koutra et al., 2020). Diferentes rotas de beneficiamento podem ser combinadas para maximizar a utilização da biomassa de microalgas em um conceito de biorrefinaria (Figura 4) (Batista A. Converti, 2023).

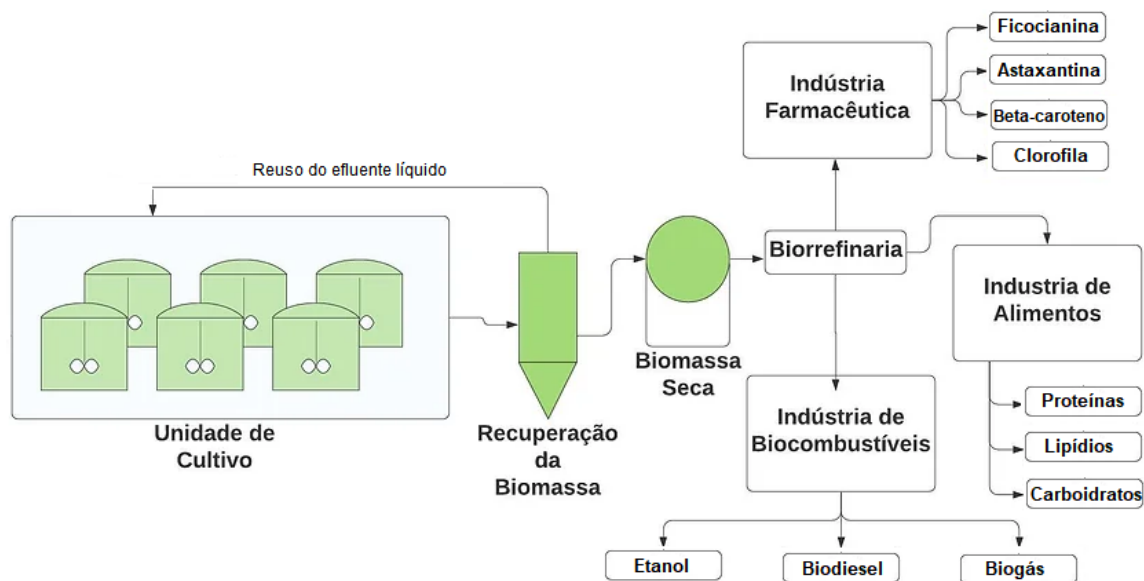


Figura 4 – Bioprodutos de microalgas

Fonte: Wang et al., 2015.

A incorporação desse conceito na cadeia produtiva é uma forma de aprimorar os processos e promover a viabilidade energética, ambiental e econômica para alcançar a efetividade na produção em escala comercial (Behr e Seidensticker, 2020). No entanto, mesmo com avanços contínuos na pesquisa e nas tecnologias de produção e beneficiamento da biomassa de microalgas, existem desafios técnicos, viabilidade econômica e ambiental para a produção de commodities (Sadvakasova et al., 2023). A seção subsequente apresenta conceitos sobre a avaliação do ciclo de vida para análise da viabilidade energética e ambiental.

3.9 Avaliação do ciclo de vida

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta usada para avaliar os impactos ambientais associados a um produto, processo ou serviço ao longo de todo o

seu ciclo de vida, desde a extração de matérias-primas até o pós-uso. É uma abordagem abrangente que considera todas as etapas do ciclo de vida, incluindo a produção de insumos, fabricação, transporte, uso e disposição final (Kazemi et al., 2023). É feito um levantamento detalhado do inventário de materiais, energia e emissões associados a cada etapa do ciclo de vida do produto ou processo. Isso envolve coletar dados sobre as matérias-primas, energia consumida, emissões atmosféricas, resíduos gerados e transporte, entre outros aspectos (Pannase R.K. Singh, 2020).

Na avaliação de impactos, os dados do inventário são convertidos em indicadores de impacto ambiental, como emissões de gases de efeito estufa, consumo de energia, entre outros. Esses indicadores são avaliados e agregados para fornecer uma visão abrangente dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida (Pragya e Pandey, 2016). Essa identificação contribui para otimizações nos processos, comparação com outros produtos e auxílio na tomada de decisões mais sustentáveis ao longo do ciclo de vida do sistema de produção (Jorquera et al., 2010).

A caracterização dos impactos ambientais na produção de biomassa de microalgas, considerando isoladamente as etapas de cultivo, colheita e beneficiamento, é um primeiro passo importante para avaliar o desempenho ambiental dessa cadeia produtiva (Khoo et al., 2011). Após a caracterização inicial dos impactos ambientais, é possível simular diferentes cenários para identificar aqueles que sejam mais adequados à produção de biomassa de microalgas, levando em consideração os critérios como menor impacto ambiental (Gnansounou et al., 2009).

A demanda de energia é considerada um indicador indireto de impacto ambiental porque o consumo de energia geralmente está associado à emissão de gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), que contribuem para as mudanças climáticas (Kazemi et al., 2023). Além disso, o consumo de energia envolve a extração de recursos naturais não renováveis, como petróleo e carvão, exceto quando ocorre um acidente, a agricultura em novas áreas tende a impactar mais que a extração de petróleo e o processo de geração de energia a partir de combustíveis destas fontes pode gerar poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, que afetam a qualidade do ar e a saúde humana (Deprá et al., 2020).

A pegada de carbono é uma forma de quantificar o impacto ambiental relacionado às mudanças climáticas de uma atividade específica, que envolve oportunidades de redução das emissões de GEE, como a melhoria da eficiência energética, a adoção de fontes de energia renovável, a otimização da logística e minimização de resíduos (Winter et al., 2017). O risco à saúde humana associado a um processo industrial ou atividade também pode ser quantificado através de indicadores como ar poluído, risco de câncer, risco à saúde humana, formação fotoquímica de ozônio (Winter et al., 2017). A avaliação da demanda de energia e das emissões de GEE na ACV permite identificar as etapas do ciclo de vida

que contribuem significativamente em cada categoria para apoiar a proposição de cenários de melhoria de desempenho energético e ambiental (Lassio Alessandra Magrini, 2021).

3.10 Aspectos e impactos da liquefação hidrotermal

Numerosos estudos têm apontado parâmetros-chave dentro do processo LHT que exercem uma influência significativa no rendimento do bioproduto (Tabela 2). Temperaturas elevadas são fundamentais para alterar a solubilidade em água e quebrar ligações peptídicas, levando a um aumento do rendimento de biopetróleo. No entanto, é crucial notar que o rendimento do biopetróleo tende a diminuir após atingir uma temperatura de pico devido à formação de gases e biocarvão (Sharma et al., 2021). Além disso, pressões que excedem condições supercríticas podem reduzir a produção de biopetróleo em HTL, restringindo a fragmentação de moléculas orgânicas (Biswas et al., 2017).

O desafio no desenvolvimento de processos LHT está em encontrar um equilíbrio entre a produção e conversão de biomassa de microalgas. Por exemplo, entre as várias espécies de microalgas estudadas, aquela que apresenta o maior sequestro de CO₂ não manifesta necessariamente o maior potencial de mitigação de CO₂ ao longo de todo o seu ciclo de vida (Lu et al., 2006). *Synechococcus* sp. apresenta o maior potencial de emissão combinada de CO₂ devido à sua elevada demanda de energia (Al-Jabri et al., 2022). Abordar esses trade-offs dentro da cadeia de suprimentos de produtos baseados em microalgas, como a transição para fontes de energia mais limpas para a LHT, torna-se crucial (Mathur et al., 2022).

Em uma comparação entre o biodiesel de soja e o biocombustível de microalgas produzido através da LHT, o biodiesel de soja atualmente detém uma vantagem competitiva no mercado devido a considerações de preços (Zhang et al., 2022). No entanto, é essencial reconhecer que a pegada de carbono do biodiesel de soja é maior (Nava-Bravo et al., 2021). Pesquisas recentes têm explorado o impacto da reciclagem de nutrientes sobre insumos energéticos e emissões de gases de efeito estufa, revelando reduções de 20% e 30%, respectivamente (Zhang et al., 2022).

Outra abordagem promissora envolve a produção de biomassa utilizando efluentes domésticos e a fase aquosa LHT (Marangon et al., 2022). Este método tem o potencial de reduzir o aporte de energia primária em 13% por meio da reciclagem de nutrientes. No entanto, é essencial abordar desafios relacionados à LHT, como a necessidade de reduzir o teor de cinzas de biomassa para aumentar o rendimento do biopetróleo e mitigar a formação de fase sólida. Em geral, os esforços de otimização devem ser canalizados para rotas tecnológicas que avaliem a viabilidade econômica e ambiental da produção de energia e materiais (Seghetta et al., 2016).

Tabela 2 – Inventário de primeiro plano do cultivo, colheita e liquefação hidrotérmica de processamento de biomassa de microalgas de 1 kg em sólido total

Estudo	País	Espécie	Fluxo de referência	Extensão do sistema	Software; fonte de dados	Método de avaliação de impacto
Al-Jabri et al. 2022	Qatar	<i>Tetraselmis sp.</i> , <i>Chroococcidiopsis sp.</i> , <i>Dunaliella sp.</i> e <i>Synechococcus sp.</i>	1 ton biomassa microalgal/dia	Berço ao túmulo	Gabi 9.2; Experimental	PAG; AC; EC; EU; HH; HN; OZ; SM
Chen e Quinn 2021	EUA	<i>Scenedesmus acutus</i> , <i>Nannochloropsis sp.</i> e <i>Chorella sp.</i>	1 MJ biocombustível (não especificado)	Portão ao túmulo	Dados da literatura e Ecoinvent 3.4	PAG; NER; AC; EC; EU; HH; HN; OZ; PO
Zhang et al. 2022	China	<i>Dunaliella salina</i>	100 kg biomassa microalgal	Portão ao túmulo	Simapro 7.1; Ecoinvent 2.0	PAG; AC; EC; EU; HH; OZ; RE; FF
Nava-Bravo et al. 2021	México	<i>Scenedesmus sp.</i>	1 GJ biopetróleo	Berço ao túmulo	N/a; Experimental e dados da literatura	PAG e NER
Zhang e Kendall 2019	México	<i>Scenedesmus</i>	1 MJ biocombustível (não especificado)	Berço ao portão	Gabi e Ecoinvent 3.0	PAG
Marangon et al. 2022	Brasil	<i>Chorella vulgaris</i>	1 MJ biocombustível (não especificado)	Portão ao túmulo	Simapro 8.2; Dados da literatura	PAG; AC; EC; EU; HH; FF

F AG: Potencial de aquecimento global; NER: Taxa de energia líquida; AC: Acidificação; AD: Depleção abiótica; EC: Ecotoxicidade; EU: Eutrofização; HH: Câncer na saúde humana; HN: Saúde humana não oncológica; OZ: Destruição da camada de ozônio (ar); SM: Poluição atmosférica; PO: Formação fotoquímica de ozônio; RE: Efeitos respiratórios; FF: Esgotamento de combustíveis fósseis; N/a: não aplicável.

4 Metodologia

A Avaliação do ciclo de vida (ACV) atribucional foi usado neste estudo com base na ISO-14044 para quantificar a carga energética e ambiental do processamento de biomassa de microalgas em LHT. O fluxo de referência e unidade funcional deste estudo foi de 1 kg de processamento de biomassa de microalgas em sólidos totais em LHT, enquanto as etapas do sistema de produto estenderam-se do cultivo ao processamento da biomassa.

4.1 Sistemas de produção e caracterização dos cenários

O sistema de produtos de primeiro plano consiste no cultivo em tanques abertos com produtividade média anual de $18 \text{ g } (m^2 \text{ dia})^{-1}$ em sólidos voláteis Davis e Klein, 2021, que foi convertido em sólidos totais por atualizar o inventário de primeiro plano com base em cada composição de biomassa.

O estágio de cultivo foi modelado com um suprimento de água de uma fonte local, um suprimento de dióxido de carbono de alta pureza (90%) de uma fonte residual e um suprimento de nutrientes de fertilizantes sintéticos para nitrogênio e fósforo. Na etapa de colheita, as microalgas são encaminhadas para os processos de sedimentação, filtração por membrana e centrifugação, resultando em uma biomassa de microalgas com teor de sólidos de 20% Davis e Klein, 2021.

As etapas de cultivo, colheita e processamento da biomassa de microalgas são integradas, sem necessidade de armazenamento de biomassa em local externo. Os principais parâmetros operacionais no LHT são temperatura, pressão e tempo de residência, os quais foram modelados com base em $300 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 MPa (Palomino et al., 2020) e 30 min (Chopra et al., 2020), respectivamente. A infraestrutura e a operação foram consideradas no inventário de primeiro plano, enquanto os processos a jusante, como refino, entrega, uso e pós-uso, foram desconsiderados (Figura 5).

O inventário de primeiro plano da etapa de cultivo e colheita foi obtido a partir de análises de laboratório, experimentos de campo e estimativas para o Algae Farm Model baseado em (Davis e Klein, 2021), detalhado em (Davis et al., 2016), que foi adaptado por (Medeiros e Moreira, 2022), enquanto o inventário de primeiro plano da etapa de processamento LHT foi obtido a partir de um processo em escala piloto e experimentos de campo baseados em (Knorr *et al.*, 2013) (Tabela 2).

A produção de biomassa de microalgas nos cenários avaliados é constituída por três regimes de nutrientes: colheita precoce obtida até 3 dias de cultivo antes da depleção de nitrogênio, colheita intermediária obtida em 3 a 5 dias de cultivo e colheita tardia obtida em 6 a 9 dias de cultivo após depleção de nitrogênio. A composição da biomassa

variou para cada período de cultivo, correspondendo a um alto teor de proteína (HP) na colheita precoce, alto teor de carboidratos (HC) no meio da colheita e alto teor de lipídios (HL) na colheita tardia com base em (Davis et al., 2016) para as espécies de microalgas avaliadas (Tabela 3), que foram representadas nos seguintes cenários:

- SC-HP: *Scenedesmus acutus* biomassa com alto teor de proteína;
- SC-HC: *Scenedesmus acutus* biomassa com alto teor de carboidrato;
- SC-HL: *Scenedesmus acutus* biomassa com alto teor de lipídios;
- CV-HP: *Chlorella vulgaris* biomassa com alto teor de proteína;
- CV-HC: *Chlorella vulgaris* biomassa com alto teor de carboidrato;
- CV-HL: *Chlorella vulgaris* biomassa com alto teor de lipídios;
- NG-HP: *Nannochloropsis granulata* biomassa com alto teor de proteína;
- NG-HC: *Nannochloropsis granulata* biomassa com alto teor de carboidrato;
- NG-HL: *Nannochloropsis granulata* biomassa com alto teor de lipídios.

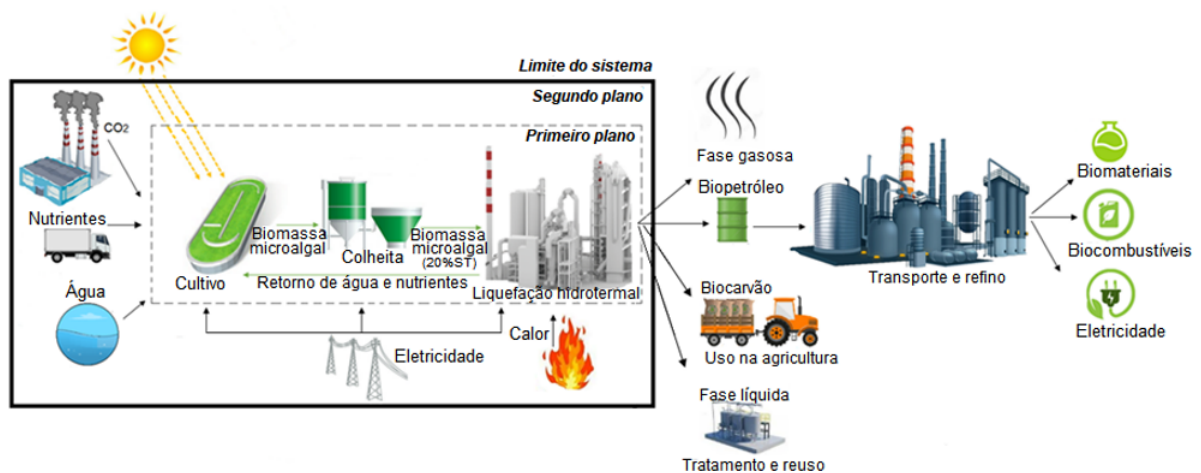


Figura 5 – Sistema de produto de processamento de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal.

Tabela 3 – Inventário de primeiro plano do cultivo, colheita e liquefação hidrotermal de 1 kg de biomassa de microalgas processada em sólidos totais.

Parâmetros	Umid	SC- HP	SC- HC	SC- HL	CV- HP	CV- HC	CV- HL	NG- HP	NG- HC	NG- HL	GSD
Cultivo e colheita^a											
Entrada											
Área ocupada	m ² ano	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.14	0.14	0.16	1.14
Água, salina	L	33.4	34.9	35.0	33.6	34.7	34.7	30.7	30.9	33.9	1.26
Dióxido de carbono, CO ₂	kg	2.005	2.147	2.289	2.196	2.268	2.273	2.006	2.020	2.219	1.16
Fertilizante sintético											
Amônia, líquida	kg	0.107	0.019	0.017	0.095	0.031	0.025	0.069	0.048	0.021	1.16
Nitrogênio, N	kg	0.088	0.016	0.014	0.079	0.026	0.020	0.057	0.039	0.017	1.16
Fosfato de diamônio	kg	0.048	0.009	0.008	0.044	0.006	0.005	0.032	0.022	0.010	1.16
Nitrogênio, N	kg	0.010	0.001	0.001	0.009	0.001	0.001	0.006	0.004	0.002	1.16
Fósforo, P ₂ O ₅	kg	0.025	0.004	0.004	0.023	0.003	0.002	0.017	0.011	0.005	1.16
Transporte de fertilizantes	t km	0.308	0.056	0.051	0.279	0.075	0.059	0.202	0.139	0.061	1.44
Electricidade	kWh	0.500	0.523	0.524	0.503	0.520	0.521	0.460	0.463	0.508	1.34
Saída											
Água, vapor	L	23.1	24.2	24.3	23.3	24.0	24.1	21.3	21.4	23.5	1.26
CO ₂ , loss, air ^b	kg	0.201	0.215	0.229	0.220	0.227	0.227	0.201	0.202	0.222	1.16
Biomassa, perda ^c	kg	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	3x10 ⁻⁴	1.36
Liquefação hidrotermal^d											
Entrada											
Electricidade	kWh	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	1.16
Calor, Gás natural	MJ	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	1.16
Saída											
Efluente aquoso ^c	kg	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	1.26

^aMedeiros and Moreira (2022); ^bDesconsiderado como pode ser de fonte renovável; ^cDesconsiderado com base no procedimento de alocação da subdivisão do processo (critério de corte); ^dKnorr et al.(2013).

Tabela 4 – Componentes da biomassa e composição elementar das espécies de microalgas em sólidos totais.

Componente da biomassa ^a (% w/w em base seca)	SC-HP	SC-HC	SC-HL	CV-HP	CV-HC	CV-HL	NG-HP	NG-HC	NG-HL
Cinzas (X_A)	6.7	2.4	2.1	6.1	3.0	2.8	14.2	13.6	5.1
Carboidratos (X_C)	39.0	52.8	42.1	27.5	55.2	36.4	20.12	20.0	16.4
Proteínas (X_P)	43.2	13.2	9.0	47.8	14.2	13.8	44.6	28.9	10.4
Lípidios (X_L)	9.2	30.1	43.3	16.7	26.0	45.5	18.5	35.2	66.4
Massa celular ^b	1.9	1.6	3.5	1.8	1.6	1.6	2.7	2.3	1.7
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Composição elementar ^a (% m/m em base seca)									
C	52.2	54.0	57.4	51.8	51.3	56.3	51.4	53.2	63.8
H	7.5	8.2	8.7	7.3	7.7	8.5	7.7	8.1	9.9
O	30.4	35.5	31.8	29.8	37.7	32.4	32.0	32.6	23.7
N	8.8	1.8	1.6	9.3	2.8	2.2	7.3	5.0	2.0
P	1.03	0.22	0.20	1.15	0.15	0.11	0.88	0.6	0.24
S	0.0	0.2	0.2	0.6	0.4	0.4	0.7	0.5	0.3
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
$PCS_{Biomassa}$ ^c MJ kg ⁻¹	24.25	24.71	26.89	24.04	23.02	26.26	24.0	24.87	31.47

^aDavis et al. (2016); ^bMassa restante; ^cPoder calorífico superior da biomassa $PCS_{Biomassa} = 0.3517 \times C + 1.1625 \times H + 0.105 \times S - 0.111 \times O + 0.0628 \times N$ (Sanguineti et al., 2015).

Tabela 5 – Coeficientes do modelo preditivo de liquefação hidrotermal para a conversão dos componentes da biomassa de microalgas em produtos.

Produto (base seca)	Unid	k_{Li}	k_{Pi}	k_{Ci}	k_{Ai}
Biopetróleo ^a	kg	0.85	0.45	0.22	0.70
Fase líquida ^a	kg	0.08	0.24	0.11	0
Fase gasosa ^b	kg	0.04	0.07	0.46	0
Biocarvão ^a	kg	0.03	0.24	0.21	0.30

^aLi et al. (2017); ^bEstimativa de outros valores calculados pela diferença usando a fórmula: { %Fase gasosa = 100% - % Biopetróleo - % Fase líquida - % Biocarvão. }

4.2 Produtos da liquefação hidrotermal e indicadores de energia

O modelo preditivo multiproduto LHT (Eq. 4.1) foi baseado em (Li et al., 2017) com parâmetros de entrada para componentes de biomassa para estimar o rendimento do produto para biopetróleo, fase líquida, fase gasosa e biochar (fração sólida) rendimentos (Tabela 4).

$$Y_i = \sum Y_{ji} = \sum k_{ji} \times X_j = k_{Li} \times X_L + k_{Pi} \times X_P + k_{Ci} \times X_C + k_{Ai} \times X_A \quad (4.1)$$

Onde Y_{ji} representa o rendimento de um produto i (kg); k_{ji} representa os coeficientes de conversão LHT de um componente de biomassa j em um produto i (kg kg⁻¹); e X_j representa o conteúdo dos componentes da biomassa de lipídios (X_L), proteínas (X_P), carboidratos (X_C) e cinzas (X_A). O teor de umidade na biomassa desidratada é de 80%, o que foi desconsiderado no produto em fase líquida, embora tenha sido considerado como effluente aquoso no LHT.

O maior poder calorífico da biomassa de microalgas em base seca ($PCS_{Biomassa}$ em MJ kg⁻¹) (Tabela 3) foi estimado a partir da composição elementar das espécies avaliadas usando a Eq. 4.2 de Boie (Sanguineti et al., 2015), onde C, H, N, O e S representam a fração de massa do elemento.

$$PCS_{Biomassa} = 0.3517 \times C + 1.1625 \times H + 0.105 \times S - 0.111 \times O + 0.0628 \times N \quad (4.2)$$

O $PCS_{Biopetroleo}$ foi definido a partir de estudos que realizaram uma análise experimental do biopetróleo de *Scenedesmus acutus*, *Chlorella sp.* e *Nannochloropsis sp.*, que obteve 36,7 MJ kg⁻¹ (Vardon et al., 2012), 35,8 MJ kg⁻¹ (Xu et al., 2019) e 42,1 MJ kg⁻¹ (Shakya et al., 2018), respectivamente. Os indicadores como recuperação de energia (ER) e retorno sobre o investimento em energia (EROI) foram usados para avaliar o desempenho energético do sistema de conversão de energia de biomassa de microalgas. A recuperação de energia na forma de biopetróleo foi estimada na Eq. 4.3 (Biller e Ross, 2011), onde PCS representa o conteúdo unitário de energia (MJ MJ⁻¹) e MF representa a fração de massa (kg kg⁻¹ em base seca) para biopetróleo e biomassa de microalgas.

$$ER = \frac{PCS_{Biopetroleo} \times MF_{Biopetroleo}}{PCS_{Biomassa} \times MF_{Biomassa}} \quad (4.3)$$

O EROI é um indicador que relaciona produção de energia e insumos de energia, que foi estimado na Eq. 4.4 (Wang et al., 2021).

$$EROI = \frac{E_{sai}}{E_{entra}} \quad (4.4)$$

$$EROI_{Biomassa\ processada} = \frac{PCS_{Biomassa} \times MF_{Biomassa}}{CED} \quad (4.5)$$

$$EROI_{Biopetroleo} = \frac{PCS_{Biopetroleo} \times MF_{Biopetroleo}}{Rendimento_{Biopetroleo} \times CED} \quad (4.6)$$

Onde E_{sai} (MJ) é a quantidade de energia produzida como produto do processo de conversão de biomassa e E_{entra} (MJ) é a energia não renovável e renovável investida no processo de produção de a mesma quantidade de energia da biomassa. Neste estudo, a eficiência energética do sistema foi medida considerando o EROI da biomassa processada, que representa o retorno energético da biomassa de microalgas no processamento desde o cultivo até o LHT (Eq. 4.5), e o EROI do biopetróleo, que é a relação entre a demanda de energia no processamento da biomassa e o rendimento do biopetróleo (Eq. 4.6).

4.3 Recursos, variabilidade e análise de sensibilidade

A fase de avaliação de impacto utilizou o software openLCA® 1.11.0 com o banco de dados ecoinvent™ versão 3.6 para um procedimento de alocação de subdivisão de processos (critérios de corte). A distribuição de incerteza lognormal foi definida para o inventário de primeiro plano para usar o desvio padrão geométrico (GSD) (Tabela 2), que foi complementado com os parâmetros de incerteza dentro dos processos unitários do inventário de segundo plano, para executar a simulação de Monte Carlo em 1000 interações para obter no menor (5% percentil) e maior (95% percentil) valores para cada categoria avaliada. O desvio padrão geométrico relativo para 95% das corridas de Monte Carlo de cada categoria avaliada foi obtido na Eq. 4.7 baseado em Rosenbaum et al. (2018).

$$GSD_{95\%} = \sqrt{97.5^{th}\ percentile / 2.5^{th}\ percentile} \quad (4.7)$$

Em relação aos principais parâmetros deste estudo, duas análises de sensibilidade foram consideradas. Os cenários base foram modelados com base na hipótese de uma mesma produtividade de cultivo atribuída a diferentes composições de biomassa de microalgas de cada espécie e o tempo antes da colheita.

A primeira análise de sensibilidade desconsiderou a influência dos cenários de alto teor de proteína nos cenários de alto teor de carboidratos e alto teor de lipídios para entender a influência do conteúdo bioquímico da biomassa microalgal nas categorias avaliadas. As adequações de infraestrutura e demanda de energia elétrica também foram consideradas na primeira análise de sensibilidade para cada época de cultivo antes da colheita com base no coeficiente de proporcionalidade. O coeficiente de proporcionalidade para cada cenário é a razão entre o tempo médio de colheita e o tempo médio de colheita tardia, que foi admitido 1 em HP, 2 em HC e 3,75 em HL. O tempo médio de colheita foi calculado a partir da média aritmética dos tempos de colheita do cenário base, assumindo 2 dias em colheita precoce, 4 dias em colheita média e 7,5 dias em colheita tardia.

A segunda análise de sensibilidade foi realizada para identificar a influência da demanda de calor em LHT para as categorias avaliadas, que passou de $5,7 \text{ MJ kg}^{-1}$ biomassa processada para 3 MJ no cenário de menor demanda de calor e 10MJ no cenário de maior demanda de calor. O tempo médio considerado para estimar o fator de proporcionalidade foi calculado a partir da média aritmética da época de colheita.

5 Resultados

Este capítulo apresenta os estudos da ACV da produção de biopetróleo a partir da biomassa de microalgas por liquefação hidrotermal do presente trabalho: 1) quantificação do rendimento de biopetróleo e coprodutos, 2) avaliação da demanda energética e pegada de carbono da produção de biopetróleo a partir da liquefação hidrotermal, 3) Avaliação do efeito do tempo antes da colheita da biomassa de microalgas, 4) Avaliação do parâmetro de calor na entrada do LHT.

Primeiramente, são quantificados os rendimentos de cada bioproduto da LHT identificando os cenários mais favoráveis. Em seguida, são apresentados os resultados da demanda de energia e ambiental, identificando os cenários mais favoráveis do retorno do investimento em energia para o processamento da biomassa, em biopetróleo, o retorno de energia e a pegada de carbono. Além das análises de sensibilidade do tempo de colheita e do parâmetro de calor na entrada do LHT.

5.1 Efeito da composição da biomassa

O estudo relatou implicações notáveis sobre a influência da composição da biomassa de microalgas no processo LHT e subsequente rendimento de biopetróleo, eficiência energética e pegada de carbono. A composição da biomassa de microalgas foi identificada como um fator significativo influenciando as reações e os resultados do produto no processo LHT, como destacado por pesquisas anteriores (Zhou et al., 2022). Em cenários caracterizados por maior teor lipídico, a conversão da biomassa para rendimento de biopetróleo em LHT atingiu níveis impressionantes, atingindo até 68% m/m. Isso ressalta a importância da composição da biomassa na otimização da eficiência da produção de biopetróleo.

A produção de biopetróleo nos cenários avaliados exibiu variabilidade entre as diferentes espécies de microalgas (Figura 6). Especificamente, para *Scenedesmus acutus*, os rendimentos de biopetróleo variaram de 40% a 51% m/m, para *Chlorella vulgaris*, os rendimentos variaram de 42% a 54% m/m, e para *Nannochloropsis granulata*, os rendimentos variaram de 50% a 68% m/m. Essas variações enfatizam a importância de selecionar as espécies de microalgas apropriadas com base no rendimento de biopetróleo desejado. Em relação aos rendimentos de biocarvão e fase gasosa, observou-se que os cenários caracterizados por maior teor de proteína (HP) produziram as maiores quantidades de biochar. Em contrapartida, os cenários com maior teor de carboidratos (HC) apresentaram os maiores rendimentos na fase gasosa (Tabela 5).

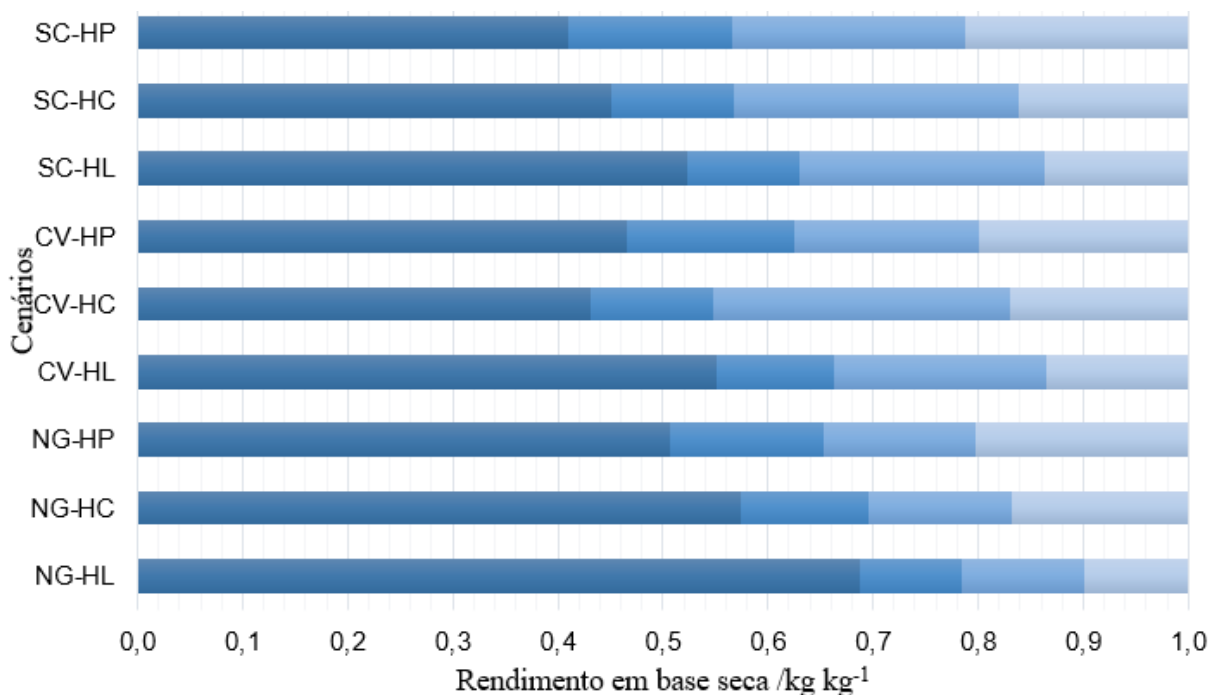


Figura 6 – Produção de biopetróleo nos cenários base

Tabela 6 – Rendimento do produto para processamento de 1 kg de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal nos cenários base.

Cenário	Biopetróleo	Fase líquida	Fase gasosa	Biocarvão	Total	Efluente aquoso (a)
SC-HP	0.40	0.15	0.21	0.20	1.0	4.0
SC-HC	0.44	0.11	0.26	0.15	1.0	4.0
SC-HL	0.51	0.10	0.21	0.12	1.0	4.0
CV-HP	0.42	0.15	0.16	0.19	1.0	4.0
CV-HC	0.46	0.11	0.27	0.16	1.0	4.0
CV-HL	0.54	0.10	0.19	0.13	1.0	4.0
NG-HP	0.50	0.14	0.13	0.19	1.0	4.0
NG-HC	0.56	0.12	0.12	0.16	1.0	4.0
NG-HL	0.68	0.09	0.10	0.09	1.0	4.0

Onde SC representa *Scenedesmus acutus*; CV representa *Chlorella vulgaris*; NG representa *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

Estes resultados fornecem informações valiosas sobre o papel da composição da biomassa de microalgas na formação do processo LHT e seu potencial para a produção de biopetróleo. Eles também destacam a importância de selecionar as espécies de microalgas mais adequadas para otimizar a produtividade com base em objetivos específicos.

5.2 Análise do desempenho energético e da pegada de carbono

Nos cenários base, a demanda de energia exibiu variação dentro da faixa de 13-17,5 MJ, enquanto a pegada de carbono associada variou de 0,6-0,8 kg CO₂eq. Notadamente, as contribuições além desses números decorreram predominantemente de fatores relacionados à infraestrutura e aos efluentes líquidos no processo LHT, conforme representado visualmente na Figura 7 e 8. Estes resultados lançam luz sobre os requisitos energéticos e impactos ambientais associados aos cenários base, enfatizando a importância de considerar tanto a demanda energética quanto a pegada de carbono ao avaliar a sustentabilidade do beneficiamento da biomassa de microalgas por meio da LHT.

Em nossa análise, calculamos os valores de EROI para biomassa processada e biopetróleo em todos os cenários avaliados. Os resultados revelaram que o EROI para biomassa processada excedeu consistentemente, variando de 1,4-2,4 MJ MJ⁻¹_{CED}. Isso sugere retornos energéticos favoráveis no processo HTL, indicando sua eficiência energética. No entanto, o EROI para biopetróleo, embora ainda positivo, mostrou uma faixa mais estreita, variando de 0,8-2,2 MJ MJ⁻¹_{CED}. A produção de biopetróleo foi ligeiramente menos eficiente em termos de retorno de energia em comparação com a biomassa processada em geral.

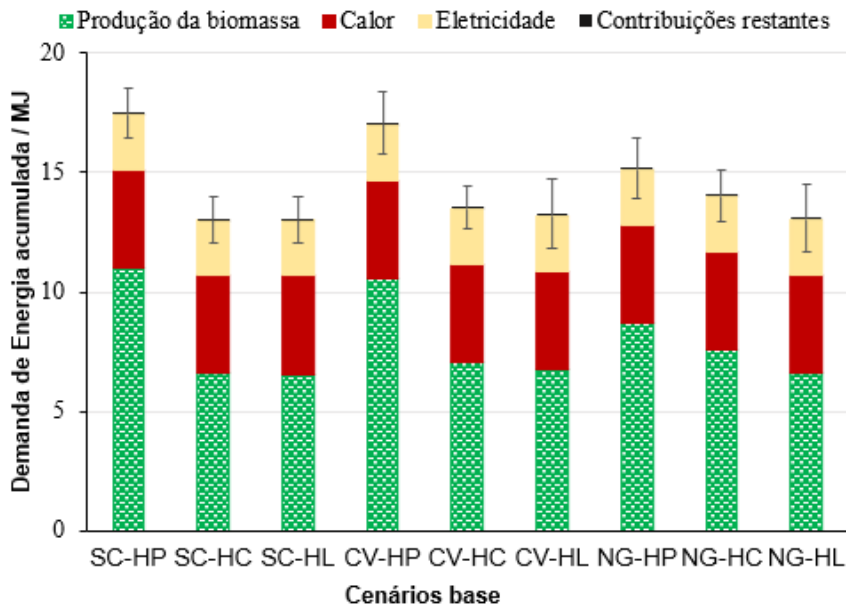


Figura 7 – Demanda de energia nos cenários base. Onde SC representa *Scenedesmus acutus*; CV representa *Chlorella vulgaris*; NG representa *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

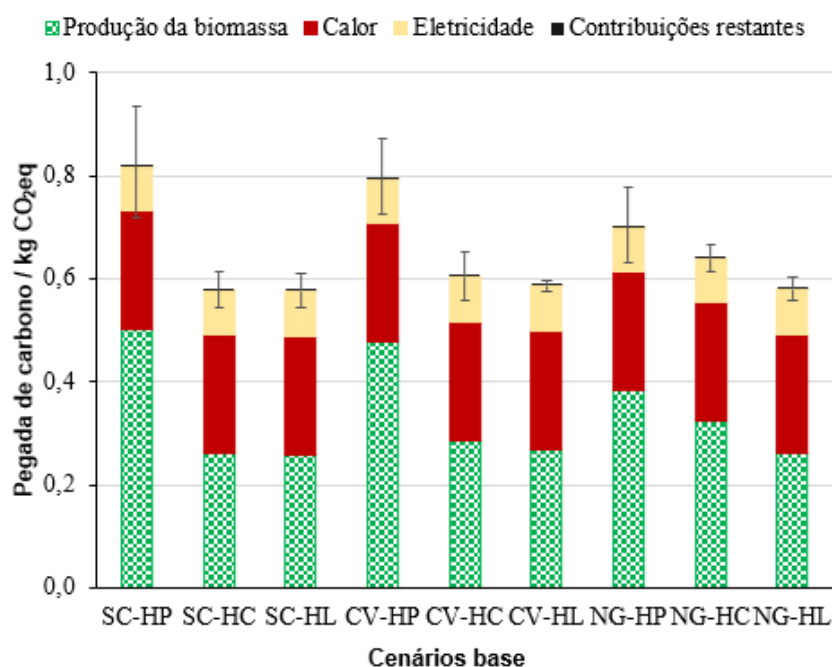


Figura 8 – Pegada de carbono nos cenários base. Onde SC representa *Scenedesmus acutus*; CV representa *Chlorella vulgaris*; NG representa *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

Dentre os cenários, o NG-HL apresentou-se como o mais favorável. Exibiu o maior rendimento de biopetróleo 68%*m/m* demonstrou valores notáveis de EROI (Apêndice-Tabela A.8). A biomassa processada atingiu um EROI de 2,4 MJ MJ⁻¹_{CED}, enquanto o biopetróleo atingiu 2,2 MJ MJ⁻¹_{CED}. Além disso, a Recuperação de Energia (RE) para este cenário foi notável em 0,91 MJ MJ⁻¹. Além de seu notável desempenho energético, NG-HL exibiu a menor demanda de energia 19,1 MJ e pegada de carbono 0,85 kg CO₂eq. Por outro lado, SC-HP foi o cenário menos favorável, produzindo o menor biopetróleo (40%*m/m*) e demonstrando menores valores de EROI com biomassa processada a 1,4 MJ MJ⁻¹_{CED} e biopetróleo a 0,8 MJ MJ⁻¹_{CED}. O valor de ER para esse cenário foi de 0,61 MJ MJ⁻¹. Além disso, apresentou a maior demanda de energia (43,2 MJ kg⁻¹) e pegada de carbono (2,0 kg CO₂eq).

5.3 Análises de sensibilidade

A primeira análise de sensibilidade refere-se à época de cultivo antes da colheita. Os cenários de colheita tardia e LH mostraram a maior demanda de energia, aumentando de 84,5%-87,7%, e a pegada de carbono, aumentando de 70,1%-72,8% em comparação com a colheita antecipada. Os cenários de HC também demonstraram um aumento na demanda de energia, variando de 26,2%-31,8%, e uma pegada de carbono de 21%-26,3% (Apêndice-Tabela A.7). Essa análise de sensibilidade proporcionou uma compreensão

mais realista dos dados, considerando que o cenário base em estudos anteriores assumiram condições de HP (Davis et al., 2016). Na segunda análise de sensibilidade envolvendo a demanda térmica em LHT, a demanda energética variou entre 16,2-47,2 MJ, enquanto a pegada de carbono variou de 0,7-2,3 kg CO₂eq (Figura 9 e Figura 10). Estes resultados oferecem uma avaliação abrangente da eficiência energética, EROI, e o impacto de parâmetros-chave na sustentabilidade e desempenho do beneficiamento de biomassa de microalgas através de LHT (Apêndice-Tabela A.9).

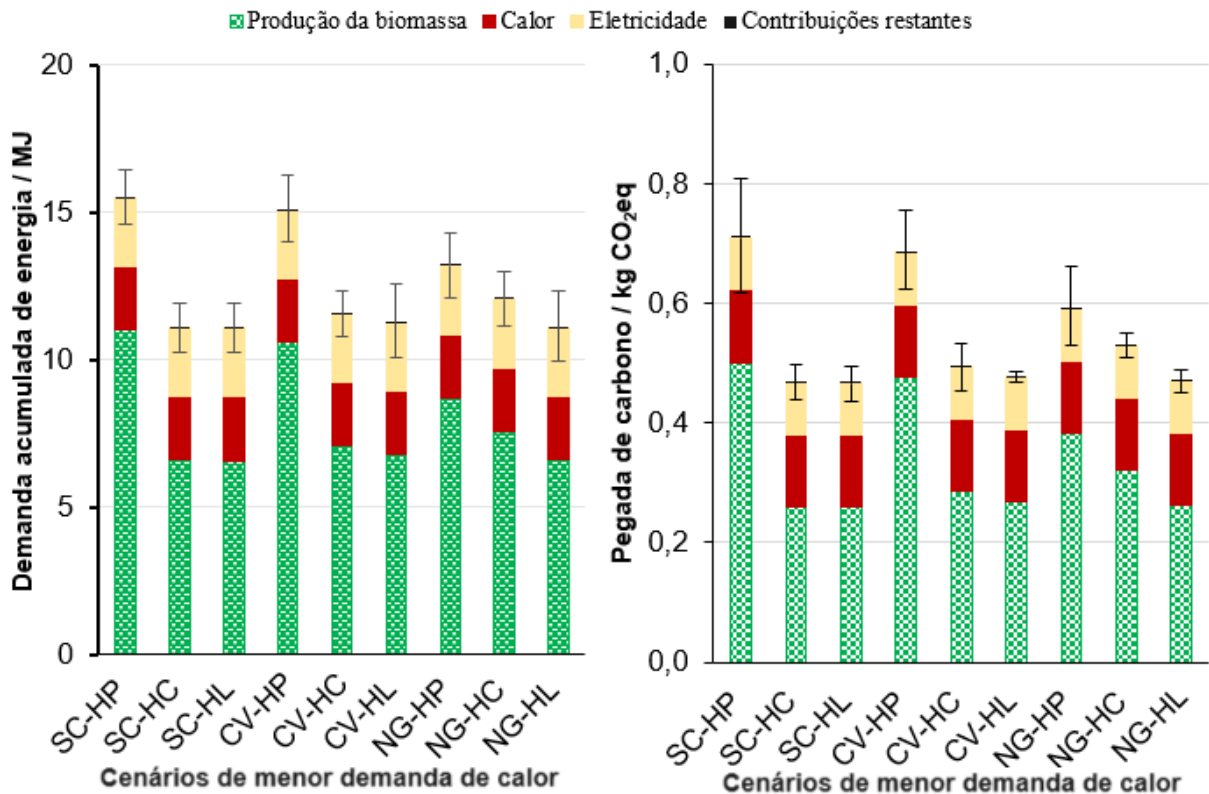


Figura 9 – Demanda de energia e pegada de carbono nos cenários de menor demanda de calor. Onde SC representa *Scenedesmus acutus*; CV representa *Chlorella vulgaris*; NG representa *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

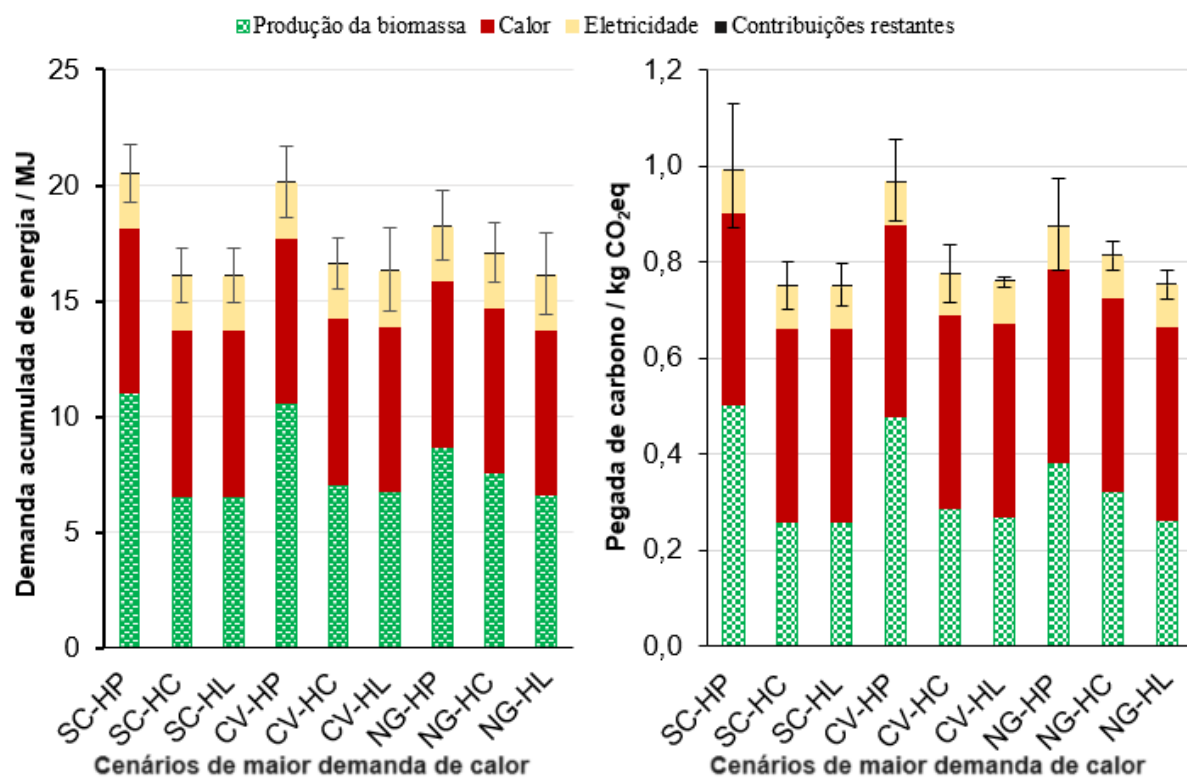


Figura 10 – Demanda de energia e pegada de carbono nos cenários de maior demanda de calor. Onde SC representa *Scenedesmus acutus*; CV representa *Chlorella vulgaris*; NG representa *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

6 Discussões

A composição diversificada de espécies de microalgas, ainda influenciada pelos estágios de crescimento, impacta significativamente os resultados da LHT. Notadamente, no final da colheita, o tempo de cultivo foi maior, sob condições de depleção de nutrientes, resultando em diminuição do teor de proteína e aumento do teor de lipídios. É essencial reconhecer que, à medida que o teor de lipídios aumenta, os carboidratos são preferencialmente consumidos, enquanto o conteúdo de proteínas sofre reduções relativas, embora sem uma tendência composicional sistemática (Hu M. Sommerfeld, 2008). A determinação do teor de lipídios considerou apenas os lipídios de ácidos graxos, como ésteres metílicos de ácidos graxos e lipídios polares não combustíveis, não incluindo outras espécies lipídicas à base de hidrocarbonetos (Walmsley M.R.W. Walmsley, 2017).

Os regimes de nutrientes implementados revelam que cenários com alto teor de lipídios (LH) apresentaram os rendimentos de biopetróleo mais substanciais. Dentre esses cenários, o NG-LH destacou-se com maior rendimento de biopetróleo 64%. Este resultado notável pode ser atribuído às condições operacionais selecionadas, que podem ter fornecido a energia de ativação necessária para favorecer reações de despolimerização cruciais para a produção de biopetróleo (Walmsley M.R.W. Walmsley, 2017). Estudos anteriores também indicaram que os rendimentos ótimos de biopetróleo ocorrem em temperaturas em torno de 300°C e tempos de retenção de até 30 minutos.

As temperaturas que excedem o ponto crítico da água tendem a diminuir os rendimentos de biopetróleo ao longo de tempos de reação prolongados devido à formação de gás.

O cenário CV-HC alcançou um rendimento de biopetróleo de 42,7% e demonstrou um rendimento substancial de fase gasosa de 27%, possivelmente resultante da conversão térmica do biopetróleo em moléculas gasosas menores. Em estudo, (Zhang, 2014) obtiveram rendimentos de biopetróleo menores quando comparados a este estudo, no qual o processamento da biomassa de microalgas por LHT a 280 °C, 10 MPa e 120 min atingiu um máximo de 57% m/m.

O cenário SC-HP exibiu resultados menos favoráveis, produzindo um menor teor de biopetróleo de 40,5% e um maior rendimento de biochar de 20,8%. Este fenômeno pode ser atribuído a reações de polimerização secundária após o processo LHT. Interações complexas entre componentes do biopetróleo e um excedente de radicais livres promovem a formação de biocarvão (Yang L. Nazari, 2016). Além da composição e das condições operacionais, outros fatores, como a taxa de aquecimento, têm o potencial de impactar o rendimento do biopetróleo (Barreiro C. Zamalloa, 2013).

Estudos indicam uma tendência crescente no rendimento do biopetróleo com mai-

ores taxas de aquecimento (Kristianto S.O. Limarta, 2019). Outros argumentam que uma alta taxa de aquecimento tende a uma maior formação de frações gasosas (Singh, 2020). Além disso, estudos relataram que o rendimento e a qualidade do biopetróleo podem ser influenciados pela introdução de catalisadores em LHT (Jena K.C. Das, 2012).

O processo catalítico em LHT pode maximizar o rendimento do biopetróleo e melhorar suas propriedades, tais como reduzir a viscosidade, nitrogênio e teor de oxigênio. Na espécie *Enteromorpha prolifera*, a adição de 5% m/m de Na_2CO_3 aumentou ligeiramente o rendimento de biopetróleo durante a liquefação (Zhou L. Zhang, 2010). No entanto, resultados contrastantes têm sido relatados, mostrando uma redução no rendimento do biopetróleo após a adição de catalisadores (Minowa S. Yokoyama, 1995). Portanto, pesquisas contínuas são necessárias para refinar esses parâmetros operacionais e otimizar o processo LHT para aumentar o rendimento do biopetróleo e do produto de valor agregado.

Em relação à demanda de energia e pegada de carbono, os cenários de LH mostraram-se os mais favoráveis, com demanda de energia variando de 19,1-25,2 MJ e pegada de carbono de 0,8-1,1 kg CO_2eq por kg de biopetróleo. Esses resultados podem ser atribuídos à redução das contribuições da etapa de produção de biomassa, necessitando de menor consumo de fertilizantes sintéticos. Os fertilizantes nitrogenados desempenham um papel crucial no aumento da produção de energia, sustentabilidade e potencial comercial na produção de biocombustíveis a partir de microalgas (Canter P. Blowers, 2015). No entanto, fontes alternativas de nutrientes e processos otimizados de reciclagem de nutrientes podem reduzir a dependência de fertilizantes convencionais, contribuindo para a sustentabilidade (Peccia B. Haznedaroglu, 2013).

O uso de águas residuais como fonte de macronutrientes na produção de biomassa de microalgas pode reduzir significativamente a demanda de energia (52%) e a pegada de carbono (61%) (Medeiros e Moreira, 2022). No entanto, a presença potencial de patógenos e metais pesados pode inibir o crescimento de microalgas, reduzindo a produção de biomassa [63,64]. As pesquisas e os desenvolvimentos em andamento neste campo visam enfrentar os desafios técnicos e aproveitar o potencial das microalgas como fonte de biomassa para atender às demandas de energia, minimizando a pegada de carbono (Mayanga, 2022).

Em estudo, Al-Jabri et al. (2022), avaliaram as exigências energéticas na etapa de processamento da biomassa de microalgas utilizando LHT. Os pesquisadores consideraram 50% de recuperação de calor, o que revelou a importância da etapa de colheita na produção de biomassa devido a energia demandada. A pesquisa relatou que a espécie *Synechococcus* exibiu uma demanda energética 10,4% maior do que a observada neste estudo, resultando em um EROI de 1,1 MJ MJ-1CED e um rendimento de biopetróleo de 38,8% (Tabela 5). No entanto, otimizar mais os processos de produção de biomassa

é crucial para aumentar o rendimento do biopetróleo e melhorar o desempenho técnico, energético e ambiental do sistema HTL (Converti, 2023).

As análises de sensibilidade investigaram dois parâmetros fundamentais: tempo de cultivo antes da colheita e demanda de calor durante a LHT. Na primeira análise, os cenários de colheita tardia, LH, aumentaram substancialmente a demanda de energia (84,5%-87,7%) e a pegada de carbono (70,1%-72,8%) em comparação com a colheita precoce, HP. Os cenários de HC também apresentaram maior demanda energética (26,2%-31,8%) e maior pegada de carbono (21%-26,3%). Esses resultados sugerem que a etapa de produção de biomassa pode acarretar uma maior exigência de nutrientes do que a previamente estimada para os cenários de HC e LH.

Na segunda análise de sensibilidade, relacionada à variação da demanda de calor na LHT, uma redução na entrada de calor elevou o EROI da biomassa processada devido à redução da demanda de energia durante o processamento, conseqüentemente elevando o EROI do biopetróleo. Notadamente, os cenários de LH mostraram-se os mais favoráveis, apresentando maiores valores de EROI para processamento de biomassa e biopetróleo em relação aos cenários base. O EROI para processamento de biomassa variou de 1,5-2,8 MJ MJ⁻¹_{CED} com uma pegada de carbono de 0,4-0,7 kg CO₂eq. O EROI para o biopetróleo foi de 1,7-2,6 MJ MJ⁻¹_{CED}, com uma pegada de carbono de 0,69-0,91 kg CO₂eq.

Os resultados revelaram que cenários com maior teor de lipídios acarretam menores exigências energéticas, variando de 11,1-15,5 MJ kg⁻¹_{CED}. Dentre esses cenários, o NG-HL destacou-se como o mais favorável, com um EROI para processamento de biomassa atingindo 2,8 MJ MJ⁻¹_{CED} e uma pegada de carbono de 0,47 kg CO₂eq. O EROI para o biopetróleo foi de 2,6 MJ MJ⁻¹_{CED}, com uma pegada de carbono de 0,69 kg CO₂eq. A espécie deste cenário se beneficiou com as condições operacionais estabelecidas, implicando em maior energia útil.

Por outro lado, um aumento na entrada de calor levou a uma redução nos índices EROI de biomassa e processamento de biopetróleo em todos os cenários devido à maior demanda de energia. Os cenários HP apresentaram as menores reduções percentuais em EROI para processamento de biomassa (23%-28%), com uma pegada de carbono de 25%-27%, e EROI para biopetróleo (28%-33%), com uma pegada de carbono de 28%-37%. Esses resultados sugerem que um maior suprimento de calor na entrada de LHT dentro de uma faixa acima de 5,7 MJ e abaixo de 10 MJ pode proporcionar condições mais favoráveis para cenários com maior teor de proteína. Portanto, otimizar os processos de produção e processamento de biomassa para melhorar o rendimento do biopetróleo e o desempenho técnico, energético e ambiental geral dentro dos sistemas LHT (Greene J. Gulden, 2020).

Tabela 7 – Demanda energética e pegada de carbono da produção de biopetróleo

Estudo	Rendimento de biopetróleo (%)	PCS_{Biopetróleo} (MJ kg⁻¹ Biopetróleo)	Demanda de energia (MJ kg⁻¹ Biopetróleo)	Pegada de carbono (kgCO_{2eq} kg⁻¹ Biopetróleo)	Comentário
Este estudo	40.4-68.2	35.1-42.1	19.1-43.1	0.8-2.0	Cenários base. A espécie <i>Tetraselmis sp.</i> apresentou o maior rendimento de biopetróleo e demonstrou capacidade de crescer em ambiente com salinidade de 8%. CO _{2eq} emissões reduzidas em 50% com o uso de águas residuais.
Al-Jabri et al. 2022	38.8-50.1	29.2-33.4	11.7-28.8	1.2-2.8	^a A concentração de microalgas a 5% w/w no processo LHT consumiu mais energia do que 15% m/m.
Zhang et al. 2022	36.9	-	30.6	1.6	A reciclagem de nutrientes reduziu as emissões de CO _{2eq} em 30% e o consumo de energia primária em 20%.
Nava-Bravo et al. 2021	45	42.7	1.1	-	O rendimento máximo do biopetróleo foi de 40% mas precisaria ser maior para produzir resultados economicamente favoráveis.
Zhang e Kendall 2019	42	35.7	5.9	2.6	
Greene et al. 2020	18-40	-	-	1.4-2.9	

^aSupõe-se que a demanda de energia do processo LHT seja igual à energia necessária para aquecer o meio até a temperatura operacional 300 °C.

7 Conclusão

Este estudo realizou uma avaliação do ciclo de vida (ACV) para quantificar a demanda de energia e a pegada de carbono da produção de biomassa de microalgas cultivadas em vários regimes de nutrientes e espécies, seguido de processamento de liquefação hidrotérmica (LHT). Os cenários avaliados abrangeram os regimes de nutrientes em colheita precoce para alto teor de proteína (HP), colheita intermediária para alto teor de carboidratos (HC) e colheita tardia para alto teor de lipídios (HL), enquanto as espécies de microalgas foram *Scenedesmus acutus* (SC), *Chlorella vulgaris* (CV) e *Nannochloropsis granulata* (NG). O cenário NG-HL apresentou o maior rendimento de biopetróleo (68,2% m/m), juntamente com a menor demanda de energia (16,2 MJ kg⁻¹ de biopetróleo) e pegada de carbono (0,6 kg CO_{2 eq} kg⁻¹ de biopetróleo), enquanto o SC-HP apresentou o menor rendimento de biopetróleo (40,5% m/m) e maior demanda de energia (47,2 MJ kg⁻¹ de biopetróleo) e pegada de carbono (2,2 kg CO_{2eq} kg⁻¹ de biopetróleo).

A primeira análise de sensibilidade mostrou que os cenários HL aumentaram significativamente a demanda energética e a pegada de carbono variando em 84-87% e 70-72%, respectivamente. A segunda análise de sensibilidade identificou que a redução da demanda de calor em LHT de 5,9 MJ para 3 MJ kg⁻¹ de biomassa em LHT reduziu a demanda de energia em 17% e a pegada de carbono em 18% em NG-HL. No entanto, para a implementação da cadeia de abastecimento de biopetróleo a partir de biomassa de microalgas em larga escala, é necessário otimizar parâmetros técnicos como a produtividade de biomassa na etapa de cultivo para biomassa de alto teor lipídico e a etapa de colheita para espécies variadas de microalgas e tempo de residência, gerenciamento de fontes de calor e efluentes líquidos na etapa de processamento juntamente com parâmetros econômicos. Portanto, este trabalho apoia a tomada de decisão LHT com base na composição da biomassa e demanda de calor para reduzir a demanda de energia e a pegada de carbono de bioprodutos de microalgas, como biopetróleo e biocarvão.

Embora as melhorias do LHT baseado em microalgas tenham sido investigadas, essa tecnologia ainda enfrenta desafios para uma aplicação comercial. Portanto, mais pesquisas devem ser direcionadas para a compreensão do mecanismo de reação da LHT para fornecer maiores rendimentos de produtos para diferentes composições de biomassa de microalgas. A utilização da fonte de calor residual e a otimização dos parâmetros do processo são essenciais para reduzir a demanda de energia e a pegada de carbono. Além disso, a integração de processos a jusante e produtos de alto valor agregado são estratégias para aumentar os benefícios ambientais e econômicos, visando o desperdício zero. Portanto, uma análise tecnoeconômica é necessária para planejar a viabilidade de produtos de biorrefinaria de microalgas em diferentes mercados.

Referências

ADNAN, M. A.; HOSSAIN, M. M. Gasification performance of various microalgae biomass – a thermodynamic study by considering tar formation using aspen plus. *Energy Conversion and Management*, v. 165, p. 783–793, 2018. ISSN 0196-8904.

ADNAN, M. A.; HOSSAIN, M. M. Integrated drying and gasification of wet microalgae biomass to produce h₂ rich syngas – a thermodynamic approach by considering in-situ energy supply. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 21, p. 10361–10373, 2019. ISSN 0360-3199.

AGHBASHLO, M. et al. Exergoenvironmental analysis of bioenergy systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, p. 111399, 2021. ISSN 1364-0321.

AHANCHI, M. et al. Review on waste biomass valorization and power management systems for microbial fuel cell application. *Journal of Cleaner Production*, v. 380, p. 134994, 2022. ISSN 0959-6526.

AL-JABRI, H. et al. A comparison of bio-crude oil production from five marine microalgae – using life cycle analysis. *Energy*, v. 251, p. 123954, 2022. ISSN 0360-5442.

ARUN, J. et al. Sustainable and eco-friendly approach for phosphorus recovery from wastewater by hydrothermally carbonized microalgae: Study on spent bio-char as fertilizer. *Journal of Water Process Engineering*, v. 38, p. 101567, 2020. ISSN 2214-7144. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420304451>>.

BANERJEE, S.; RAMASWAMY, S. Dynamic process model and economic analysis of microalgae cultivation in open raceway ponds. *Algal Research*, v. 26, p. 330–340, 2017. ISSN 2211-9264.

BARREIRO C. ZAMALLOA, N. B. W. V. F. R. W. B. W. P. D. L. Influence of strain-specific parameters on hydrothermal liquefaction of microalgae. *Bioresource Technology*, v. 146, p. 463–471, 2013.

BARROS, A. I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 41, p. 1489–1500, 2015. ISSN 1364-0321.

BARTEK, L. et al. Life cycle assessment of fish oil substitute produced by microalgae using food waste. *Sustainable Production and Consumption*, v. 27, p. 2002–2021, 2021. ISSN 2352-5509.

BATISTA A. CONVERTI, J. P. M. B. L. S. R. Tools for optimization of biomass-to-energy conversion processes. *Processes*, v. 11, p. 854, 2023.

BEHR, A.; SEIDENSTICKER, T. Refined raw materials! - biorrefineries. *Chemistry of Renewables*, p. 343–356, 2020.

BILLER, P.; ROSS, A. Potential yields and properties of oil from the hydrothermal liquefaction of microalgae with different biochemical content. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 1, p. 215–225, 2011. ISSN 0960-8524. Special Issue: Biofuels - II: Algal Biofuels and Microbial Fuel Cells.

BINOD, P. et al. Bioethanol production from rice straw: An overview. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 13, p. 4767–4774, 2010. ISSN 0960-8524. Special Issue on Lignocellulosic Bioethanol: Current Status and Perspectives.

BISWAS, B. et al. Effects of temperature and solvent on hydrothermal liquefaction of sargassum tenerrimum algae. *Bioresource Technology*, v. 242, p. 344–350, 2017. ISSN 0960-8524. Special Issue on International Conference on Current Trends in Biotechnology post ICCB-2016 conference on Strategies for Environmental Protection and Management (ICSEPM-2016).

BRENNAN, L.; OWENDE, P. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 2, p. 557–577, 2010. ISSN 1364-0321.

BÖRJESSON, P.; TUFVESSON, L. M. Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes. *Journal of Cleaner Production*, v. 19, n. 2, p. 108–120, 2011. ISSN 0959-6526.

CALIJURI, M. L. et al. Bioproducts from microalgae biomass: Technology, sustainability, challenges and opportunities. *Chemosphere*, v. 305, p. 135508, 2022. ISSN 0045-6535.

CANTER P. BLOWERS, R. H. D. S. C. Implications of widespread algal biofuels production on macronutrient fertilizer supplies: Nutrient demand and evaluation of potential alternate nutrient sources. *Applied Energy*, v. 143, p. 71–80, 2015.

CARRARETTO, C. et al. Biodiesel as alternative fuel: Experimental analysis and energetic evaluations. *Energy*, v. 29, n. 12, p. 2195–2211, 2004. ISSN 0360-5442. Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, n. 1, p. 55–70, 2010. ISSN 0959-6526. The Roles of Cleaner Production in the Sustainable Development of Modern Societies.

CHAUHAN, K. Prospect of biomass to bioenergy in india: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 2023. ISSN 2214-7853.

CHEN, J. et al. A novel strategy to simultaneously enhance bio-oil yield and nutrient recovery in sequential hydrothermal liquefaction of high protein microalgae. *Energy Conversion and Management*, v. 255, p. 115330, 2022. ISSN 0196-8904.

CHEN, P. H.; QUINN, J. C. Microalgae to biofuels through hydrothermal liquefaction: Open-source techno-economic analysis and life cycle assessment. *Applied Energy*, v. 289, p. 116613, 2021. ISSN 0306-2619.

CHERUBINI, F.; STRØMMAN, A. H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 2, p. 437–451, 2011. ISSN 0960-8524.

CHOO, M.-Y. et al. Chapter 10 - conversion of microalgae biomass to biofuels. In: *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 149–161. ISBN 978-0-12-817536-1.

- CHOPRA, J. et al. Environmental impact analysis of oleaginous yeast based biodiesel and bio-crude production by life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 271, p. 122349, 2020.
- COLLET, P. et al. Recommendations for life cycle assessment of algal fuels. *Applied Energy*, v. 154, p. 1089–1102, 2015. ISSN 0306-2619.
- DANDAMUDI, K. P. R. et al. Hydrothermal liquefaction of cyanidioschyzon merolae and salicornia bigelovii torr.: The interaction effect on product distribution and chemistry. *Fuel*, v. 277, p. 118146, 2020. ISSN 0016-2361.
- DAVIS, R.; KLEIN, B. C. Algal biomass production via open pond algae farm cultivation: 2020 state of technology and future research. In: . [s.n.], 2021. (National Renewable Energy Laboratory). Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy21osti/79931.pdf>>.
- DAVIS, R. W. et al. Process design and economics for the production of algal biomass: Algal biomass production in open pond systems and processing through dewatering for downstream conversion. In: . [S.l.: s.n.], 2016.
- DEPRÁ, M. C. et al. Environmental impacts on commercial microalgae-based products: Sustainability metrics and indicators. *Algal Research*, v. 51, p. 102056, 2020. ISSN 2211-9264.
- DREHER, M. et al. Bioenergie-datengrundlagen für die statistik der erneuerbaren energien und emissionsbilanzierung. In: *Ergebnisbericht zum Workshop vom Juli*. [S.l.: s.n.], 2011.
- DÍEZ-MONTERO, R. et al. Evaluation of daily and seasonal variations in a semi-closed photobioreactor for microalgae-based bioremediation of agricultural runoff at full-scale. *Algal Research*, v. 47, p. 101859, 2020. ISSN 2211-9264.
- ELLIOTT, D. C. et al. Hydrothermal liquefaction of biomass: Developments from batch to continuous process. *Bioresource Technology*, v. 178, p. 147–156, 2015. ISSN 0960-8524.
- EMBRAPA. Uso da biomassa para a geração de energia. *Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*, v. 1, p. 6–22, 2016. ISSN 1678-1953.
- ENAMALA, M. K. et al. Production of biofuels from microalgae - a review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 94, p. 49–68, 2018. ISSN 1364-0321.
- EPE. Programa de transição energética. *Empresa de Pesquisa Energética - EPE*, 2023. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.
- ESTEVEES, A. F. et al. Chapter 10 - microalgae harvesting techniques. In: JACOB-LOPES, E. et al. (Ed.). *Handbook of Microalgae-Based Processes and Products*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 225–281. ISBN 978-0-12-818536-0.
- FERREIRA, J. et al. Innovative microalgae biomass harvesting methods: Technical feasibility and life cycle analysis. *Science of The Total Environment*, v. 746, p. 140939, 2020. ISSN 0048-9697.

- GIL, A. Challenges on waste-to-energy for the valorization of industrial wastes: Electricity, heat and cold, bioliquids and biofuels. *Environmental Nanotechnology, Monitoring Management*, v. 17, p. 100615, 2022. ISSN 2215-1532.
- GNANSOUNOU, E. et al. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. *Bioresource Technology*, v. 100, n. 21, p. 4919–4930, 2009. ISSN 0960-8524. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852409006245>>.
- GREENE J. GULDEN, G. W. M. H. J. Q. J. Techno-economic analysis and global warming potential of a novel offshore macroalgae biorefinery. *Algal Research*, v. 51, p. 102032, 2020.
- GREENE, J. M. et al. Techno-economic analysis and global warming potential of a novel offshore macroalgae biorefinery. *Algal Research*, v. 51, p. 102032, 2020. ISSN 2211-9264.
- GUO, B. et al. Hydrothermal liquefaction of residual microalgae biomass after pulsed electric field-assisted valuable extraction. *Algal Research*, v. 43, p. 101650, 2019. ISSN 2211-9264.
- GÓMEZ, J. et al. A renewable energy optimization approach with production planning for a real industrial process: An application of genetic algorithms. *Renewable Energy*, v. 215, p. 118933, 2023. ISSN 0960-1481.
- HANIF, M. A. et al. Renewable energy from biomass. In: HANIF, M. A. et al. (Ed.). *Renewable and Alternative Energy Resources*. [S.l.]: Academic Press, 2022. cap. 9, p. 555–603.
- HE, B. et al. Operating temperature and retention time effects on the thermochemical conversion process of swine manure. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 43, n. 6, p. 1821–1825, 2000.
- HOSSAIN, M. R. et al. Production of light oil-prone biocrude through co-hydrothermal liquefaction of wastewater-grown microalgae and peat. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 161, p. 105423, 2022. ISSN 0165-2370.
- HU M. SOMMERFELD, E. J. M. G. M. P. M. S. A. D. Q. Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *The Plant Journal*, v. 54, p. 621–639, 2008.
- IEA. Net zero by 2050. *International Energy Agency - IEA*, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>.
- IEA. *CO₂ Emissions in 2022*. [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>>.
- ISHIZAKI, H.; HASUMI, K. Chapter 10 - ethanol production from biomass. In: TOJO, S.; HIRASAWA, T. (Ed.). *Research Approaches to Sustainable Biomass Systems*. Boston: Academic Press, 2014. p. 243–258. ISBN 978-0-12-404609-2.
- JENA K.C. DAS, J. K. U. Comparison of the effects of Na_2CO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, and NiO catalysts on the thermochemical liquefaction of microalga *Spirulina platensis*. *Applied Energy*, v. 98, p. 368–375, 2012.

JORQUERA, O. et al. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 4, p. 1406–1413, 2010. ISSN 0960-8524.

KAZEMI, N. et al. Environmental life cycle assessment and energy-economic analysis in different cultivation of microalgae-based optimization method. *Results in Engineering*, v. 19, p. 101240, 2023. ISSN 2590-1230.

KHAN J.H. SHIN, J. K. M. The promising future of microalgae: current status, challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and other products. *Microbial Cell Factories*, v. 17, p. 36, 2018.

KHOO, C. G. et al. Valorisation of chlorella vulgaris biomass for multi-products synthesis via hydrothermal processing. *Energy Conversion and Management: X*, v. 20, p. 100399, 2023. ISSN 2590-1745. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590174523000557>>.

KHOO, H. et al. Life cycle energy and co2 analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 10, p. 5800–5807, 2011. ISSN 0960-8524.

KINNEY, A.; CLEMENTE, T. Modifying soybean oil for enhanced performance in biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, v. 86, n. 10, p. 1137–1147, 2005. Biodiesel Processing and Production.

KNORR, D.; LUKAS, J. C.; SCHOEN, P. Production of advanced biofuels via liquefaction - hydrothermal liquefaction reactor. 2013. Disponível em: <<https://www.ourenergypolicy.org/wp-content/uploads/2015/08/60462.pdf>>.

KOUTRA, E. et al. Chapter 11 - microalgal biorefinery. In: *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 163–185. ISBN 978-0-12-817536-1.

KRISTIANTO S.O. LIMARTA, Y.-K. P. J.-M. H. D. S. Y. J. J. J. I. Hydrothermal liquefaction of concentrated acid hydrolysis lignin in a bench-scale continuous stirred tank reactor. *Energy Fuels*, v. 33, p. 6421–6428, 2019.

KUMAR, J. A. et al. Agricultural waste biomass for sustainable bioenergy production: Feedstock, characterization and pre-treatment methodologies. *Chemosphere*, v. 331, p. 138680, 2023. ISSN 0045-6535.

KUMAR, Y. et al. Cultivation of microalgae on food waste: Recent advances and way forward. *Bioresource Technology*, v. 363, p. 127834, 2022. ISSN 0960-8524.

KYZAS, G. Z.; MATIS, K. A. Electroflotation process: A review. *Journal of Molecular Liquids*, v. 220, p. 657–664, 2016. ISSN 0167-7322.

LACHOS-PEREZ P. CÉSAR TORRES-MAYANGA, E. A. G. Z. F. D. C. D. Hydrothermal carbonization and liquefaction: differences, progress, challenges, and opportunities. *Bioresource Technology*, v. 343, p. 126084, 2022.

LASSIO ALESSANDRA MAGRINI, D. C. B. J. G. Life cycle-based sustainability indicators for electricity generation: A systematic review and a proposal for assessments in brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 311, p. 127568, 2021. ISSN 0959-6526.

- LI, Y. et al. Quantitative multiphase model for hydrothermal liquefaction of algal biomass. *Green Chem.*, The Royal Society of Chemistry, v. 19, p. 1163–1174, 2017.
- LIU, Y. et al. Catalytic hydrothermal liquefaction of microalgae over reduced graphene oxide support ni catalyst. *Fuel Processing Technology*, v. 242, p. 107653, 2023. ISSN 0378-3820.
- LU, Y. et al. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water: A parametric study. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 31, n. 7, p. 822–831, 2006. ISSN 0360-3199.
- López Barreiro, D. et al. Influence of strain-specific parameters on hydrothermal liquefaction of microalgae. *Bioresource Technology*, v. 146, p. 463–471, 2013. ISSN 0960-8524.
- MA, X.-N. et al. Lipid production from nannochloropsis. *Marine Drugs*, v. 14, 2016.
- MANIKANDAN, S. et al. Critical review of biochemical pathways to transformation of waste and biomass into bioenergy. *Bioresource Technology*, v. 372, p. 128679, 2023. ISSN 0960-8524.
- MARANGON, B. et al. Environmental performance of microalgae hydrothermal liquefaction: Life cycle assessment and improvement insights for a sustainable renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 155, p. 111910, 2022. ISSN 1364-0321.
- MATHUR, M. et al. Valorization of microalgal biomass to value-added products using integrated supercritical co₂ extraction and sub-critical hydrothermal liquefaction. *Journal of Cleaner Production*, v. 373, p. 133925, 2022. ISSN 0959-6526.
- MATSUI A. NISHIHARA, C. U. M. O. N. I. T. S. T. Liquefaction of micro-algae with iron catalyst. *Fuel*, v. 76, p. 1043–1048, 1997.
- MEDEIROS, D. L.; MOREIRA, Í. T. A. Microalgae biomass production from cultivation in availability and limitation of nutrients: The technical, environmental and economic performance. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, v. 370, p. 133538, 2022. ISSN 0959-6526.
- MEDEIROS, D. L.; MOREIRA Ícaro T. A. Microalgae biomass production from cultivation in availability and limitation of nutrients: The technical, environmental and economic performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 370, p. 133538, 2022. ISSN 0959-6526.
- MENTEN, F. et al. A review of lca greenhouse gas emissions results for advanced biofuels: The use of meta-regression analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, p. 108–134, 2013. ISSN 1364-0321.
- MINOWA S. YOKOYAMA, M. K. T. O. T. Oil production from algal cells of *dunaliella tertiolecta* by direct thermochemical liquefaction. *Fuel*, v. 74, p. 1735–1738, 1995.
- NAJJAR, Y. S.; ABU-SHAMLEH, A. Harvesting of microalgae by centrifugation for biodiesel production: A review. *Algal Research*, v. 51, p. 102046, 2020. ISSN 2211-9264.
- NAPP, T. et al. The role of advanced demand-sector technologies and energy demand reduction in achieving ambitio. *Applied Energy*, v. 238, p. 351–367, 2019.

NAVA-BRAVO, I. et al. Catalytic hydrothermal liquefaction of microalgae cultivated in wastewater: Influence of ozone-air flotation on products, energy balance and carbon footprint. *Energy Conversion and Management*, v. 249, p. 114806, 2021. ISSN 0196-8904.

ORTIZ, A. et al. Optimization and operation of a demonstrative full scale microalgae harvesting unit based on coagulation, flocculation and sedimentation. *Separation and Purification Technology*, v. 259, p. 118171, 2021. ISSN 1383-5866.

PALOMINO, A. Y. et al. The storage stability of biocrude obtained by the hydrothermal liquefaction of microalgae. *Renewable Energy*, v. 145, p. 1720–1729, 2020.

PANNASE R.K. SINGH, B. R. P. G. A. Decomposition of polyamide via slow pyrolysis: Effect of heating rate and operating temperature on product yield and composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 151, p. 104886, 2020.

PAWAR, S. Effectiveness mapping of open raceway pond and tubular photobioreactors for sustainable production of microalgae biofuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 62, p. 640–653, 2016. ISSN 1364-0321.

PECCIA B. HAZNEDAROGLU, J. G. J. J. Nitrogen supply is an important driver of sustainable microalgae biofuel production. *Trends in Biotechnology*, v. 31, p. 134–138, 2013.

PRAGYA, N.; PANDEY, K. K. Life cycle assessment of green diesel production from microalgae. *Renewable Energy*, v. 86, p. 623–632, 2016. ISSN 0960-1481.

RAMÍREZ-ROMERO, A. et al. Microalgae adaptation as a strategy to recycle the aqueous phase from hydrothermal liquefaction. *Bioresource Technology*, v. 371, p. 128631, 2023. ISSN 0960-8524.

ROUT, P. R. et al. Technological advancements in valorisation of industrial effluents employing hydrothermal liquefaction of biomass: Strategic innovations, barriers and perspectives. *Environmental Pollution*, v. 316, p. 120667, 2023. ISSN 0269-7491.

Sacristán de Alva, M. et al. Green microalga *scenedesmus acutus* grown on municipal wastewater to couple nutrient removal with lipid accumulation for biodiesel production. *Bioresource Technology*, v. 146, p. 744–748, 2013. ISSN 0960-8524.

SADVAKASOVA, A. K. et al. Microalgae as a key tool in achieving carbon neutrality for bioproduct production. *Algal Research*, v. 72, p. 103096, 2023. ISSN 2211-9264.

SANGUINETI, M. M. et al. Analysis of impact of temperature and saltwater on nannochloropsis salina bio-oil production by ultra high resolution apci ft-icr ms. *Algal Research*, v. 9, p. 227–235, 2015. ISSN 2211-9264.

SAUTER, P. et al. Impact of the renewable energy sources act in germany on electricity produced with solid biofuels – lessons learned by monitoring the market development. *Biomass and Bioenergy*, v. 53, p. 162–171, 2013. ISSN 0961-9534. 20th European Biomass Conference.

SEGHETTA, M. et al. Life cycle assessment of macroalgal biorefinery for the production of ethanol, proteins and fertilizers – a step towards a regenerative bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, v. 137, p. 1158–1169, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616311015>>.

- SHAKYA, R. et al. Catalytic upgrading of bio-oil produced from hydrothermal liquefaction of nannochloropsis sp. *Bioresource Technology*, v. 252, p. 28–36, 2018. ISSN 0960-8524.
- SHARMA, N. et al. Effect of catalyst and temperature on the quality and productivity of htl bio-oil from microalgae: A review. *Renewable Energy*, v. 174, p. 810–822, 2021. ISSN 0960-1481.
- SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy*, v. 88, n. 10, p. 3548–3555, 2011. ISSN 0306-2619. Special Issue of Energy from algae: Current status and future trends.
- SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life-cycle assessment of algal biofuels [applied energy 88 (2011) 3548–55]. *Applied Energy*, v. 101, p. 822, 2013. ISSN 0306-2619. Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.
- SINGH, R. The national bioeconomy blueprint: meeting grand challenges. *Industrial Biotechnology*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 8, n. 3, p. 94–96, 2012.
- SOUSA, V. et al. Microalgae biomass as an alternative source of biocompounds: New insights and future perspectives of extraction methodologies. *Food Research International*, v. 173, p. 113282, 2023. ISSN 0963-9969.
- WALMSLEY M.R.W. WALMSLEY, M. A. T. Energy return on energy and carbon investment of wind energy farms: A case study of new zealand. *Journal of Cleaner Production*, v. 167, p. 885–895, 2017.
- WALTER, A. et al. Sustainability assessment of bio-ethanol production in brazil considering land use change, ghg emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy*, v. 39, n. 10, p. 5703–5716, 2011. ISSN 0301-4215. Sustainability of biofuels.
- WANG, C. et al. Energy return on investment (eroi) of biomass conversion systems in china: Meta-analysis focused on system boundary unification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 137, p. 110652, 2021. ISSN 1364-0321.
- WANG, K. et al. Species diversity and community structure of microalgae living on microplastics in luoyuan bay, china. *Marine Pollution Bulletin*, v. 180, p. 113809, 2022. ISSN 0025-326X.
- WINTER, L. et al. Including biodiversity in life cycle assessment – state of the art, gaps and research needs. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 67, p. 88–100, 2017. ISSN 0195-9255.
- XU, D. et al. Hydrothermal upgrading of water-insoluble algal biocrude over -al₂o₃ supported multi-metallic catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 140, p. 188–194, 2019. ISSN 0165-2370.
- XU, X. et al. Using the solution of self-settling microalgae scenedesmus obliquus as processing medium for hydrothermal liquefaction of biomass. *Biomass and Bioenergy*, v. 173, p. 106784, 2023. ISSN 0961-9534.

- YACOBUCCI, B. D. *Biofuels incentives: a summary of federal programs*. [S.l.]: DIANE Publishing, 2011.
- YANG, J. et al. Importance of pyrolysis programs in enhancing the application of microalgae-derived biochar in microbial fuel cells. *Fuel*, v. 333, p. 126244, 2023. ISSN 0016-2361.
- YANG L. NAZARI, Z. Y. K. C. C. X. Q. S. H. L. Hydrothermal liquefaction of spent coffee grounds in water medium for bio-oil production. *Biomass and Bioenergy*, v. 86, p. 191–198, 2016.
- YOUSUF, A. Chapter 1 - fundamentals of microalgae cultivation. In: *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 1–9. ISBN 978-0-12-817536-1.
- ZHANG, X. et al. Ecosystem simulation and environmental impact analysis of transforming microalgae to produce jet fuel. *Journal of Cleaner Production*, v. 333, p. 130100, 2022. ISSN 0959-6526.
- ZHANG, X. et al. Production of acid-free bio-oil through improved co-htl of sludge and microalgae: Experiment and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 379, p. 134668, 2022. ISSN 0959-6526.
- ZHANG, Y.; KENDALL, A. Effects of system design and co-product treatment strategies on the life cycle performance of biofuels from microalgae. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 536–546, 2019. ISSN 0959-6526.
- ZHANG, Y. Z. J. Hydrothermal liquefaction of microalgae in an ethanol–water co-solvent to produce biocrude oil. *Energy Fuels*, v. 28, p. 5178–5183, 2014.
- ZHOU L. ZHANG, S. Z. H. F. J. C. D. Hydrothermal liquefaction of macroalgae *enteromorpha prolifera* to bio-oil. *Energy Fuels*, v. 24, p. 4054–4061, 2010.
- ZHOU, W. et al. Chapter 3 - microalgae cultivation and photobioreactor design. In: YOUSUF, A. (Ed.). *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 31–50. ISBN 978-0-12-817536-1.
- ZHOU, Y. et al. Algal biomass valorisation to high-value chemicals and bioproducts: Recent advances, opportunities and challenges. *Bioresource Technology*, v. 344, p. 126371, 2022. ISSN 0960-8524.
- ZUCCARO, G. et al. Chapter 2 - microalgae cultivation systems. In: YOUSUF, A. (Ed.). *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. [S.l.]: Academic Press, 2020. p. 11–29. ISBN 978-0-12-817536-1.

A Apêndice

Informações de apoio

Tabela 8 – Análise de sensibilidade do tempo de cultivo antes da colheita nos cenários base.

Parâmetro	SC-HP	SC-HC	SC-HL	CV-HP	CV-HC	CV-HL	NG-HP	NG-HC	NG-HL
Demanda de energia (Aumento%)	0	31.8	87.7	0	30.5	85.9	0	72.2	84.5
Pegada de carbono (Aumento%)	0	26.3	72.8	0	25.0	70.9	0	21.0	70.1

SC: *Scenedesmus acutus*; CV: *Chlorella vulgaris*; NG: *Nannochloropsis granulata*; HP representa alto teor de proteína; HC representa alto teor de carboidratos e HL representa alto teor de lipídios.

Tabela 9 – Demanda de energia e pegada de carbono para 1 kg de sólidos totais do processamento de biomassa de microalgas em liquefação hidrotermal (LHT) em cenários de linha de base e análise de sensibilidade para demanda de calor

Cenário	Demanda de energia (MJ kg ⁻¹)	EROI (MJ MJ ⁻¹ _{CED})	Pegada de carbono (kg CO _{2eq})
Base			
SC-HP	17.50	1.40	0.82
SC-HC	13.00	1.89	0.58
SC-HL	13.00	2.06	0.58
CV-HP	17.00	1.41	0.79
CV-HC	13.50	1.70	0.60
CV-HL	13.20	1.98	0.59
NG-HP	15.20	1.58	0.70
NG-HC	14.00	1.77	0.64
NG-HL	13.00	2.41	0.58
Análise de sensibilidade			

Inferior

SC-HP	15.50	1.56	0.71
SC-HC	11.10	2.23	0.47
SC-HL	11.10	2.43	0.47
CV-HP	15.10	1.59	0.69
CV-HC	11.60	1.99	0.50
CV-HL	11.30	2.33	0.50
NG-HP	13.20	1.82	0.60
NG-HC	12.10	2.06	0.53
NG-HL	11.10	2.83	0.47

Superior

SC-HP	19.10	1.18	0.91
SC-HC	14.70	1.53	0.67
SC-HL	14.70	1.67	0.67
CV-HP	18.70	1.20	0.89
CV-HC	15.20	1.39	0.70
CV-HL	14.80	1.61	0.68
NG-HP	18.20	1.31	0.80
NG-HC	15.60	1.45	0.73
NG-HL	14.70	1.95	0.67

Tabela 10 – Demanda de energia e pegada de carbono para produção de 1 kg de biopetróleo em liquefação hidrotérmica (LHT) nos cenários base e análise de sensibilidade para demanda de calor

Cenário	Demanda de energia (MJ kg ⁻¹)	EROI (MJ MJ ⁻¹ _{CED})	Pegada de carbono (kg CO _{2eq})	Recuperação de energia (%MJ MJ ⁻¹)
<i>Cenários</i>				
<i>base</i>				
SC-HP	43.20	0.85	2.03	0.61
SC-HC	29.08	1.26	1.29	0.66
SC-HL	25.26	1.45	1.12	0.70
CV-HP	37.04	0.95	1.73	0.67
CV-HC	31.65	1.11	1.42	0.65
CV-HL	24.09	1.46	1.07	0.73
NG-HP	30.21	1.40	1.40	0.88
NG-HC	24.66	1.70	1.13	0.96
NG-HL	19.11	2.20	0.85	0.91

*Análise de
sensibilidade*

Inferior

SC-HP	38.34	0.96	1.76	-
SC-HC	24.72	1.49	1.05	-
SC-HL	21.47	1.71	0.91	-
CV-HP	32.79	1.07	1.49	-
CV-HC	27.07	1.30	1.16	-
CV-HL	20.53	1.71	0.87	-
NG-HP	26.31	1.60	0.94	-
NG-HC	21.22	1.99	1.18	-
NG-HL	16.24	2.60	0.70	-

Superior

SC-HP	50.70	0.72	2.26	-
SC-HC	32.71	1.02	1.50	-
SC-HL	28.41	1.18	1.30	-
CV-HP	40.57	0.80	1.93	-
CV-HC	35.45	0.90	1.63	-
CV-HL	27.06	1.18	1.24	-
NG-HP	36.31	1.16	1.29	-
NG-HC	27.52	1.40	1.58	-
NG-HL	21.49	1.79	0.99	-

Carbon Footprint of Hydrothermal Liquefaction of Microalgae Biomass Cultivated in Availability and Limitation of Nutrients

Lorena Rodrigues Cunha^{1*}, Diego Lima Medeiros², Ícaro Thiago Andrade Moreira^{1,2}

¹Chemical Engineering Graduate Program (PPEQ), Federal University of Bahia (UFBA); ²Clean Technologies Network (TECLIM), Federal University of Bahia (UFBA); Salvador, Bahia, Brazil

This work aimed to assess the carbon footprint of microalgae biomass processing in hydrothermal liquefaction (HTL) to produce biopetroleum and co-products. The foreground inventory covered the cultivation in open ponds with availability (C1) and limitation (C2) of nutrients, followed by harvesting and processing in HTL for 1 kg of microalgae biomass in total solids. The ecoinvent™ 3.6 databases and IPCC- 2021 GWP 100 years method were used for background inventory and impact indicator in openLCA® 1.11.0. The carbon footprint of C1 (1.1 kg CO_{2eq}) was more significant than that of C2 (0.7 kg CO_{2eq}). The most considerable carbon footprint contribution per stage was the Production stage (cultivation and harvesting), with 64%-88%, in the evaluated scenarios. In comparison, this per process was the fertilizer (71%) in C1 and the heat (32%) in C2.

Keywords: Biotechnology. Environmental Performance. Life Cycle Assessment (LCA). Greenhouse Gases (GHG). Microalgae Bioproducts.

Introduction

Society industrialization contributed to the expansion of fossil energy consumption, which increased greenhouse gas (GHG) emissions. Therefore, several countries worldwide are committed to adopting measures to mitigate GHG emissions, such as replacing fossil resources with renewable resources [1-3]. In this context, fuels from renewable and carbon-neutral sources promise to replace the fossil fuel. However, substitutes, as first and second-generation biofuel production, demand fertile soils, which is associated with rising food costs. In this way, microalgae-based biofuels have advantages compared to first and second-generation biofuels due to their ability to grow in unsuitable land for agriculture, more significant photosynthetic activity compared to terrestrial plants, and potential to use inputs from residual sources such as gaseous and aqueous effluents [4,5].

Received on 25 September 2022; revised 20 November 2022.
Address for correspondence: Lorena Rodrigues Cunha, Alameda Zulmira Ferreira, 42 - Saboeiro, Salvador - BA - Brazil. Zipcode: 41180-335. E-mail: lorenarccunha@gmail.com. DOI 10.34178/jbth.v5i4.244.

J Bioeng. Tech. Health 2022;5(4):232-236
© 2022 by SENAI CIMATEC. All rights reserved.

Microalgae biomass can be converted into bioproducts using varied processes such as the thermochemical routes. Hydrothermal liquefaction (HTL) is a promising technology for converting wet biomass into biopetroleum [6]. Thus, HTL reduces energy consumption, environmental burdens, and financial costs associated with biomass drying [6,7]. In this regard, Life Cycle Assessment (LCA) is used to quantify the carbon footprint of a product system and support decision-making for GHG emission reduction. Thus, the carbon footprint is widely used in energy policy and practices such as the Brazilian Biofuel Policy (RenovaBio). Therefore, this study aims to quantify the carbon footprint of biomass processing in HTL from microalgae cultivation in availability (C1) and limitation (C2) of nutrients.

Materials and Methods

The attributional LCA method based on ISO-14044 [8] was used in this study to quantify the carbon footprint in the evaluated scenarios. The reference flow and functional unit combined in this study was 1 kg microalgae biomass processing in total solids (TS). The product system covered the operation phase of the following processes in the foreground inventory: cultivation in open raceway ponds with availability (C1) and limitation (C2)

Biomass and Bioenergy

Hydrothermal liquefaction of microalgae biomass cultivated in varied nutrient regime and species: the energy demand and carbon footprint

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	JBAB-D-23-01169
Article Type:	Research paper
Keywords:	Biotechnology; Biopetroleum; Nitrogen and phosphorus limitation; Microalgae species; Life Cycle Assessment (LCA); energy and environmental performance
Corresponding Author:	Cunha Rodrigues Cunha, Master's Degree student Federal University of Bahia Salvador, Bahia BRAZIL
First Author:	Lorena Rodrigues Cunha, Master's Degree student
Order of Authors:	Lorena Rodrigues Cunha, Master's Degree student
Abstract:	Highlights • LCA of microalgae bioproducts from hydrothermal liquefaction was evaluated; • The different microalgae biomass composition and productivity were investigated; • Higher microalgae biomass and biopetroleum yield support commodity production; • Proposed scenarios lower heat use reduced the energy demand up to 15% and carbon footprint up to 19%; • Longer harvest time raised the energy demand up to 87% and carbon footprint up to 72%.
Suggested Reviewers:	<p>Maria Lucia Ghirardi, Post Doctor scientist at NREL, Renewable and Sustainable Energy Institute (RAISE) Maria.Ghirardi@nrel.gov Dr. Maria Ghirardi is a principal scientist at NREL, a research associate professor at the Colorado School of Mines, and a Renewable and Sustainable Energy Institute (RASEI) Fellow. She is involved in both basic and applied research and has had extensive experience working with photosynthetic organisms and its area of activity is also in algal fuels.</p> <p>Eduardo de Aguiar do Couto, Post Doctor Teacher, Federal University of Itajubá - Campus Itabira eduardo.acouto@hotmail.com Dr. Eduardo do Couto participates in research related to exploring the potential of microalgae in the bioremediation of effluents and their use as raw material for the production of bioenergy and agricultural uses.</p> <p>Amilton Barbosa Botelho Junior, Post Doctor Teacher, University of Sao Paulo amilton.barbosa20@gmail.com Dr. Amilton Botelho Junior works in the area of life cycle analysis and public policy.</p> <p>Lucas Bonfim Rocha, Post Doctor Researcher, Federal Technological University of Paraná lucasrocha@utfpr.edu.br Researcher in the field of modeling, simulation, and optimization of chemical processes.</p> <p>Jean Pierre Henry Balbaud Ometto, Post Doctor UNIVERSITY OF UTAH jean.ometto@inpe.br Senior Researcher at the National Institute for Space Research in Brazil and Coordinator of the Earth System Science Center (CCST / INPE). Postgraduate Professor at CCST / INPE and Collaborating Professor at PPG at NEPAM (UNICAMP). Academic and research activities are focused on the diagnosis and prognosis of anthropogenic activities, and climate change, in natural biogeochemical processes, land use and land cover, greenhouse gas emissions and sustainability indicators; with contributions to the Brazilian government on issues related to the quantification of carbon emissions from the LULUCF sector. Appointed to the IPCC (Working Group II, and to the Task Force on GHG Emission Inventories, to the AR5 and AR6 cycles) and</p>