

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NICHOLAS MELENEK

ANÁLISE EXERGoeconômica da produção e utilização da biomassa de
microalgas como promotor de crescimento vegetal

CURITIBA

2024

NICHOLAS MELENEK

ANÁLISE EXERGUECONÔMICA DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA DE
MICROALGAS COMO PROMOTOR DE CRESCIMENTO VEGETAL

Trabalho apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof José Viriato Coelho Vargas

Coorientador: Dr. Wellington Balmant

Coorientador: Dr. Diego de Oliveira Corrêa

CURITIBA

2024

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Melenek, Nicholas

Análise exergoeconômica da produção e utilização da biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal / Nicholas Melenek. – Curitiba, 2024.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: José Viriato Coelho Vargas

Coorientador: Wellington Balmant

Coorientador: Diego de Oliveira Corrêa

1. Exergoeconomia. 2. Microalga. 3. Fotobiorreator. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais. III. Vargas, José Viriato Coelho. IV. Balmant, Wellington. V. Corrêa, Diego de Oliveira. VI. Título.

Bibliotecário: Leticia Priscila Azevedo de Sousa CRB-9/2029



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
CIÊNCIA DOS MATERIAIS - 40001016033P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **NICHOLAS MELENEK** intitulada: **ANÁLISE EXERGOCONÔMICA DA PRODUÇÃO E UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA DE MICROALGAS COMO PROMOTOR DE CRESCIMENTO VEGETAL**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Junho de 2024.

Assinatura Eletrônica

02/07/2024 16:18:40.0

JOSE VIRIATO COELHO VARGAS

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

04/07/2024 17:00:35.0

LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL)

Assinatura Eletrônica

02/07/2024 15:56:19.0

DANTE HOMERO MOSCA JÚNIOR

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - CURITIBA - Paraná - Brasil

CEP 81531-990 - Tel: (41) 3361-3308 - E-mail: pipe@ufpr.br

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 377447

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://siga.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 377447

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que,
quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer ao meu orientador, José Viriato Coelho Vargas, por sua orientação, apoio, e paciência incansável. Suas visões claras, conhecimento especializado e dedicação ao avanço do meu trabalho foram inestimáveis.

Meus sinceros agradecimentos também se estendem aos membros da banca avaliadora, por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação deste trabalho. Suas valiosas contribuições e críticas construtivas ajudaram a refinar e enriquecer esta pesquisa.

Uma palavra de apreço vai para meus colegas de laboratório, cujas discussões, trocas de experiências, trabalho e amizade tornaram esta jornada mais enriquecedora e empolgante. Não posso deixar de expressar minha gratidão às fontes de financiamento e bolsas de estudo que tornaram este estudo possível. Agradeço a CAPES por seu apoio financeiro.

Quero também agradecer a minha família por seu apoio inabalável, amor e encorajamento durante esta jornada acadêmica. Suas palavras de incentivo fizeram toda a diferença. Por último, mas não menos importante, quero agradecer a todos aqueles cujas contribuições diretas ou indiretas ajudaram a moldar esta dissertação. Seu apoio foi fundamental.

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que acreditaram em mim e me apoiaram ao longo deste caminho. Muito obrigado a todos.

RESUMO

Com uma população global em crescimento acelerado e uma crescente pressão sobre os recursos de produção de alimentos, a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis para atender às demandas em todo o mundo é mais urgente do que nunca. Ao mesmo tempo, as preocupações com o aquecimento global e as emissões de carbono elevaram a demanda por processos ambientalmente responsáveis. As microalgas, devido às suas diversas aplicações, potencial de cultivo contínuo e capacidade de absorver gases de efeito estufa e remediar a água, surgiram como uma promissora área de pesquisa. Este estudo se concentra na análise exergoeconômica da produção de biomassa de microalga e sua utilização como promotor de crescimento de plantas, lançando luz sobre sua viabilidade e sustentabilidade financeira. A análise abrange três subsistemas principais: um incinerador (gerador de emissões ricas em CO_2), um fotobiorreator e uma etapa de promoção de crescimento de vegetal. Os dois primeiros sistemas estão acoplados por uma coluna de fixação de gases, onde o meio de crescimento de microalgas do fotobiorreator interage com os gases gerados pela incineração ricos em CO_2 ocorrendo a absorção. Os resultados desta análise revelam que as etapas do incinerador e do fotobiorreator experimentam uma destruição significativa de exergia, sugerindo oportunidades para otimização adicional. A avaliação exergoeconômica estabelece um custo exergético de $5,245 \cdot 10^{-3} R\$/kJ$, $8,440 \cdot 10^{-3} R\$/kJ$, e $1,705 \cdot 10^{-2} R\$/kJ$ para a produção de microalga, produção de biomassa seca e a utilização da biomassa de microalga como bioestimulante. Esses valores destacam a necessidade de explorar vias alternativas de utilização, com foco em aplicações primárias na produção de biodiesel, seguidas pela extração eficiente de bioestimulantes. Essas descobertas fornecem informações valiosas sobre o uso da biomassa de microalgas como uma solução sustentável e economicamente viável para melhorar o crescimento das plantas e promover um futuro agrícola mais ecologicamente amigável.

Palavras-chaves: Exergia, Exergoeconomia, Microalga, Bioestimulante, Fotobiorreator

ABSTRACT

With a rapidly growing global population and increasing pressure on food production resources, the need for innovative and sustainable solutions to meet demands worldwide is more urgent than ever. Simultaneously, concerns about global warming and carbon emissions have elevated the demand for environmentally responsible processes. Microalgae, due to their diverse applications, potential for continuous cultivation, and the ability to absorb greenhouse gases and remediate water, have emerged as a promising area of research. This study focuses on the exergoeconomic analysis of microalgae biomass production and its use as a plant growth promoter, shedding light on its viability and financial sustainability. The analysis encompasses three main subsystems: an incinerator (generating CO_2 -rich emissions), a photobioreactor, and a plant growth promotion stage. The first two systems are coupled through a gas scrubber, where the microalgae growth medium from the photobioreactor interacts with the CO_2 -rich emissions from incineration, facilitating absorption. The results of this analysis reveal that the incinerator and photobioreactor stages experience significant exergy destruction, suggesting opportunities for further optimization. The exergoeconomic assessment establishes an exergetic cost of $5.245 \cdot 10^{-3} R\$/kJ$, $8.440 \cdot 10^{-3} R\$/kJ$, and $1.705 \cdot 10^{-2} R\$/kJ$ for microalgae production, dry biomass production, and the use of microalgae biomass as a plant bio-stimulant, respectively. These values highlight the need to explore alternative utilization pathways, focusing on primary applications in biodiesel production, followed by the efficient extraction of bio-stimulants. These findings provide valuable insights into the use of microalgae biomass as a sustainable and economically viable solution to enhance plant growth and promote a more ecologically friendly agricultural future.

Key-words: Exergy, Exergoeconomic, Microalga, Biostimulant, Photobioreactor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Potenciais aplicações da biomassa de microalgas e seus componentes	18
FIGURA 2 – Número das publicações anuais contendo a palavra-chave <i>Microalgae</i>	19
FIGURA 3 – As 10 Principais Áreas em número de Publicações Relacionadas às Microalgas	20
FIGURA 4 – Sistema aberto (<i>raceway</i>) de cultivo de microalgas	21
FIGURA 5 – Sistemas fechados para cultivo de microalgas	22
FIGURA 6 – Fluxograma de atividades realizadas no NPDEAS	25
FIGURA 7 – Fotobiorreator (sistema fechado) patenteado do NPDEAS para produção de microalgas	26
FIGURA 8 – Uso de Terras para finalidades agrícolas ao longo dos anos	27
FIGURA 9 – Quantidade de fertilizantes utilizados no período de 1962 a 2020	28
FIGURA 10 – Numero de publicações com a palavra-chave <i>fertilizer</i> juntamente com <i>organic</i> ou <i>sintetyc</i> no título, palavras-chave ou resumo	31
FIGURA 11 – Sistema de combustão exemplificando a conservação de energia e a utilidade da exergia	35
FIGURA 12 – Número de publicações anuais que contem a palavra-chave <i>exergoeconomic</i> ou <i>thermoeconomic</i>	38
FIGURA 13 – Número de publicações anuais que contem a palavra-chave <i>exergoeconomic</i> e <i>microalgae</i>	39
FIGURA 14 – Ilustração das etapas do sistema estudado.	43
FIGURA 15 – Diagrama mais detalhado do sistema estudado, contendo os fluxos de massas, calor, energia e trabalho.	45
FIGURA 16 – Exergia destruída no sistema de produção de microalgas, valores referentes a Tabela 4	59
FIGURA 17 – Irradiação solar no topo da atmosfera, bem como a quantidade que consegue penetrar na atmosfera e chegar ao nível do mar. Faixas de absorção de radiação dos pigmentos <i>Chlorophyll a</i> e <i>Chlorophyll b</i> presentes nas plantas e responsáveis pela absorção de energia utilizada para a fotossíntese.	60

FIGURA 18 – Valores do custo exergético para as etapas de produção de microalgas (c_{12}), e etapas subsequentes para produção de biomassa seca, floculador (c_{15}), centrífuga (c_{17}), desidratador (c_{19}) e a sua utilização como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) para a análise feita neste trabalho (A), e para a análise utilizando os valores de c_{12} encontrados por Galante et al. (2022) (B).	62
FIGURA 19 – Valores da Relação entre taxas de exergia do produto e do combustível (equação (4.2)) para cada etapa do sistema, a etapa PCV mostra uma eficiência exergética maior que 100 % devida a maneira que a exergia da etapa foi contabilizada, neste caso não colocando numericamente o valor referente a energia solar absorvida pelo cultivo.	64
FIGURA 20 – Gráfico da razão entre as exergias do fluxo de massas dos produtos pela exergia utilizada como combustível e trabalho para cada etapa.	64
FIGURA 21 – Valores obtidos através da função de Destruição exergética + taxas de custo não exergético $\dot{Z}\dot{C}_D$ (4.3), onde cada quadrado representa uma porcentagem dos valores totais do sistema, mostram que a etapa mais custosa para construção, operação, manutenção e gastos com combustíveis dado sua ineficiência é a etapa do incinerador.	65
FIGURA 22 – Custo exergético das etapas de produção de microalgas (FBR), etapa final da produção de biomassa seca de microalgas (DESI) e a sua utilização como bioestimulante (PCV) com a utilização de uma usina rankine para recuperação de energia na etapa do trocador de calor.	66
FIGURA 23 – Custo exergético da utilização de biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) em função da eficácia no uso do PCV.	67
FIGURA 24 – Valores do Custo exergético da utilização de biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) com a variação de massas de entradas e saídas (mantendo as proporções) na etapa de PCV. Curva ajustada é uma função $b + a/x$. Limite inferior obtido avaliando o valor da função encontrado quando x tende ao infinito.	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Componentes utilizados para a preparação do meio de cultivo CHU	24
TABELA 2 – Investimentos em capital inicial(\dot{Z}_{CI}) e operação/manutenção(\dot{Z}_{OM}) para a produção de biomassa de microalgas para cada etapa do processo	57
TABELA 3 – Exergias para cada fluxo de massa no sistema	58
TABELA 4 – Exergia destruída pelas etapas do sistema de produção de biomassa de microalgas e a sua utilização como PCV	59
TABELA 5 – Taxa de custos exergéticos e custos diários para cada fluxo de massa no sistema	61
TABELA 6 – Valores das funções objetivo referentes as equações (4.1), (4.2) e (4.3)	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	16
2	REVISÃO TEÓRICA	17
2.1	MICROALGAS	17
2.1.1	Produção de microalgas e biomassa	19
2.1.1.1	Sistemas de produção de microalgas	20
2.1.2	Fatores que influenciam a produção de microalgas	22
2.1.3	Captura de gases de combustão através do cultivo de microalgas	23
2.1.4	Sistemas de recuperação de biomassa de microalgas	24
2.1.5	Produção de microalgas e biomassa no NPDEAS - UFPR	25
2.2	FERTILIZANTES	27
2.2.1	Fertilizantes sintéticos/inorgânicos	28
2.2.2	Fertilizantes orgânicos	31
2.2.3	Bioestimulantes	33
2.3	EXERGIA	34
2.4	EXERGOECONOMIA	37
2.5	DESAFIOS	40
3	OBJETIVOS	42
3.1	OBJETIVOS GERAIS	42
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	42
4	MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1	SISTEMA ANALISADO	43
4.2	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	44
4.3	DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE EXER- GÉTICA DO SISTEMA	46
4.3.1	Incinerador	46
4.3.2	Trocador de calor	47
4.3.3	Coluna de fixação	47
4.3.4	Fotobiorreator	47
4.3.5	Floculador	48
4.3.6	Centrífuga	49
4.3.7	Desidratador	49

		12
4.3.8	Promotor de crescimento vegetal	49
4.4	DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE EXER- GOECONOMICA DO SISTEMA	50
4.4.1	Incinerador	50
4.4.2	Trocador de calor	50
4.4.3	Coluna de fixação	51
4.4.4	Fotobiorreator	51
4.4.5	Floculador	51
4.4.6	Centrífuga	52
4.4.7	Desidratador	52
4.4.8	Promotor de crescimento vegetal	53
4.5	MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DAS FUNÇÕES OBJETIVO .	53
4.5.1	Incinerador	54
4.5.2	Trocador de calor	54
4.5.3	Coluna de fixação	54
4.5.4	Fotobiorreator	54
4.5.5	Floculador	55
4.5.6	Centrífuga	55
4.5.7	Desidratador	55
4.5.8	Promotor de crescimento vegetal	55
4.6	ANÁLISE DE PARÂMETROS	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	CUSTO DE CAPITAL INICIAL E DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO . . .	57
5.2	TAXAS DE EXERGIA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PROMOÇÃO DE CRESCIMENTO VEGETAL .	57
5.3	AVALIAÇÃO DE CUSTOS EXERGÉTICOS DO PROCESSO DE PRODU- ÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PROMOÇÃO DE CRES- CIMENTO VEGETAL	60
5.3.1	Custo exergético da produção de biomassa seca de microalgas	60
5.3.2	Custo exergético da utilização biomassa seca de microalgas como pro- motor de crescimento vegetal	62
5.4	AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO	63
5.5	ANALISE DOS PARAMETROS	65
6	CONCLUSÕES	69
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	70

REFERÊNCIAS 71

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

Terra e água são recursos críticos tanto para a produção de alimentos quanto para a subsistência humana. No entanto, esses recursos estão enfrentando pressões crescentes devido ao crescimento populacional, desenvolvimento econômico e mudanças climáticas. Como resultado, as indústrias estão direcionando seu foco para processos e produtos mais sustentáveis.

Os avanços sociais têm levado a uma maior produção e consumo de alimentos e tecnologia, resultando em melhor nutrição, mas também em suplementos menos eficientes para a vida diária (MEYER; TURNER, 1992; LANG, 2014; RASK; RASK, 2011). Isso tem contribuído para um aumento significativo na geração de resíduos, tanto biológicos quanto sintéticos, uma vez que os processos de fabricação e atividades relacionadas não são 100% eficientes. O crescimento populacional acelerado, agrava ainda mais esse problema (SCHNEIDER et al., 2011).

Na última década, houve um aumento significativo nos níveis de dióxido de carbono (CO_2) (CLIMATE CHANGE (IPCC), 2014; NOAA, 2020; RETALLACK; CONDE, 2020), provavelmente atribuído aos fatores mencionados anteriormente. Pesquisas indicam que maiores concentrações atmosféricas de CO_2 podem ter impactos negativos em plantações e cultivos, representando uma ameaça à produtividade agrícola (MYERS et al., 2014; HAMPTON et al., 2013). Conseqüentemente, há uma crescente necessidade de reavaliar a eficiência e o impacto ambiental de diversos setores, incluindo transporte baseado em combustíveis, produção de energia e sistemas alimentares. Isso tem levado à busca por materiais alternativos que possam substituir substâncias prejudiciais ao meio ambiente atualmente em uso.

A agricultura moderna, em particular, está explorando métodos mais eficientes de produção de culturas alimentares. Com a demanda crescente e as condições climáticas em mudança, há uma maior dependência de fertilizantes e produtos químicos para aumentar o rendimento das culturas e a resistência contra doenças, possibilitando a produção em regiões menos favoráveis (SAVCI, 2012). No entanto, regulamentações rígidas sobre o uso de fertilizantes sintéticos, impulsionadas por preocupações com o meio ambiente e a saúde pública a longo prazo, têm motivado a busca por biofertilizantes.

A biomassa de microalgas tem se destacado como uma opção promissora de biofertilizante, demonstrando efeitos positivos no crescimento das culturas, como aumento do tamanho das plantas, desenvolvimento das raízes e absorção e armazena-

mento de nutrientes. Além disso, a biomassa de microalgas tem mostrado potencial na micropropagação de espécies ornamentais (NAVARRO et al., 2021; RONGA et al., 2019; MAZEPA et al., 2021; CORBELLINI et al., 2020). A produção de biomassa de microalgas envolve dois métodos principais: o sistema aberto conhecido como lagoa de circulação e o sistema fechado chamado fotobiorreator. Cada abordagem tem suas vantagens e desvantagens, sendo que os fotobiorreatores tubulares horizontais (FBRs) são economicamente desafiadores devido a uma baixa relação líquida de energia (NER) em comparação com os FBRs de placa plana e as lagoas de circulação (JORQUERA et al., 2010).

Diante da luta global contra as mudanças climáticas e os gases atmosféricos prejudiciais, as tecnologias baseadas em algas, incluindo o cultivo de microalgas em fotobiorreatores, têm despertado interesse significativo, em função de sua capacidade de capturar dióxido de carbono da atmosfera ou emissões industriais, contribuindo para sua mitigação (CHISTI, 2007; VO et al., 2019; ZHANG; CAI, 2018). A configuração discutida neste trabalho envolve um sistema de cultivo de microalgas onde as microalgas interagem com gases provenientes de um incinerador de resíduos sólidos municipais, auxiliando assim na fixação de carbono e, adicionalmente, gerando biomassa microalgal rica em compostos bioativos com inúmeras potenciais aplicações, sobretudo na agricultura.

Como processo tecnológico em desenvolvimento, o cultivo de microalgas em fotobiorreatores para fixação de CO_2 e geração de bioprodutos necessita de maior viabilidade técnica e econômica, o que pode ser alcançada através de uma análise para determinação da exergia destruída nestes processos. A exergia, um conceito termodinâmico fundamental usado para medir a qualidade da energia, tem se mostrado uma ferramenta robusta na avaliação da eficiência energética e na identificação de perdas de energia em diversos processos. Baseando-se nesse fundamento, a exergonomia leva esses princípios um passo adiante, integrando de forma harmoniosa a análise de exergia com considerações econômicas, atribuindo um valor monetário a cada fluxo de exergia no sistema. Essa abordagem inovadora não só possibilita a análise de ineficiências físicas em sistemas de energia, mas também fornece uma visão abrangente das ramificações econômicas associadas a essas ineficiências (BEJAN, 1948; MORAN et al., 2014).

Embora tenham sido realizadas análises tecnoeconômicas de produção de biomassa de microalgas, explorando os requisitos de energia, investimentos de capital e desempenho geral, nenhuma literatura existente aborda especificamente a análise exérgica e termoeconômica do processo de fixação de CO_2 por microalgas, a produção de biomassa e o subsequente uso da biomassa como biofertilizante. Essas informações são cruciais, pois a análise exérgica permite a avaliação do potencial de

otimização, enquanto a termoeconomia avalia a rentabilidade e os aspectos financeiros do sistema.

Portanto, o objetivo deste estudo é desenvolver um modelo matemático para a análise termodinâmica de uma planta de geração de biomassa de microalgas em fotobiorreator, incorporando uma coluna de fixação de CO_2 e um incinerador de resíduos sólidos municipais. Esse modelo visa avaliar sua viabilidade termoeconômica, lançando luz sobre o potencial de utilização da biomassa de microalgas como biofertilizante.

Para poder avaliar e maximizar o desempenho do sistema, foram realizadas análise exérgica (EA) e exergoeconomia (EE). Esses métodos são aspectos estabelecidos da evolução da termodinâmica nas últimas décadas (VARGAS et al., 2000; ORDONEZ, 2003).

1.2 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este documento está organizado nas seguintes seções:

A seção 1 oferece a contextualização da pesquisa, bem como a sua motivação.

A seção 2 contém a revisão bibliográfica que aborda temas sobre fertilizantes e promotores de crescimento vegetal; a produção de microalgas e biomassa e também traz uma revisão sobre a análise matemática utilizando exergia e exergoeconomia. Ao final, os desafios deste trabalho são apontados.

A seção 3 expõe os objetivos gerais e específicos que guiam esta pesquisa.

A seção 4 apresenta os materiais e métodos empregados para esta análise, sendo estes o sistema estudado e as equações matemáticas utilizadas para a modelagem.

A seção 5 mostra os resultados obtidos e esperados da análise do sistema.

A seção 6 traz as conclusões e considerações finais.

A seção 7 contém recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO TEÓRICA

Nesta seção será apresentada uma revisão bibliográfica dos principais temas abordados nesse trabalho, a fim de esclarecer o leitor sobre os conceitos mais pertinentes da área de pesquisa, bem como realizar um levantamento do estado da arte da produção acadêmica sobre os assuntos trabalhados. Primeiramente serão apresentados conceitos básicos sobre a biologia das microalgas, assim como as tecnologias mais empregadas para o cultivo e geração de biomassa, e uma visão geral da produção de biomassa no Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NP-DEAS), seguidos por uma visão geral sobre os fertilizantes e suas características. Ao final será abordado os conceitos de exergia e exergoeconomia e como esses conceitos são utilizados em análises.

2.1 MICROALGAS

As microalgas são organismos fotossintetizantes aquáticos, eucarióticos e unicelulares, altamente diversificados, encontrados em uma ampla variedade de ambientes, como rios, lagos e oceanos. Elas possuem um tamanho microscópico, geralmente variando de 1 a 100 micrômetros, podendo existir como células únicas ou em formas multicelulares coloniais. Até o momento, mais de 30.000 espécies de microalgas foram descritas, mas a verdadeira diversidade pode ser muito maior (ESJ et al., 2023; ALVAREZ et al., 2021).

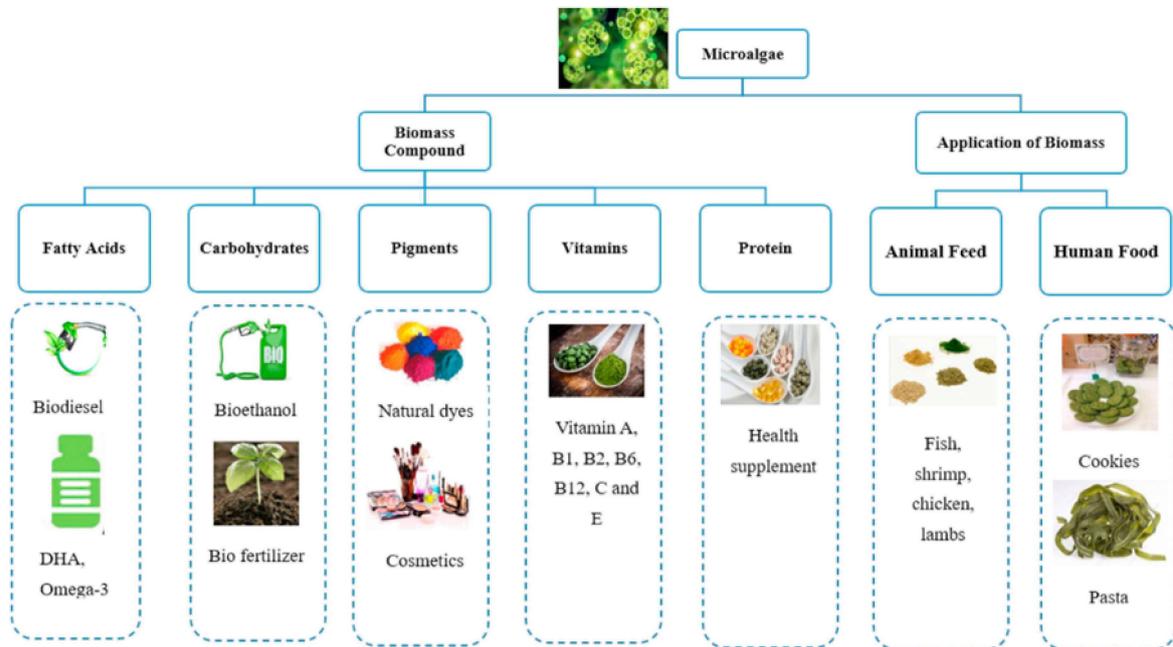
O termo “algas” muitas vezes não se refere a um grupo taxonômico formal, mas a um conjunto de organismos fotossintetizantes, produtores de oxigênio, com o pigmento clorofila *A* (com exceções), que não necessariamente compartilham um ancestral comum. Com base nos pigmentos que contêm, as microalgas são classificadas como clorofíceas (algas verdes), feófitas (algas marrons) ou rodófitas (algas vermelhas) (KIISKI et al., 2016).

O metabolismo das microalgas pode ser autotrófico, heterotrófico ou mixotrófico. No metabolismo autotrófico, as funções são regidas pela fotossíntese. No metabolismo heterotrófico, as microalgas obtêm nutrientes externos para sustentar seu metabolismo na ausência de luz. Por fim, no cultivo mixotrófico, ocorre a atuação de ambos os tipos de metabolismo mencionados anteriormente (KIISKI et al., 2016).

Além de desempenharem um papel fundamental nos ciclos globais de carbono e oxigênio, as microalgas são um componente importante dos ecossistemas aquáticos, fornecendo a base da cadeia alimentar sendo também capazes de produzir compostos de alto valor, como lipídios, pigmentos, proteínas e carboidratos, tornando-as candidatas

promissoras para várias aplicações comerciais e industriais, incluindo a produção de biocombustíveis, ração animal e produtos químicos de alto valor, como antioxidantes, pigmentos e ácidos graxos ômega-3 (Figura 1) (KUSMAYADI et al., 2021). Essas propriedades fizeram com que o interesse da comunidade científica nas microalgas aumentasse nos últimos anos (Figura 2), atraindo a atenção de diversas áreas dado sua versatilidade de produção e aplicação (Figura 3), segundo o portal Scopus, para a publicações e trabalhos que contem a palavra *microalgae* no título, palavras-chave ou no resumo.

FIGURA 1 – Potenciais aplicações da biomassa de microalgas e seus componentes



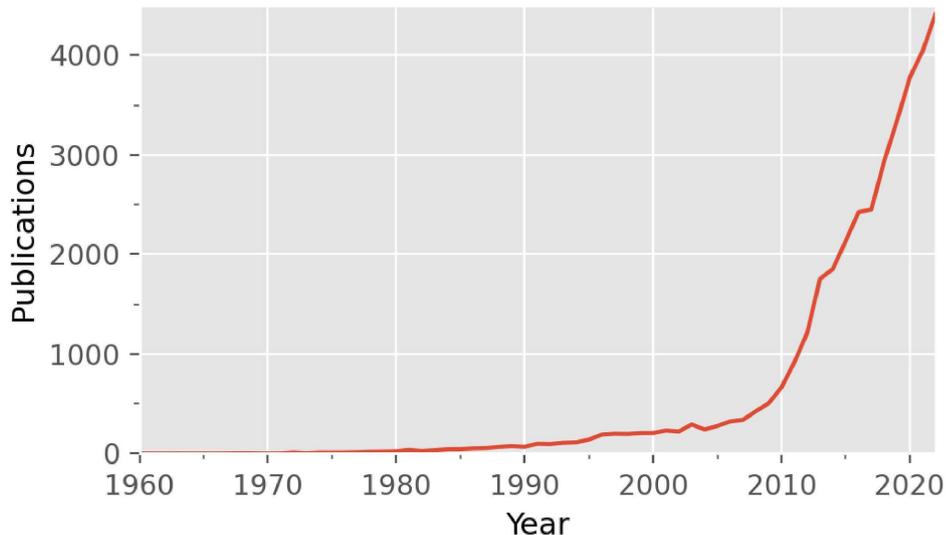
Fonte: Kusmayadi et al. (2021)

As microalgas são mais eficientes na produção de óleo do que culturas mais comumente utilizadas, como a palma e a soja (CHISTI, 2007). O cultivo de microalgas não requer terra arável, elas não apresentam sazonalidade na produção, utilizam o CO_2 atmosférico para produzir biomassa, e ainda podem realizar a fixação de CO_2 concentrado disponível em instalações de geração de eletricidade a carvão, utilizando esses gases como uma fonte extra de carbono inorgânico (BILANOVIC et al., 2012).

A água é um recurso necessário e indispensável para o cultivo de algas. As microalgas podem ser cultivadas em água doce, incluindo águas residuais domésticas, água salobra e água do mar, tendo potencial na remediação ambiental (LUANGPIPAT; CHISTI, 2017). Elas podem ser usadas para capturar e remover poluentes, como metais pesados, poluentes orgânicos e nutrientes de águas residuais, melhorando a qualidade da água e reduzindo o impacto da poluição no meio ambiente (KUSMAYADI et al., 2021; RICHMOND, 2004).

Uma das aplicações mais conhecidas das microalgas é na produção de biocombustíveis, como o biohidrogênio, além de produzirem lipídios que podem ser convertidos em biodiesel, oferecendo uma alternativa renovável e sustentável aos combustíveis fósseis. Além disso, a biomassa de microalgas pode ser usada como matéria-prima para a produção de biogás, uma mistura de metano e dióxido de carbono que pode ser usada como fonte de energia (NAGARAJAN et al., 2017).

FIGURA 2 – Número das publicações anuais contendo a palavra-chave *Microalgae*



Fonte: Scopus (2023)

2.1.1 Produção de microalgas e biomassa

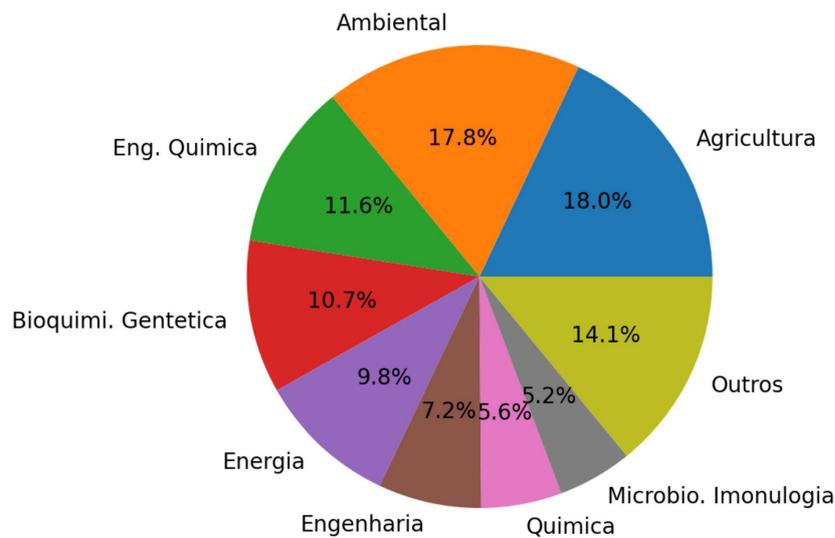
As microalgas são extremamente versáteis e podem ser cultivadas utilizando uma ampla variedade de métodos, incluindo sistemas de lagoas abertas (sistema aberto), fotobiorreatores (sistema fechado) e sistemas híbridos. Além disso, elas são conhecidas por seu rápido crescimento e pela capacidade de serem colhidas várias vezes ao ano, tornando seu cultivo altamente eficiente para a produção de biocombustíveis e outros produtos de alto valor, enquanto também contribuem para a redução das emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais (ACIÉN et al., 2017).

A obtenção de biomassa e produtos metabólicos das microalgas pode ser influenciada pela interação de fatores biológicos, físicos e químicos (FALKOWSKI; RAVEN, 1997). Os fatores biológicos estão relacionados às taxas metabólicas características da espécie cultivada, bem como à influência de outros microrganismos no crescimento das microalgas. Os principais fatores físico-químicos incluem pH, iluminação, temperatura, salinidade e disponibilidade de nutrientes no meio (GUILLARD, 1975; RICHMOND, 2004).

No entanto, a tecnologia de cultivo de microalgas ainda é um campo em desenvolvimento e enfrenta desafios como o alto custo de cultivo, a seleção das espécies

adequadas de microalgas e o desenvolvimento de métodos eficientes e econômicos para colheita e processamento. À medida que a pesquisa e o desenvolvimento avançam, é provável que as tecnologias de cultivo de microalgas melhorem e se tornem mais acessíveis para a produção comercial. Com isso, podemos esperar um aumento na utilização de microalgas em diversos setores, transformando-as em uma fonte permanente para geração de energia e produtos sustentáveis e renováveis.

FIGURA 3 – As 10 Principais Áreas em número de Publicações Relacionadas às Microalgas



Fonte: Scopus (2023)

2.1.1.1 Sistemas de produção de microalgas

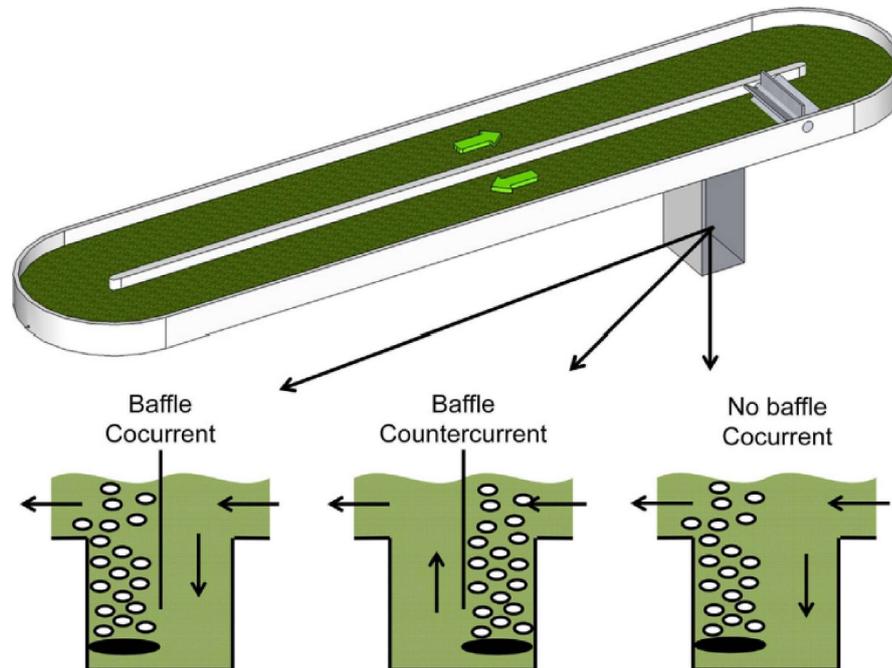
Os sistemas abertos de cultivo de microalgas são aqueles em que a cultura é exposta ao ambiente. O cultivo em lagoas ou canais abertos são exemplos de sistemas abertos (Figura 4). Esses sistemas podem se utilizar de diferentes fontes de luz, como luz solar natural ou iluminação artificial, e de diferentes tipos de água, como água do mar ou águas residuais (SLEGERS et al., 2013).

A principal vantagem dos sistemas abertos é a simplicidade e baixo custo de construção e operação. No entanto, esses sistemas também apresentam desafios, como maior susceptibilidade à contaminação e variações ambientais, como temperatura, luz e pH (COHEN et al., 1991). É importante ressaltar que, para minimizar esses desafios, os sistemas abertos devem ser projetados e operados de forma cuidadosa, utilizando boas práticas de manejo e monitoramento constante (TAN et al., 2020).

Um sistema fechado de cultivo de microalgas se refere a um método no qual a cultura microalgal é mantida em um ambiente controlado, como um tanque ou biorreator. Nesse ambiente, fatores cruciais, como temperatura, luz, pH e níveis de nutrientes, são

cuidadosamente monitorados e ajustados para otimizar o crescimento das microalgas (TAN et al., 2020).

FIGURA 4 – Sistema aberto (*raceway*) de cultivo de microalgas



Fonte: Ación et al. (2017)

Existem dois tipos principais de sistemas fechados: fotobiorreatores e biorreatores (Figura 5). Fotobiorreatores são sistemas fechados que utilizam a luz como fonte de energia para a fotossíntese e são ideais para o cultivo de microalgas. Já os biorreatores são sistemas fechados que empregam energia química para o cultivo das microalgas. A principal vantagem desses sistemas é o controle rigoroso das condições de crescimento, o que resulta em uma produção de biomassa mais consistente e previsível (COHEN et al., 1991). Adicionalmente, eles são menos suscetíveis à contaminação externa, garantindo a pureza do produto final, e permitem uma maior produtividade que pode mais que dobrar em comparação aos sistemas abertos (CHISTI, 2007).

Os fotobiorreatores são reatores fechados que utilizam material transparente projetados para otimizar a penetração da luz na cultura e facilitar a fotossíntese, reduzindo o sombreamento das próprias microalgas. A sedimentação da biomassa em tubos é evitada mantendo um fluxo altamente turbulento. Esse fluxo é gerado usando uma bomba mecânica ou uma bomba de ar mais suave. Os fotobiorreatores tubulares ao ar livre são resfriados usando trocadores de calor, com uma bobina de troca de calor localizada na coluna de desgaseificação sendo eficaz e econômico. Alternativamente, os trocadores de calor podem ser colocados na malha tubular (ESJ et al., 2023).

Dado o seu potencial de produtividade muito maior em comparação com as lagoas de cultivo, é provável que os fotobiorreatores tubulares sejam amplamente

utilizados na produção da biomassa microalgal necessária para a produção de biodiesel (CHISTI, 2007). No entanto, é importante mencionar que esses sistemas podem ser mais complexos e dispendiosos para construir e operar em comparação com os sistemas abertos, requerendo sistemas de monitoramento e controle mais sofisticados (WANG et al., 2012).

FIGURA 5 – Sistemas fechados para cultivo de microalgas



Fonte: Ación et al. (2017)

2.1.2 Fatores que influenciam a produção de microalgas

A temperatura desempenha um papel crítico na produção de microalgas. Idealmente, a faixa de temperatura ótima para a produção de biomassa varia de 20°C a 25°C, embora essa faixa possa variar ligeiramente dependendo da espécie de microalga. A produtividade geralmente aumenta à medida que a temperatura sobe até atingir um ponto ótimo, mas acima desse ponto, a produtividade diminui rapidamente, especialmente em temperaturas superiores a 35°C (RAZZAK et al., 2013; ENAMALA et al., 2018; SINGH et al., 2021; WANG et al., 2012).

O dióxido de carbono (CO_2) desempenha um papel fundamental no cultivo de microalgas, especialmente em sistemas autotróficos, onde o CO_2 é a principal fonte de carbono. A concentração de CO_2 na fase gasosa afeta significativamente o crescimento e a captura de CO_2 pelas microalgas. Para a microalga *Spirulina platensis*, concentrações abaixo de 5% de CO_2 no gás de alimentação resultam em crescimento insatisfatório e captura de CO_2 limitada. Concentrações em torno de 10% proporcionam crescimento rápido e captura eficiente de CO_2 , enquanto concentrações acima de 15%

tornam-se tóxicas, prejudicando o crescimento devido às mudanças no pH do meio (RAZZAK et al., 2013; ENAMALA et al., 2018; SINGH et al., 2021; WANG et al., 2012).

Em outro estudo com *Chlorella vulgaris* em lagoa aberta, a concentração ideal de CO_2 no gás de entrada foi de 16%, resultando no maior crescimento da biomassa. No entanto, até 24% de CO_2 mostrou-se viável, indicando a capacidade dessa alga de tolerar concentrações mais elevadas de CO_2 e ainda produzir biomassa (ENAMALA et al., 2018). Para a alga marinha *Nannochloropsis salina*, um experimento em Erlenmeyer revelou que uma concentração de 6% de CO_2 no gás de entrada promoveu o crescimento ideal, enquanto concentrações próximas a 20% inibiram completamente o crescimento. A remoção de oxigênio (O_2) do gás de entrada, mesmo em concentrações elevadas de CO_2 , foi identificada como uma estratégia para otimizar o cultivo, aumentando a produção de biomassa e a captura de CO_2 (RAZZAK et al., 2013; SINGH et al., 2021; WANG et al., 2012).

O pH é outro fator impactante na produção de microalgas. Cada espécie de microalga possui uma faixa de pH ideal para o crescimento, geralmente entre 6,5 e 8,5. Manter o pH dentro dessa faixa é essencial para maximizar a produtividade, pois valores extremamente ácidos ou alcalinos podem ser tóxicos, prejudicando processos metabólicos essenciais e reduzindo o crescimento das microalgas. Além disso, o pH afeta a solubilidade de nutrientes vitais, como nitrogênio e fósforo, que são necessários para o desenvolvimento das microalgas (RAZZAK et al., 2013; ENAMALA et al., 2018; WANG et al., 2012).

Do ponto de vista nutricional, a formulação dos meios de cultivo é também um fator que influencia a produção de microalgas e visa otimizar o crescimento, proporcionando condições ideais para propagação eficaz desses organismos. Existem dois tipos principais de meios: sólidos, que incluem agentes solidificantes como o ágar e são comumente utilizados para o isolamento; e líquidos, empregados na manutenção de cepas e na produção de biomassa (JACINAVICIUS et al., 2006). Os meios sintéticos são compostos por macronutrientes (C, N, P, S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu, Mo, Co). Algumas microalgas necessitam também de concentrações de vitaminas do complexo B (GUILLARD, 1975). Na literatura existem vários meios empregados para cultivo de diferentes espécies de microalgas, dentre os quais o meio CHU apresenta composição com macro e micronutrientes adequada para atender ao crescimento de uma ampla gama de espécies de água doce, sobretudo clorófitas (Tabela 1) (BISCHOFF; BOLD, 1963).

2.1.3 Captura de gases de combustão através do cultivo de microalgas

As microalgas desempenham um papel importante na captura de gases, como o CO_2 e o metano, transformando-os em biomassa em um processo conhecido como

sequestro de carbono. Este processo é aplicável na captura de emissões de CO_2 de usinas de energia e instalações industriais, onde as microalgas utilizam o CO_2 para a fotossíntese, e posteriormente, podem ser colhidas para produzir biocombustíveis, ração animal e outros produtos (BILANOVIC et al., 2012; SINGH et al., 2021; WANG et al., 2012).

TABELA 1 – Componentes utilizados para a preparação do meio de cultivo CHU

Componente	Concentração final (g/L)
Nitrato de sódio	$2,50 \cdot 10^{-01}$
Cloreto de cálcio di-hidratado	$2,50 \cdot 10^{-02}$
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	$7,50 \cdot 10^{-02}$
Fosfato de potássio dibásico	$7,50 \cdot 10^{-02}$
Fosfato de potássio monobásico	$1,75 \cdot 10^{-01}$
Cloreto de sódio	$2,50 \cdot 10^{-02}$
EDTA	$5,00 \cdot 10^{-03}$
Hidróxido de potássio	$3,10 \cdot 10^{-02}$
Sulfato ferroso hepta-hidratado	$5,00 \cdot 10^{-03}$
Ácido bórico	$1,14 \cdot 10^{-02}$
Sulfato de zinco hepta-hidratado	$8,82 \cdot 10^{-05}$
Cloreto de manganês tetra-hidratado	$1,44 \cdot 10^{-05}$
Molibdato de sódio di-hidratado	$7,10 \cdot 10^{-06}$
Sulfato de cobre penta-hidratado	$1,57 \cdot 10^{-05}$
Nitrato de cobalto hexa-hidratado	$4,90 \cdot 10^{-06}$

Fonte: Adaptado de Bischoff e Bold (1963)

Outra aplicação envolve o uso de digestores anaeróbios para produzir metano, que serve como matéria-prima para o cultivo de microalgas, resultando na conversão do metano em biomassa e oxigênio, que pode melhorar o desempenho do próprio digestor anaeróbico (SINGH et al., 2021; WANG et al., 2012; MIYAWAKI et al., 2021).

2.1.4 Sistemas de recuperação de biomassa de microalgas

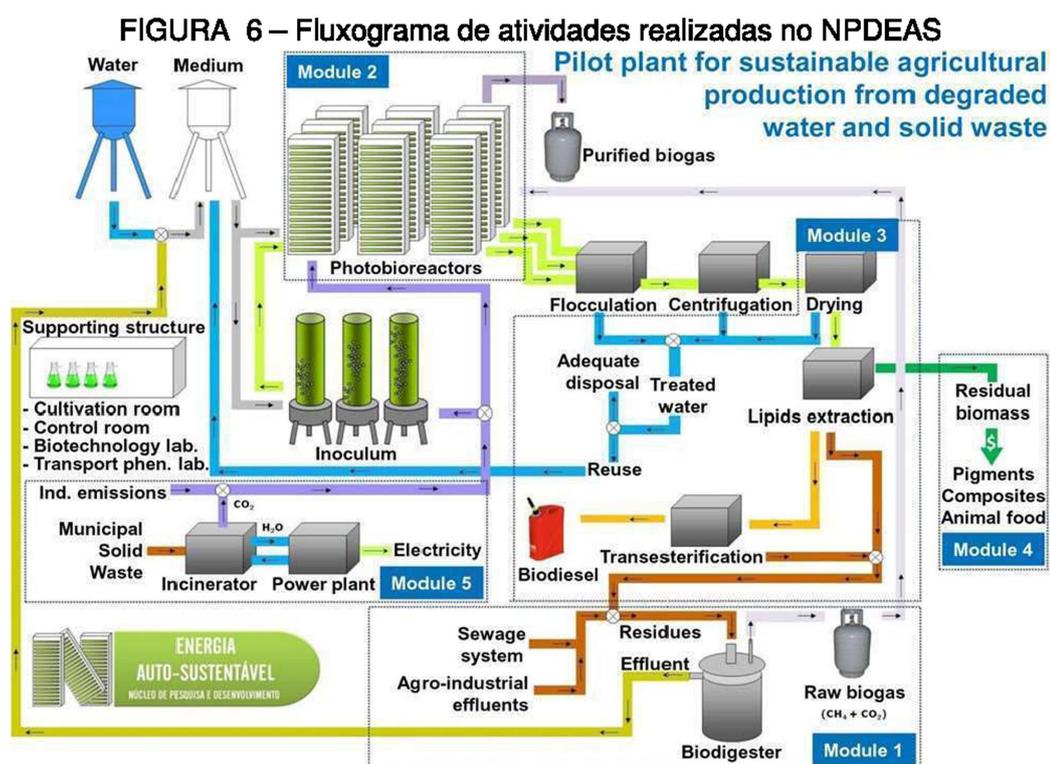
A produção de biomassa de microalgas nos fotobiorreatores (FBR) destinada à sua aplicação como matéria-prima industrial é caracterizada por uma baixa concentração inicial, geralmente situando-se entre 0,5-2,5 g/L. Para viabilizar seu uso, é necessário aplicar técnicas de concentração que aumentem essa concentração significativamente, muitas vezes em até 500 vezes. Diversas operações unitárias são empregadas para alcançar essa concentração desejada, levando em consideração tanto o custo energético global do processo quanto às dificuldades operacionais relacionadas ao pós-processamento da biomassa resultante (TAN et al., 2020; SINGH et al., 2021).

As principais técnicas utilizadas na recuperação da biomassa de microalgas incluem centrifugação, floculação, filtração, sedimentação gravitacional e flotação, cada uma com suas vantagens e desvantagens. A centrifugação e a eletroflotação são alta-

mente eficientes, mas devido ao alto consumo energético, são dispendiosas. A filtração e a seleção demandam trabalho manual constante, o que pode tornar o processo demorado. A floculação, por outro lado, é economicamente vantajosa em termos de energia, mas a escolha de agentes floculantes caros pode aumentar os custos. A quitosana, um agente coagulante de origem natural, tem sido amplamente empregada nesse processo, embora seu custo ainda impacte negativamente na produção de biomassa. Portanto, a busca por processos mais econômicos continua sendo uma prioridade na otimização da produção de biomassa de microalgas (JERNEY; SPILLING, 2018; TAN et al., 2020).

2.1.5 Produção de microalgas e biomassa no NPDEAS - UFPR

O Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável (NP-DEAS), sediado na Universidade Federal do Paraná, iniciou suas atividades com o objetivo de cultivo de microalgas com o propósito de produzir óleo para a fabricação de biodiesel, atualmente possui pesquisas mais abrangentes, como a utilização da biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal, produção de querosene de aviação sustentável com base nos óleos de microalgas e também conta com pesquisas que vão além das microalgas, como os estudos sobre células de energia a base de hidrogênio, todos com um viés sustentável. A Figura 6 mostra o sistema de produção de biodiesel estabelecido na atividade inicial do núcleo, e atualmente conta com modificações para suprir novas pesquisas.



Fonte: NPDEAS (2024)

O NPDEAS gerencia todas as fases da produção de biomassa, desde o cultivo inicial e manutenção das cepas de microalgas até o processamento final da biomassa. Inicialmente, as microalgas são cultivadas em escala laboratorial para criar um pré-inóculo, e então, a produção é ampliada progressivamente até que o cultivo seja realizado nos fotobiorreatores.

Os fotobiorreatores do NPDEAS são construídos com tubos de PVC transparentes, cada FBR com um volume total de $12m^3$ (Figura 7), e os cultivos são conduzidos em uma variedade de meios, como dejetos industriais e agrícolas, mas caso o objetivo seja a produção de microalgas de forma mais concreta e constante, o meio CHU é utilizado. A aeração é efetuada com o auxílio de compressores industriais, e a circulação do cultivo é mantida através de bombas centrífugas (NPDEAS, 2024).

FIGURA 7 – Fotobiorreator (sistema fechado) patenteado do NPDEAS para produção de microalgas



Fonte: NPDEAS (2024)

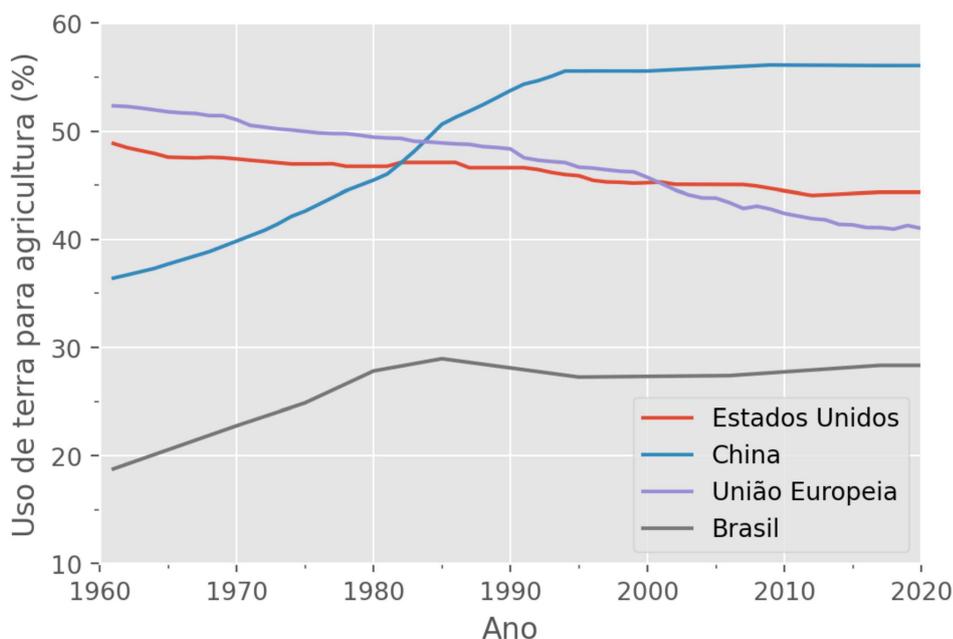
Quanto ao processo de colheita de microalgas para a produção de biomassa, ele começa com uma etapa de floculação, que utiliza quitosana para remover parte da água e aumentar a concentração de microalgas no cultivo. Em seguida, o material floculado passa por uma centrífuga para eliminar mais água. Se o objetivo for obter

biomassa seca, o material ainda passa por um tratamento térmico para completa secagem em um forno ou desidratador (NPDEAS, 2024).

2.2 FERTILIZANTES

Nos últimos anos, a população mundial tem experimentado um crescimento significativo segundo os dados do WorldBank (2023), o que tem exercido uma pressão considerável sobre setores, como habitação e produção de alimentos. Esse aumento populacional é resultado do avanço da medicina, da melhoria na produção de alimentos e do progresso no saneamento básico. No entanto, esse crescimento demográfico tem sido acompanhado por uma estagnação na área destinada à agricultura (Figura 8) (WORLD BANK, 2023). Essa situação é o desdobramento do aumento da alocação de terras para finalidades não agrícolas, como habitação e urbanização.

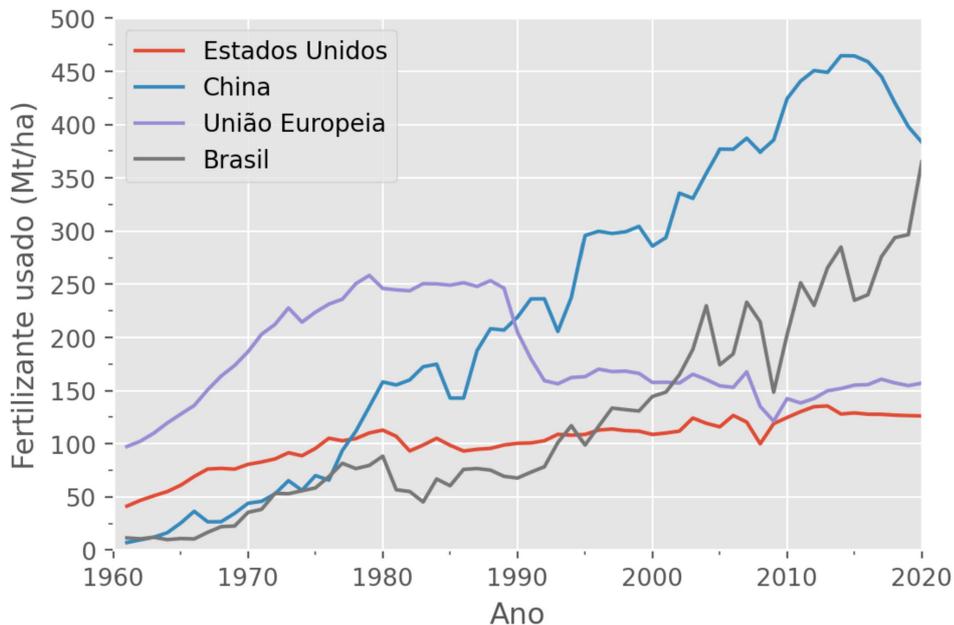
FIGURA 8 – Uso de Terras para finalidades agrícolas ao longo dos anos



Fonte: WorldBank (2023)

Nesse contexto, a garantia de um suprimento adequado de alimentos para a crescente população global exige uma abordagem mais eficiente e sustentável em relação ao uso da terra. Uma estratégia para alcançar esse objetivo é a adoção responsável de fertilizantes, cujo uso também tem aumentado nos últimos anos (Figura 9) (WORLD BANK, 2023). Os fertilizantes desempenham um papel essencial na agricultura, fornecendo os nutrientes críticos fundamentais para o desenvolvimento saudável das plantas. A deficiência desses nutrientes é comum em regiões de cultivo intensivo, onde as plantas retiram mais nutrientes do solo do que a reposição natural é capaz de oferecer (KIISKI et al., 2016).

FIGURA 9 – Quantidade de fertilizantes utilizados no período de 1962 a 2020



Fonte: WorldBank (2023)

A história dos fertilizantes remonta ao homem do Neolítico, que provavelmente já os utilizava fertilizantes orgânicos (ossos e restos de comida), mas o primeiro fertilizante produzido por processos químicos foi o superfosfato comum, fabricado no início do século XIX por meio do tratamento de ossos com ácido sulfúrico. Logo, coprólitos e rocha fosfática substituíram os ossos como fontes de fósforo (KIISKI et al., 2016).

Existem dois tipos principais de fertilizantes: orgânicos e inorgânicos. Com sua aplicação podendo ser realizada de três modos: diretamente no solo, por meio de irrigação e por pulverização direta nas plantas (KIISKI et al., 2016). Para a União Europeia, há uma meta de que 25% das terras agrícolas sejam gerenciadas organicamente até o ano de 2030, em contraste com a situação atual (2019), na qual apenas 9% das terras são gerenciadas organicamente (IFOAM, 2020).

2.2.1 Fertilizantes sintéticos/inorgânicos

Os fertilizantes inorgânicos, produzidos a partir de materiais sintéticos ou minerais, como nitrato de amônio, nitrato de cálcio e cloreto de potássio, agrupados como NPK, desempenham um papel crucial na agricultura e jardinagem modernas. Esses produtos são amplamente adotados para enriquecer o solo, permitindo a rápida absorção. São adicionados ao solo/planta com o objetivo de melhorar suas propriedades físicas, biológicas e químicas. As propriedades físicas incluem a friabilidade, porosidade e capacidade de absorção. As propriedades biológicas estão relacionadas aos microorganismos que fazem parte do solo (SHARMA, 2017).

A indústria de fertilizantes potássicos teve início na Alemanha em 1861. Na América do Norte, a indústria de potássio começou durante a Primeira Guerra Mundial e expandiu-se com o desenvolvimento dos depósitos de Novo México em 1931 e dos depósitos de Saskatchewan em 1958. Os fertilizantes potássicos modernos resultam mais frequentemente de processos físicos do que químicos (RUSSEL; WILLIAMS, 1977).

O primeiro fertilizante nitrogenado sintético foi o nitrato de cálcio, fabricado em 1903 a partir do ácido nítrico produzido pelo processo de arco elétrico. A disponibilidade de amônia sintética após 1913 levou à criação de muitos novos fertilizantes nitrogenados, mas a qualidade física era precária. Em 1933, o Centro de Desenvolvimento de Fertilizantes Nacional (TVA) foi formado com a responsabilidade nacional de aumentar a eficiência da fabricação e uso de fertilizantes. Mais de 75% dos fertilizantes produzidos nos Estados Unidos são fabricados com processos desenvolvidos pela TVA (RUSSEL; WILLIAMS, 1977). Estima-se que graças a utilização de fertilizantes sintéticos o aumento na produção é responsável por alimentar metade da população humana atual (ERISMAN et al., 2008).

Essa revolução ocorreu em um momento crucial, à medida que a sociedade transitava para uma era industrializada e urbanizada, onde a disponibilidade de recursos naturais estava se tornando uma preocupação crescente. Os fertilizantes orgânicos, como o guano chileno, mostraram-se insuficientes para atender à crescente demanda, colocando em risco a segurança alimentar em comunidades em todo o mundo. A solução veio na forma do processo de Haber-Bosch, um marco na história da química e da agricultura. Esse processo permitiu a conversão do nitrogênio atmosférico em amônia, um componente vital para a fabricação de fertilizantes nitrogenados tornando possível a produção em larga escala de fertilizantes artificiais (HABER, 1920).

A fixação do nitrogênio, um dos fertilizantes mais utilizados, foi um desafio notável. Apesar de sua abundância na atmosfera, as ligações triplas do nitrogênio tornam a molécula incrivelmente estável e, portanto, difícil de ser capturada. Fritz Haber e seus colegas, incluindo Walther Nernst e Henry Le Chatelier, decidiram enfrentar esse desafio. Com a contribuição de Haber e a colaboração de Bosch, o processo de fixação do nitrogênio foi revolucionado. O reconhecimento por essa conquista veio sob a forma de dois Prêmios Nobel em Química, destacando a importância inegável do trabalho de Haber e Bosch na história da ciência. Seu legado ressoa até os dias de hoje, não apenas pelo avanço científico, mas também pelo impacto positivo que tiveram na segurança alimentar global (HABER, 1920).

O tratamento com NPK em níveis recomendados resultou em um índice de área foliar, taxa de crescimento da cultura, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação líquida e rendimento de grãos mais elevados durante os anos de experimentação

(NADIM et al., 2016; SAPKOTA et al., 2020). A produção de etanol aumentou em 30% e 40% em resposta à aplicação de lodo de esgoto e fertilização com NPK (teor equivalente de nitrogênio = 160 kg N/ha), respectivamente, em comparação com culturas não fertilizadas (DUBIS et al., 2017). Os rendimentos de cana-de-açúcar e açúcar mostraram um aumento de 7 a 25%, e de 3 a 7% no teor de Brix e no conteúdo total de açúcar recuperável. Isso mostra que, em locais responsivos, a adição de fertilizantes nitrogenados melhora o rendimento da cultura e a qualidade do suco (BOSCHIERO et al., 2020).

A adição de fertilizantes nitrogenados sintéticos pode aumentar significativamente a produção de chá em quase 70%, mas acidifica os solos (média de -0,41 unidades de pH) e gera um desequilíbrio de nutrientes no solo, a acidificação do solo geralmente agrava o acúmulo de íons de alumínio tóxicos. A sua utilização também pode alterar a composição da colheita como a qualidade dos brotos de chá, aumentando as concentrações de aminoácidos livres (+ 16%), cafeína (+ 14%) e extratos aquosos (+ 5%), enquanto diminui a concentração de açúcares solúveis (- 8%) nos brotos de chá (QIAO et al., 2018).

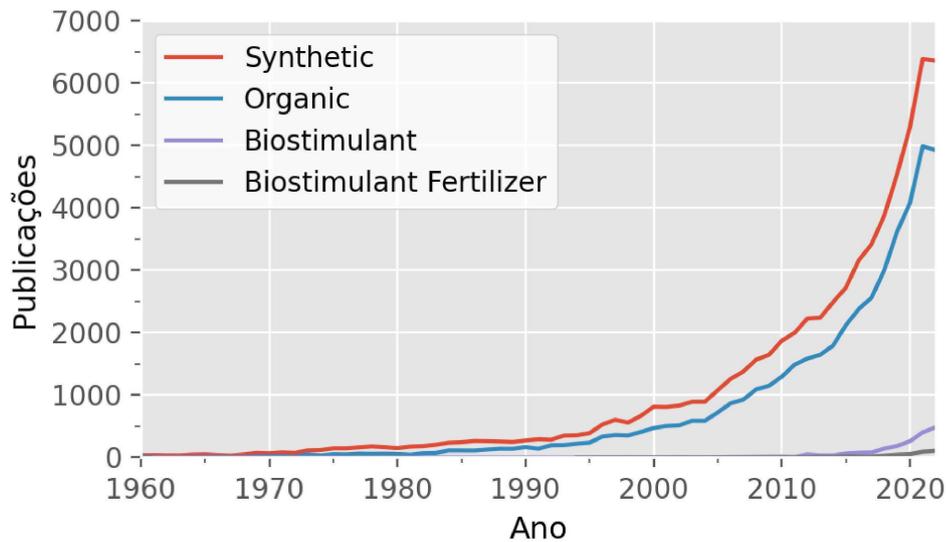
A porcentagem média de rendimento atribuível aos fertilizantes geralmente variava de cerca de 40 a 60% nos Estados Unidos e na Inglaterra e tende a ser muito maior nos trópicos (STEWART et al., 2005). Embora o uso adequado desses fertilizantes possa aumentar a produtividade das culturas e a qualidade das colheitas, é de suma importância evitar a super utilização.

A longo prazo, a entrada excessiva de fertilizantes químicos, especialmente os de nitrogênio (N), afetam negativamente a qualidade do solo e causam problemas ambientais, como a acidificação e a poluição por nitratos, o que potencialmente contribui para a poluição das águas subterrâneas e atmosférica devido à lixiviação e gentrificação, podendo reduzir a sustentabilidade (MALIK; CHAUHAN, 2014; BOM et al., 2018; BOSCHIERO et al., 2020; DUBIS et al., 2017; KANTER, 2018; SWIETLIK, 1992).

O óxido nitroso (N_2O) desempenha papéis importantes na influência da química estratosférica e nas mudanças climáticas regionais e globais (IPCC, 2013). A poluição por nitrogênio, amplamente impulsionada pelo uso ineficiente de fertilizantes sintéticos e esterco, é uma das questões ambientais mais importantes do século XXI, não menos importante devido aos seus impactos no clima (KANTER, 2018).

Para mitigar esses impactos negativos, é imperativo adotar uma abordagem equilibrada e responsável para a aplicação de fertilizantes. Isso engloba a consideração de alternativas sustentáveis para o aprimoramento do solo, como a rotação de culturas, culturas de cobertura e práticas de conservação. A procura por aprimoramentos e alternativas pode ser vista pelo número de publicações relacionadas a fertilizantes, que está em constante crescimento, conforme ilustrado na Figura 10.

FIGURA 10 – Número de publicações com a palavra-chave *fertilizer* juntamente com *organic* ou *synthetic* no título, palavras-chave ou resumo



Fonte: Scopus (2023)

2.2.2 Fertilizantes orgânicos

Os fertilizantes orgânicos oferecem uma alternativa ambientalmente mais sustentável, compostos por materiais naturais, como esterco animal, farinha de ossos e farinha de sangue, esses fertilizantes derivam de organismos vivos. São amplamente reconhecidos por enriquecer a saúde do solo, fornecer nutrientes essenciais e microrganismos benéficos. Simultaneamente, promovem a retenção de água e reduzem a erosão (KIISKI et al., 2016).

Uma das características notáveis dos fertilizantes orgânicos é a liberação gradual no solo, assegurando uma absorção eficiente de nutrientes pelas plantas ao longo do tempo. Embora já tenham sido amplamente utilizados no passado, os fertilizantes orgânicos perderam espaço para os fertilizantes sintéticos, principalmente devido à associação da produção orgânica com uma produtividade por unidade de área geralmente menor em comparação com os sistemas convencionais (KIISKI et al., 2016).

A biomassa de microalgas mostrou conter micro e macronutrientes, especialmente N, fósforo (P) e potássio (K), e pode ser considerada como um fertilizante orgânico de liberação lenta. A análise da biomassa seca de *Arthrospira sp.* revelou que ela contém 6,70, 2,47 e 1,14% em base seca de N, P e K, respectivamente, enquanto o teor de cálcio (Ca) na microalga é relativamente menor que o de outros minerais (RONGA et al., 2019).

Os efeitos do biofertilizante de microalgas *Acutodesmus dimorphus* (*Tetrademus dimorphus*) foram avaliados em plântulas de tomate. Com 50 e 100 g de biomassa

seca por vaso de 28 cm aplicados 22 dias antes do transplante das plântulas, houve um aumento no crescimento das plantas, apresentando maior número de ramos e flores, em comparação tanto com o controle não fertilizado quanto com a aplicação do biofertilizante somente no momento do transplante (RONGA et al., 2019).

Os efeitos do extrato de células da alga verde *Chlorella vulgaris* como fertilizante foliar no estado nutricional, no crescimento e no rendimento de plantas de trigo encontrados por Ronga et al. (2019) para a aplicação de 50% v/v de extrato microalgal foi o melhor tratamento em termos de peso fresco (+60,7%), rendimento (+140%) e peso do grão (+40%) em comparação com o controle. Por outro lado, a aplicação de 100% de extrato microalgal foi o melhor tratamento em termos de peso seco (+95%), peso da espiga (+60%) e peso de 100 grãos (+160%) em comparação com o controle.

Mas redução da produção em sistemas orgânicos é relatada em uma faixa de 5% a 13% em condições ideais de práticas orgânicas e podem chegar a 34% quando os sistemas convencionais (fertilizantes sintéticos) e orgânicos são mais comparáveis. Essas diferenças de rendimento são altamente contextuais, dependendo das características do sistema e do local com a oferta de nitrogênio sendo o principal fator limitante para a produtividade dos sistemas orgânicos. Em certas condições, como aquelas com boas práticas de manejo, tipos específicos de culturas e condições de crescimento, os sistemas orgânicos podem quase igualar os rendimentos convencionais (SEUFERT et al., 2012).

A utilização de fertilizantes orgânicos possui outros benefícios além da produção, como a redução da lixiviação de nitrogênio e o aumento da concentração de carbono orgânico do solo (SOC) em comparação com o uso exclusivo de fertilizante de nitrogênio sintético. Quando as taxas de substituição de nitrogênio sintético (SRs) foram $\leq 70\%$, os rendimentos de vegetais e a concentração de SOC aumentaram entre 5,5% e 5,6%, e a lixiviação de nitrogênio foi reduzida entre 41,6% e 48,1%. Em taxas de substituição mais altas (SR $>70\%$), o rendimento de vegetais foi reduzido em 13,5%, às emissões de N_2O foram reduzidas em 14,3%, e a concentração de SOC aumentou em 16,4% (LIU et al., 2021).

Estudos, como o realizado por Li et al. (2022), mostram que uma combinação equilibrada de fertilizantes sintéticos e orgânicos pode resultar em uma melhor sustentabilidade do solo, mantendo, ao mesmo tempo, uma produção agrícola eficiente. A substituição de 75% de fertilizantes sintéticos por orgânicos melhorou significativamente a aparência e o sabor do milho, enquanto a substituição de 50% melhorou significativamente o sabor e as qualidades nutricionais. A substituição de 50% de fertilizante orgânico regulou mais significativamente o conteúdo de aminoácidos do que o conteúdo de amido. Aumentos nas proporções de fertilizante orgânico reduziram significativamente o pH do solo em 0,03 a 0,36 e aumentaram a abundância relativa

de *Chloroflexi*, bem como a de *Basidiomycota* e *Cercozoa* no microbioma do solo e melhoraram a produtividade e sustentabilidade a longo prazo dos agroecossistemas (SUN et al., 2022; LIU et al., 2021).

Entretanto, também é importante evitar o uso excessivo desses biofertilizantes, a fim de prevenir o acúmulo de nutrientes no solo e as consequências adversas para a saúde das plantas e o meio ambiente. Para estabelecer a agricultura orgânica como uma ferramenta importante na produção de alimentos sustentável, é necessário compreender mais plenamente os fatores que limitam os rendimentos orgânicos, juntamente com avaliações dos muitos benefícios sociais, ambientais e econômicos dos sistemas de agricultura orgânica (SEUFERT et al., 2012).

Portanto, a busca por uma agricultura mais sustentável passa pela consideração de fertilizantes orgânicos como parte integrante do processo. Além disso, a pesquisa e a inovação contínuas são necessárias para otimizar a eficácia dos fertilizantes orgânicos, tornando-os uma parte ainda mais essencial de uma agricultura sustentável, algo que vem sendo feito, como mostra a Figura 10.

2.2.3 Bioestimulantes

Os bioestimulantes vegetais compreendem substâncias naturais ou microorganismos que, ao serem aplicados nas plantas, promovem o crescimento, desenvolvimento e resistência a estresses ambientais. Esses produtos visam aprimorar a eficiência fisiológica das plantas, intensificando a absorção de nutrientes, fortalecendo o sistema radicular e estimulando processos metabólicos. Entre as diversas categorias de bioestimulantes, destacam-se extratos de algas, ácidos húmicos e fúlvicos, aminoácidos, peptídeos e microorganismos benéficos, entre outros (RONGA et al., 2019; DU JARDIN, 2015).

A aplicação de bioestimulantes pode resultar em maior resistência a estresses bióticos e abióticos nas plantas, aumento na assimilação de nutrientes e minerais, aprimoramento da resistência a patógenos e otimização do crescimento de raízes e brotos, contribuindo assim para o desenvolvimento, qualidade e produtividade das plantas (CALVO et al., 2014; SCAGLIA et al., 2017). O crescente uso de bioestimulantes na agricultura sustentável está associado aos benefícios observados na qualidade e produtividade das culturas, além da redução da dependência de fertilizantes químicos (RONGA et al., 2019; DU JARDIN, 2015).

A aplicação de biomassa seca não viva (seca em estufa ou *spray-dried*) proporciona benefícios às plantas por meio da liberação de nutrientes durante os processos de mineralização. A promoção do crescimento das plantas com biomassa não viva também pode resultar de uma bioestimulação devido a compostos biologicamente ativos presentes nas microalgas (ALVAREZ et al., 2021).

As proteínas hidrolisadas também estão entre os ingredientes ativos de bioestimulantes vegetais, e sua aplicação em pulverização foliar pode potencializar a atividade biológica no crescimento e desenvolvimento das culturas. As microalgas também contêm aminoácidos, conhecidos bioestimulantes com efeitos positivos no crescimento de plantas e no rendimento de colheitas. Além disso, os aminoácidos podem contribuir para mitigar os danos causados por estresses abióticos (RONGA et al., 2019).

A avaliação de rendimento conduzida por Suchithra et al. (2022) na aplicação foliar de biomassa de microalgas como bioestimulante incluiu a contagem do número de flores por planta, número de frutos por planta, peso total de 10 frutos, rendimento total, comprimento e diâmetro do fruto, número de sementes por fruto e peso total de sementes por fruto. A aplicação foliar de biomassa de microalgas resultou em um peso de 10 frutos (tomates) de 732 g, enquanto o grupo controle obteve 495 g, um ganho de +47%. Além disso, observou-se um aumento de 8 para 14 frutos em média por planta com a utilização da biomassa. Com base nesses resultados, a aplicação de 10 g de biomassa gerou um aumento de 628,8 g na produção de frutos em comparação com o grupo controle.

A aplicação de bioestimulantes pode ser complementada com a utilização de fertilizantes, otimizando a eficiência da absorção de nutrientes pela planta por meio do bioestimulante, ao mesmo tempo que enriquece o solo com os nutrientes necessários para um crescimento e produção ideais (CALVO et al., 2014; DU JARDIN, 2015).

2.3 EXERGIA

O termo “exergia” começou como “disponibilidade” nas primeiras máquinas a vapor, indicando a parte utilizável da energia do vapor. Mais tarde, em 1956, Zaron Rant definiu a exergia como a parte da energia disponível para uso em um sistema. No entanto, o conceito já havia sido mencionado no século XIX por Josiah Gibbs e Nicolas Carnot (BEJAN, 1948; MORAN et al., 2014).

A exergia é uma propriedade que mede a energia útil em um sistema e é uma função da energia e da entropia desse sistema. Em processos termodinâmicos reais, a exergia tende a diminuir devido às variações na entropia do sistema (BEJAN, 1948; MORAN et al., 2014). A taxa de exergia é determinada pela seguinte equação:

$$\dot{E}_x = \dot{m}_x \cdot e_x \quad (2.1)$$

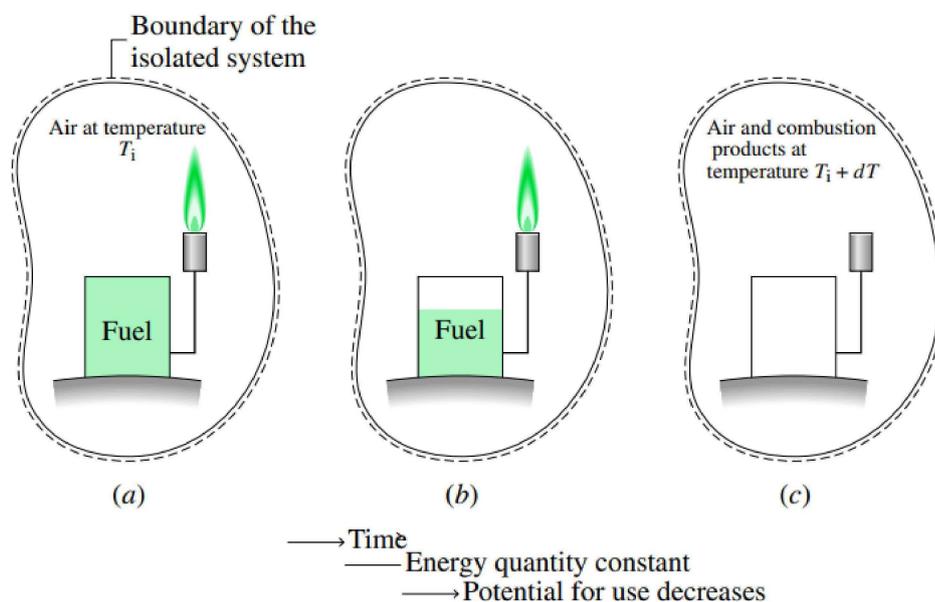
onde o subíndice x indica o número do fluxo de massa que está sendo calculado, e representa a exergia específica (kJ/kg) e é calculada através da equação:

$$e_x = (u - u_0) + p_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + V^2/2 + g \cdot z \quad (2.2)$$

Nessa equação, u , v , s , $V^2/2$, $g \cdot z$ representam a energia interna, volume, entropia, energia cinética e energia potencial gravitacional, respectivamente, em sua forma específica. Os termos com subscrito 0 indicam as propriedades correspondentes no estado padrão ou inicial.

A Figura 11 mostra um sistema isolado composto por um tanque de combustível envolto por ar. Após a queima de todo o combustível, resta uma mistura de ar e produtos da combustão. De acordo com a primeira lei da termodinâmica, a energia do sistema permanece a mesma durante todo o processo, havendo apenas uma mudança de estado, sem trocas com o ambiente externo. No entanto, a combinação de ar e combustível tem mais utilidade do que a de ar e resíduos da combustão. Portanto, o sistema, no início do processo, possui um maior potencial de uso em comparação com o final do processo, indicando que parte desse potencial de uso foi destruída devido a irreversibilidades do sistema ao longo do processo (MORAN et al., 2014; BEJAN, 1948; LAUKKANEN et al., 2016).

FIGURA 11 – Sistema de combustão exemplificando a conservação de energia e a utilidade da exergia



Fonte: Moran et al. (2014)

A exergia é frequentemente usada na análise de sistemas de energia, como usinas de energia, no design de edifícios eficientes e na avaliação da sustentabilidade de sistemas de energia. Os balanços de massa, energia e exergia são ferramentas essenciais para analisar sistemas complexos, permitindo o cálculo das transferências de calor, trabalho e destruição de exergia em um sistema (BEJAN, 1948; MORAN et al., 2014; DINCER; ROSEN, 2021; PERALTA et al., 2010).

Para analisar o sistema, realizamos balanços de energia, de massa e exergéticos. O balanço de massa é calculado utilizando a seguinte equação:

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s \quad (2.3)$$

Onde \dot{m} é a vazão mássica ($kg \cdot s^{-1}$), e é o que entra, s o que sai do sistema/etapa observado.

As equações a seguir são utilizadas para o balanço de energia e exergia do sistema/etapa, respectivamente:

$$\dot{Q} + \Sigma \dot{m}_e \cdot h_e = \dot{W} + \Sigma \dot{m}_s \cdot h_s \quad (2.4)$$

$$\dot{E}_Q + \Sigma \dot{E}_e = \dot{W} + \Sigma \dot{E}_s - \dot{E}_D \quad (2.5)$$

Sendo \dot{Q} a taxa de calor transferido (kW), h a entalpia ($kJ \cdot kg^{-1}$), \dot{W} o trabalho (kW), \dot{E} a taxa de exergia (kW) e \dot{E}_D a taxa de exergia destruída (kW).

Peralta-Ruiz et al. (2013), utilizaram a análise exérgica para avaliar alternativas de extração de óleo de microalgas em um processo em grande escala. O estudo identificou a extração de óleo com hexano como a alternativa mais adequada em termos de eficiência exérgica, apresentando uma eficiência exérgica máxima de 51%.

Uma avaliação exérgica da produção de biodiesel de microalgas feita por Cavalcanti et al. (2023), apresentou que a maior parte da exergia de entrada provém da luz solar. O fotobiorreator (FBR) apresentou baixa eficiência exérgica, mas o secador alcançou alta eficiência. Isso destaca a importância de melhorar a eficiência exérgica do FBR para otimizar a produção de biodiesel de microalgas. E Peralta et al. (2010), destacaram a possibilidade de extrair produtos de valor agregado, como fertilizantes, dos resíduos do processo, o que pode contribuir para melhorar ainda mais a eficiência exérgica.

A viabilidade econômica e ambiental da produção de energia a partir de biomassa de microalgas depende de alcançar um balanço energético favorável, com uma Relação de Energia Líquida (NER) superior a 1. A eletricidade desempenha um papel fundamental no cultivo de microalgas e produção de biomassa, e as tecnologias de bioenergia de microalgas têm potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa ao longo da cadeia de suprimentos de energia (MEDEIROS et al., 2015).

2.4 EXERGOECONOMIA

A Exergoeconomia é uma disciplina que aplica os princípios da termodinâmica, que investiga calor e energia, ao âmbito econômico, com o termo exergoeconomia sendo mais utilizado quando é aplicado os conceitos de exergia na análise. Seu propósito central é analisar sistemas que envolvem exergia e determinar as maneiras mais eficazes e economicamente viáveis de empregar recursos exergéticos para atender às necessidades econômicas e sociais na produção de bens e serviços (BEJAN, 1948).

Na condução dessa análise, custos são atribuídos a cada componente separadamente, permitindo a elaboração de um balanço abrangente do sistema. A Equação a seguir apresenta essa relação, onde os custos são relacionados a cada taxa de exergia e os custos não exergéticos (\dot{Z} ($R\$/dia$)), que são a soma das taxas de custos estão associadas ao investimento de capital (\dot{Z}_{CI}), manutenção e operação do sistema (\dot{Z}_{OM}).

$$\Sigma c_s \cdot \dot{E}_s + c_w \cdot \dot{W} = c_q \cdot \dot{E}_Q + \Sigma c_e \cdot \dot{E}_e + \dot{Z} \quad (2.6)$$

Aqui, c_x representa os custos individuais de cada componente ($R\$/kJ$), \dot{W} corresponde ao trabalho realizado e \dot{E}_Q representa a exergia sob a forma de calor.

A análise exergoeconômica pode ter diferentes objetivos, que são avaliados e determinados com base nas características de cada sistema em estudo. Esses objetivos podem incluir:

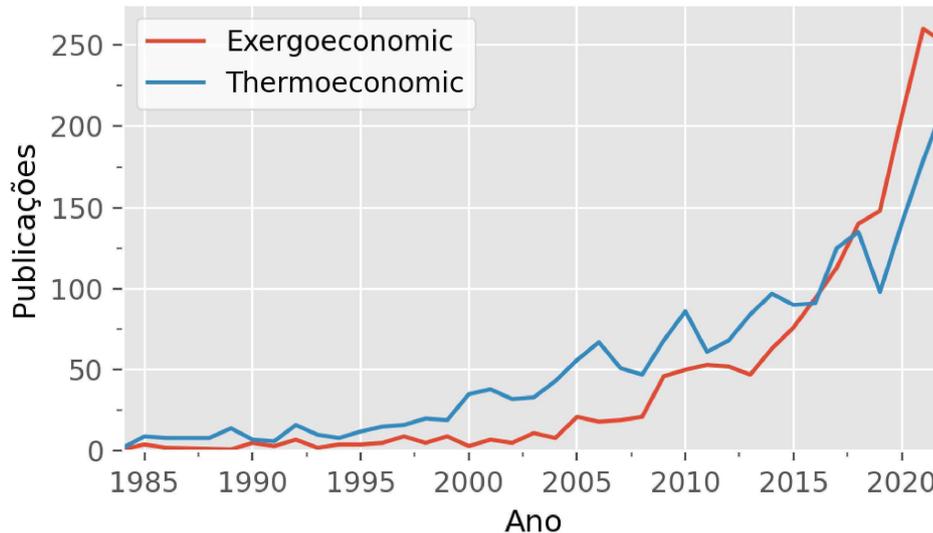
- Cálculo separado dos custos de cada produto gerado no sistema, especialmente quando o processo gera mais de um produto.
- Compreensão do processo de formação de custos e dos fluxos de custos dentro do sistema.
- Otimização de variáveis específicas em um único componente do sistema.
- Otimização de todo o sistema.

Essas metas são definidas de acordo com as necessidades e requisitos do sistema em análise (BEJAN, 1948).

Analisando o número de publicações relacionadas à exergoeconomia, observamos que nos últimos 5 anos, essas publicações superaram o número de trabalhos em termoeconomia, como demonstrado na Figura 12, e segundo a base de dados Scopus (2023), há somente 5 publicações que contêm ambas as palavras *exergoeconomic* e *microalgae*, no título, palavras-chave ou no resumo, e na Figura 13, que é um número

de estudos relativamente limitado e recente. Dentro desse contexto, dentre os cinco trabalhos que abordam a conexão entre exergoeconomia e microalgas, dois deles são publicações do NPDEAS.

FIGURA 12 – Número de publicações anuais que contem a palavra-chave *exergoeconomic* ou *thermoeconomic*



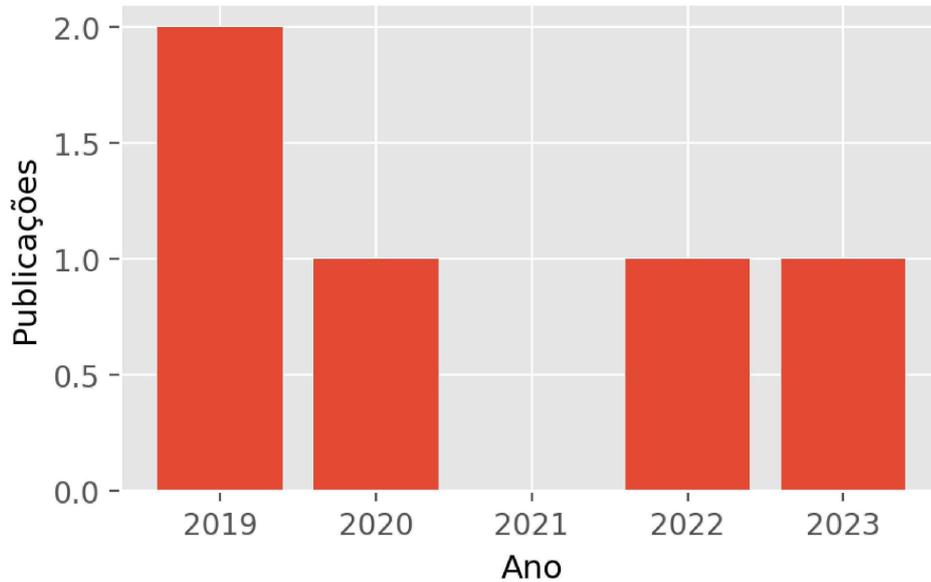
Fonte: Scopus (2023)

Conforme observado por Bilanovic et al. (2012), o custo de produção de microalgas compreende uma soma de despesas específicas relacionadas à produção, incluindo despesas de construção, despesas relacionadas ao CO_2 , despesas de colheita, despesas de mão de obra, despesas de maquinaria e despesas de operação e manutenção.

Os custos de produção de microalgas não seguem uma relação linear com a produtividade. Isso ocorre porque os custos estão fortemente relacionados à concentração de biomassa, principalmente devido aos altos custos associados à colheita, que incluem despesas de energia e de capital. A colheita representa uma parte significativa dos custos totais, geralmente cerca de 20-30% (DRAAISMA et al., 2013; BARROS et al., 2015).

O estudo realizado por Ebadollahi et al. (2022) avaliou um sistema multigerador de energia que utiliza biogás como combustível, aproveitando os gases resultantes da combustão para gerar energia em diferentes sistemas de recuperação. As microalgas desempenham um papel fundamental nesse contexto, pois permitem a disposição sustentável dos resíduos da combustão e, ao mesmo tempo, melhoram a produção de microalgas ao direcionar esses gases por meio de uma planta de produção de microalgas. Nesta análise, o cultivo de microalgas foi usado para absorver CO_2 , e a biomassa foi utilizada para a produção de biodiesel, os valores de exergia destruída e custos por hora encontrados foram $6,148kW$ e $4,997US\$/h$.

FIGURA 13 – Número de publicações anuais que contem a palavra-chave *exergoeconomic* e *microalgae*



Fonte: Scopus (2023)

Em uma análise exergoeconômica para comparar dois sistemas e determinar qual deles era mais sustentável, com menor destruição de exergia e maior viabilidade econômica, Osat et al. (2023) estudaram sistemas geradores de energia, sendo que o sistema 1 utilizava palha de arroz como combustível, enquanto o sistema 2 utilizava biomassa de microalgas. A motivação para este estudo surgiu da prática de agricultores que queimam os resíduos da plantação de arroz para se preparar para a próxima safra, o que apresentou a oportunidade de aproveitar esse material para geração de energia. A análise energética revelou que, enquanto o sistema 2 pode gerar mais energia, a eficiência energética do sistema 1 é 4,29% maior. Com base na análise exérgica, é comprovado que o sistema 1 é mais sustentável do que o sistema 2 devido à sua menor destruição de exergia. De acordo com a análise exergoeconômica, a taxa de custo do combustível do sistema 1 é de 67,66 \$/h, enquanto a taxa de custo do combustível do sistema 2 é de 221,90 \$/h. Os resultados revelaram que o uso da palha de arroz é mais sustentável e economicamente vantajoso.

No trabalho conduzido por Sanli e othersz (2020), a eficiência exérgica e exergoeconomia de um motor a combustão interna, que utilizava biodiesel de microalgas (MAB) em diferentes temperaturas (0 °C, 5 °C, 15 °C, 25 °C e 35 °C), foi avaliada em comparação com o uso de diesel convencional. Os resultados mostraram que o desempenho do combustível MAB apresentou semelhança com o combustível diesel. As eficiências energéticas e exérgicas para o motor utilizando combustível diesel foram ligeiramente superiores às do motor utilizando combustível MAB. Com o aumento da temperatura ambiente, a taxa de destruição de exergia aumentou, enquanto tanto a

taxa de transferência de calor quanto a taxa de exergia do escape diminuíram. Além disso, o parâmetro termoeconômico variou de $5,6 \cdot 10^{-4}$ a $6,4 \cdot 10^{-4} kW/US\$,$ enquanto o parâmetro exergoeconômico variou de $8,3 \cdot 10^{-4}$ a $8,8 \cdot 10^{-4} kW/US\$$ para o motor com o uso de combustível diesel. O uso de combustível MAB mostrou-se melhor do que o uso de combustível diesel tanto nos aspectos termoeconômicos quanto exergoeconômicos. Os resultados indicaram que, embora o desempenho do biodiesel de microalgas fosse comparável ao do diesel convencional, sua eficiência energética e exérgica eram ligeiramente inferiores.

Por outro lado, Sugai et al. (2019) realizou uma análise exérgica da produção de biodiesel, reutilizando óleo de cozinha em conjunto com o óleo extraído de microalgas. O objetivo era explorar a possibilidade de produzir biodiesel de forma mais econômica, considerando o alto custo do óleo de microalgas. Os resultados demonstram que é possível otimizar o processo em função da relação entre a exergia destruída pelo sistema e a quantidade de éster produzido, gerando um lucro de $US\$29,50$ por segundo, para uma relação óleo/etanol de 3,7/1. Os resultados demonstraram a viabilidade de otimizar o processo com base na relação entre a exergia destruída pelo sistema e a quantidade de éster produzido, permitindo lucro na produção. É importante mencionar que, embora o sistema estivesse preparado para a realização de uma análise exergoeconômica, essa análise não foi realizada no trabalho, sendo apenas mencionada como uma possível área para futuras investigações.

Finalmente, no segundo trabalho do NPDEAS, Galante et al. (2022) avaliou a produção de energia limpa usando resíduos municipais (lixo) e gás liquefeito de petróleo como combustíveis para a geração de energia por meio da combustão. Os gases gerados no incinerador foram utilizados para a troca de calor, gerando vapor para uma usina Rankine e, assim, obtendo energia elétrica. Um fotobiorreator foi acoplado ao sistema para filtrar e purificar os gases provenientes do incinerador, permitindo uma disposição mais limpa dos resíduos. O trabalho de Galante et al. (2022) incluiu uma análise exergoeconômica de um incinerador de combustíveis híbridos, trocadores de calor, usina Rankine e um fotobiorreator. Esses componentes, com exceção da usina Rankine, estão presentes na análise que será apresentada nesta dissertação, com algumas modificações, e abrangendo etapas subsequentes à produção de microalgas. Um dos resultados dessa análise é o custo exérgico da produção de microalgas, $1,7 \cdot 10^{-5} US\$/kJ,$ quando se utiliza o efluente do biodigestor como fonte de nutrientes para as microalgas como meio de cultivo e nutrientes.

2.5 DESAFIOS

A produção de microalgas, dada a sua relativa novidade, ainda enfrenta desafios significativos. Garantir um fluxo constante para fins de pesquisa e aplicação prática

pode resultar em atrasos no desenvolvimento.

Apesar de os conceitos de exergia e exergoeconomia não serem novos, sua aplicação direta à produção de microalgas e bioestimulantes é ainda pouco explorada na literatura científica. A maior parte das pesquisas tem se concentrado em biocombustíveis, como biogás e biodiesel, deixando lacunas significativas na abordagem direta das microalgas e em seus usos alternativos.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVOS GERAIS

Realizar uma análise exergoeconômica do processo de produção de biomassa de microalgas em fotobiorreator (FBR) com injeção de CO_2 proveniente de um sistema de incineração de Resíduos Sólidos Municipais (RSM) e da utilização da biomassa seca como promotor de crescimento vegetal.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

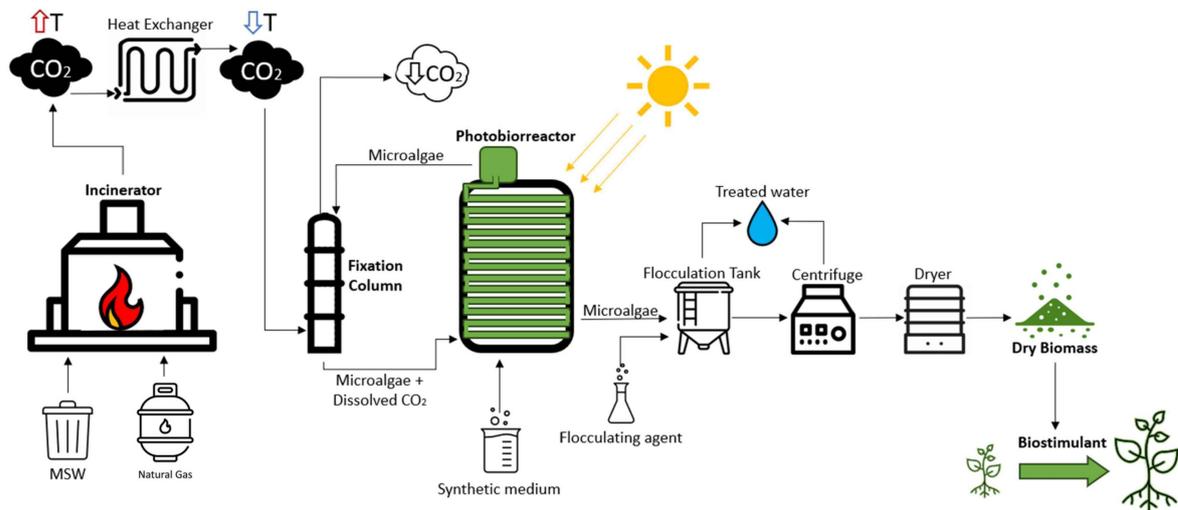
Para alcançar o objetivo geral, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Desenvolver um modelo matemático para análise exérgica do sistema de cultivo de microalgas em FBR e sua utilização como promotor de crescimento vegetal.
2. Desenvolver um modelo matemático para análise exergoeconômica do sistema de produção de biomassa de microalgas em FBR e sua utilização como promotor de crescimento vegetal.
3. Definir as funções objetivo para quantificar o desempenho do sistema de produção de biomassa de microalgas em FBR e sua utilização como promotor de crescimento vegetal.
4. Avaliar os custos exérgicos do processo de produção de biomassa de microalgas em FBR e sua utilização como promotor de crescimento vegetal.
5. Realizar uma análise de parâmetros do processo de produção e utilização de biomassa como promotor de crescimento vegetal.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 SISTEMA ANALISADO

FIGURA 14 – Ilustração das etapas do sistema estudado.



Fonte: Autor

Para maior facilidade, o sistema estudado está ilustrado na figura 14. O processo começa com uma fonte de emissão de gases, que pode variar desde um motor de combustão até um gerador de combustível ou incinerador de resíduos sólidos, incluindo sistemas de combustível híbrido. Um sistema de troca de calor é utilizado para resfriar a temperatura dos gases, garantindo que permaneça abaixo de $35^\circ C$ para evitar danos ao cultivo de microalgas. Água utilizada nesse sistema pode ser reutilizada para gerar energia via uma unidade ciclo Rankine ou em um sistema para tratamento de águas degradadas.

Em seguida, os gases passam por uma coluna de fixação, onde interagem com o cultivo de microalgas. Esta interação é crucial para a absorção de componentes essenciais, particularmente o dióxido de carbono (CO_2), fundamental para o processo de fotossíntese das microalgas.

Um fotobiorreator tubular fechado de 12 metros cúbicos é empregado para assegurar um controle preciso sobre os parâmetros de cultivo. Uma bomba elétrica facilita o fluxo do cultivo pelo sistema, permitindo a interação com a coluna de fixação de gases para a captura eficiente de CO_2 . Durante o ciclo diurno, a fotossíntese ocorre, impulsionando a multiplicação da biomassa de microalgas com a absorção da luz solar.

Para transformar a biomassa em um estado seco utilizável, o cultivo passa por três etapas. Primeiramente, ocorre a floculação, na qual um agente floculante,

como quitosana, é introduzido no cultivo e agitado para garantir a distribuição uniforme do material. Posteriormente, a biomassa se deposita por decantação, permitindo a remoção de parte da água. Após a floculação, a biomassa ainda contém uma quantidade considerável de água, sendo necessária a centrifugação para aumentar sua concentração para cerca de 20% de biomassa por litro.

A etapa final do processo de produção da biomassa seca envolve o uso de equipamentos de aquecimento, como fornos ou câmaras de secagem, para remover completamente a água restante na biomassa. A fim de evitar danos à biomassa ou alterações em sua estrutura, é mantida uma temperatura de 60 °C por um período prolongado.

Após a obtenção da biomassa seca, ela pode ser aplicada diretamente como fertilizante orgânico, sem necessidade de etapas adicionais. A avaliação do aumento de material e das possíveis alterações na energia interna resultantes do uso da biomassa como fertilizante é realizada durante a etapa conhecida como Promotor de Crescimento Vegetal (PCV). Este processo foi conduzido em uma plantação de tomates devido às características favoráveis de cultivo e ao tempo razoável de crescimento.

O diagrama do sistema, mostrado na Figura 15, ilustra as etapas do processo, o fluxo de massa, energia, calor (\dot{Q}_0), irradiação solar (\dot{I}_{sol}) e trabalho (\dot{W}_e). Também demonstra o uso de um combustível híbrido para a combustão (CH), que consiste em uma mistura de ar, gás natural e resíduos sólidos municipais (RSM).

4.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

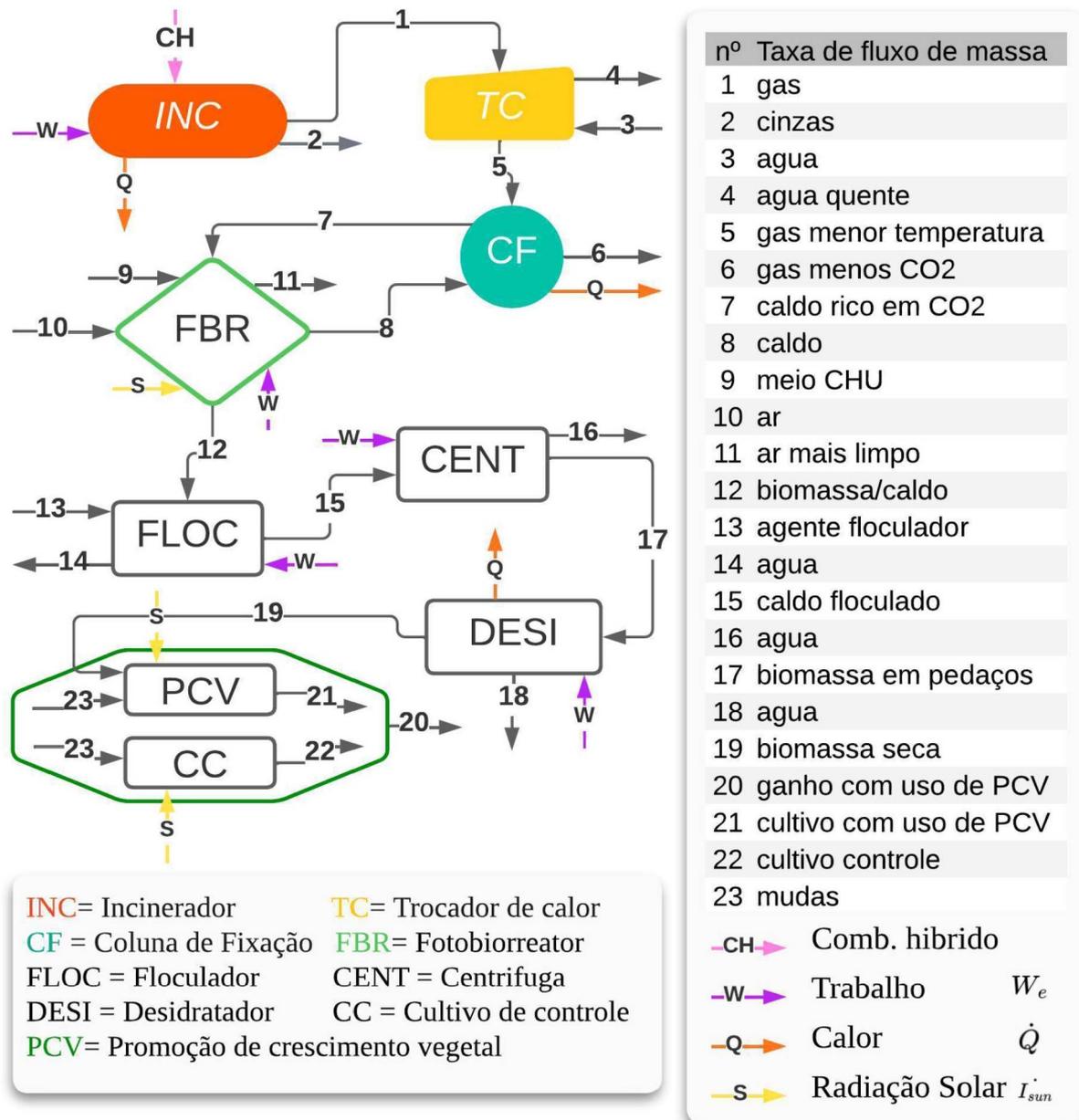
Um dos pré-requisitos para uma análise exergética é a realização do balanço energético de primeira lei para o sistema em estudo. No entanto, devido às peculiaridades do sistema em análise e ao foco da análise exergética e exergoeconômica, os detalhes do balanço de energia e massa não serão abordados neste contexto específico.

É importante destacar que as reações químicas executadas pelas microalgas ocorrem em um ritmo relativamente lento. Enquanto microalgas, como a *Chlorella vulgaris*, levam pelo menos 8 horas para dobrar de tamanho, algumas bactérias podem realizar essa façanha em apenas 20 minutos. Os reagentes e o ar de alimentação entram no sistema à temperatura ambiente (T_0), que é considerada como 25 °C, sem contribuir para o aquecimento do reator.

A escolha da espécie *Chlorella vulgaris* para esta análise foi motivada pela sua adaptabilidade ao ambiente de produção, sendo uma das principais espécies de microalgas cultivadas em grande escala, atendendo aos mais diferentes propósitos. No entanto, é crucial ressaltar que, como este trabalho se baseia em um modelo

matemático, a espécie em si não influencia diretamente nos resultados, desde que os valores de produção e utilização permaneçam constantes. Assim, a avaliação de outras espécies só afetará a análise se demonstrarem produtividades e produtos gerados diferentes.

FIGURA 15 – Diagrama mais detalhado do sistema estudado, contendo os fluxos de massas, calor, energia e trabalho.



Fonte: Autor

O meio de cultivo selecionado é o CHU, amplamente reconhecido na literatura por promover um crescimento eficaz e seguro das microalgas. Os compostos presentes no meio e suas quantidades estão detalhados na Tabela 1. As principais fontes de aquecimento para o fotobiorreator são os gases provenientes do incinerador e a luz solar. No entanto, o fotobiorreator não é isolado, e parte do calor absorvido é dissipada

para o ambiente externo ao longo do dia. É importante observar que, para que ocorra essa dissipação, o fotobiorreator precisa estar a uma temperatura superior ao ambiente, o que, em média, não ocorre de forma significativa.

A reação de fotossíntese converte a radiação solar em exergia química, transformando CO_2 e água em glicose. Esta é uma simplificação para o conteúdo da biomassa seca, que não se limita apenas à glicose, conforme indicado por outros estudos. Considera-se que a glicose é o produto final do fotobiorreator e de todo o processo de produção de biomassa seca. Além disso, assume-se que o sistema está em regime permanente (estacionário), utilizado no cálculo como um valor médio ao longo do período de produção. Para cada fotobiorreator, temos uma produção de 24 kg de biomassa a cada 14 dias, resultando em uma média de 1,7 kg/dia de biomassa seca, considerando uma produção sem perdas nas etapas de remoção de água.

Adota-se uma abordagem de produção contínua e ideal ao longo do período anual, eliminando a ocorrência de perdas, produções defeituosas, contaminações e quaisquer problemas relacionados a equipamentos ou à linha de produção.

4.3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE EXERGÉTICA DO SISTEMA

As exergias específicas foram calculadas de acordo com a equação (2.2), e as entalpias e entropias foram calculadas através do programa *Interactive Thermodynamics 3.1* a partir dos dados de temperaturas e pressões de cada corrente analisada, a equação (2.3) foi utilizada para encontrar as massas de saída de cada etapa. Para as análises realizadas neste capítulo, considerou-se o ambiente como estado de referência padrão para a entalpia (h_0), temperatura (T_0) e entropia (s_0).

4.3.1 Incinerador

O incinerador é alimentado por três correntes de massa: ar ($1,20 \cdot 10^4$ kg/dia), gás natural ($9,63 \cdot 10^{+1}$ kg/dia) e resíduos sólidos ($6,00 \cdot 10^{+2}$ kg/dia), formando o combustível híbrido. Durante a combustão completa, os gases resultantes e os resíduos são expelidos, este último na forma de cinzas. Uma ventoinha é utilizada para auxiliar na exaustão dos gases, sendo a única fonte de trabalho nesta etapa. A equação do balanço de exergia para esta etapa é:

$$\dot{W}_{ven} = \dot{E}_{QINC} - \dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_{DINC}$$

Onde \dot{E}_Q é a exergia em forma de calor gerada pela combustão dos combustíveis híbridos, \dot{E}_1 é a exergia dos gases resultantes da combustão, \dot{E}_2 é a exergia das cinzas e \dot{W}_{ven} é o trabalho feito por um ventilador para auxiliar no fluxo de gases.

4.3.2 Trocador de calor

No trocador de calor, duas correntes atuam: a corrente de gases proveniente do incinerador e a corrente de água, utilizada para receber a energia térmica dos gases e reduzir sua temperatura para 35 °C. Nesta etapa, considerou-se uma corrente de água da rede municipal, sem tratamento adicional ou necessidade de outros equipamentos. A equação correspondente é:

$$0 = \dot{E}_1 + \dot{E}_3 - \dot{E}_5 - \dot{E}_4 - \dot{E}_{DTC}$$

Onde \dot{E}_1 é a exergia que entra no sistema na forma dos gases da combustão, \dot{E}_3 é a exergia da água entrando no sistema à temperatura ambiente (25 °C), \dot{E}_4 é a água quente saindo do sistema (o trocador de calor foi projetado para limitar a temperatura da água a 100 °C, permitindo que ela saia no estado líquido), e \dot{E}_5 são os gases da combustão a uma temperatura de 35 °C. Não foram consideradas perdas de calor para o ambiente externo.

4.3.3 Coluna de fixação

Na coluna de fixação, novamente temos duas correntes de massa interagindo, o meio de cultivo do FBR flui pelas prateleiras da coluna, absorvendo o CO_2 presente no gás. A coluna possui 2 metros de altura com diâmetro de 60 cm. As prateleiras ocupam mais da metade do diâmetro da coluna (40 cm) e são intercaladas, fazendo com que a distância real percorrida pelas massas seja maior que os 2 metros da coluna. Nesta etapa, uma bomba de 1 hp é usada para impulsionar o fluido do FBR para a entrada da coluna (2 m de altura), sendo a gravidade responsável pelo movimento descendente. Como houve apenas uma troca de massa entre a corrente que entrou do FBR e os gases, a soma de $\dot{E}_5 - \dot{E}_6 + \dot{E}_8 - \dot{E}_7$ se cancelam, resultando na seguinte equação:

$$\dot{W}_{pCF} = -\dot{m}_7 \cdot g \cdot L_{col} \cdot 10^{-3} - \dot{E}_{DCF}$$

Onde \dot{W}_p é o trabalho realizado pela bomba, consumindo energia elétrica; g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s^2), e L_{col} é a altura da coluna de fixação.

4.3.4 Fotobiorreator

O Fotobiorreator (FBR) apresenta uma complexa dinâmica de correntes de massa, mantendo o fluxo do fluido e retirando gases. A operação envolve um compressor de ar para movimentação da corrente de entrada e saída, com pouca interação com o fluido, que já se encontra saturado pela coluna de fixação. Devido à presença

da coluna de fixação, uma corrente sai do FBR e passa por essa coluna, retornando enriquecida em CO_2 . O sistema opera em batelada, onde um ciclo começa com uma pequena quantidade de microalgas e, após 14 dias, todo o volume e material do FBR são recolhidos para as etapas subsequentes. No entanto, para fins de análise matemática, consideramos valores médios diários (volume total produzido em 14 dias dividido por 14 dias). Na prática de batelada, o que ocorre é a remoção total do meio, que equivale a $12m^3$, substituído pelo meio para a próxima produção. Os FBR possuem uma produção média de 24kg de biomassa de microalgas a cada 14 dias, para um volume de $12m^3$, o que deixa uma média de $2g/l$, e uma média de 857 kg de meio retirados por dia.

Nesta etapa ocorre a fotossíntese, quando as microalgas utilizam o CO_2 capturado e a energia da luz solar para produzir glucose. Foi considerada a radiação solar média de $400W/m^2$ em Curitiba e uma área de absorção média do FBR de $20m^2$. O balanço de exergia para o fotobiorreator é

$$\dot{W}_p = \dot{E}_7 + \dot{E}_9 + \dot{E}_{10} + \dot{E}_{sol_{FBR}} - \dot{E}_8 - \dot{E}_{12} - \dot{E}_{11} - \dot{E}_{DFBR}$$

\dot{W}_p é o trabalho realizado pelas bombas de ar e do fluido, \dot{E}_7 representa o meio rico em CO_2 que retorna da coluna de fixação, \dot{E}_8 o meio de cultivo que sai em direção à coluna de fixação, \dot{E}_9 é a reposição do meio com base no valor médio diário utilizado, \dot{E}_{10} refere-se à massa de ar que entra com o auxílio do compressor, \dot{E}_{11} a massa de ar que sai, \dot{E}_{12} contém o cultivo rico em microalgas, que é o objetivo desta etapa e \dot{E}_{sol} é a energia solar interceptada pelo FBR.

4.3.5 Floculador

O floculador atua como um agregador de massa, melhorando a eficiência das etapas subsequentes. Nesta etapa, a corrente de massa do cultivo de microalgas recebe uma pequena quantidade de agente floculante, quitosana. Após um período de agitação para garantir uma melhor distribuição, a mistura fica em repouso para que a gravidade separe a água das microalgas floculadas. A equação correspondente é:

$$\dot{W}_f = \dot{E}_{12} - \dot{E}_{14} - \dot{E}_{15} - \dot{E}_{DFLOC}$$

\dot{W}_f é a contribuição em forma de trabalho do agitador, \dot{E}_{12} a massa de microalgas vinda do FBR (contendo uma grande quantidade de água), \dot{E}_{14} é o volume condensado do cultivo de microalgas após decantação, sendo \dot{E}_{15} o sobrenadante da floculação, correspondente à água retirada no processo, \dot{E}_{13} a exergia do agente floculante, que não foi considerada neste balanço devido a sua pequena massa e exergia em comparação às demais taxa de exergia.

4.3.6 Centrífuga

A centrífuga é usada para aumentar a concentração de biomassa de microalgas para uma concentração de aproximadamente 20 % (m/v). Neste caso, temos apenas a entrada de cultivo concentrado após floculado e a saída da biomassa mais densa na forma de uma pasta e a água retirada no processo de centrifugação. A equação correspondente é:

$$\dot{W}_c = \dot{E}_{15} - \dot{E}_{16} - \dot{E}_{17} - \dot{E}_{DCEN}$$

\dot{W}_c é o trabalho feito pela centrífuga para eliminar a água, \dot{E}_{15} é decanto vindo da floculadora, \dot{E}_{16} representa a massa de água retirada e \dot{E}_{17} a pasta com concentração de 20% de biomassa.

4.3.7 Desidratador

A pasta que sai da centrífuga passa por um processo de secagem, que pode ser feito em uma estufa ou forno. Neste caso, um desidratador é utilizado a uma temperatura de 60 °C por 24 horas. A equação correspondente é:

$$\dot{W}_d = \dot{E}_{17} - \dot{E}_{18} - \dot{E}_{19} - \dot{E}_{DDESI}$$

\dot{W}_d é o trabalho elétrico do Desidratador, \dot{E}_{17} a pasta vinda da centrífuga, \dot{E}_{18} a quantidade de água que será retirada no processo, que acabara saindo como um vapor, e \dot{E}_{19} a biomassa seca.

4.3.8 Promotor de crescimento vegetal

Nesta etapa, avalia-se a utilização da biomassa microalgal seca como promotor de crescimento vegetal (PCV), considerando a diferença na exergia obtida nas plantas tratadas com o mesmo. Essa diferença pode ocorrer tanto devido a variações na massa vegetal resultante, em decorrência da melhora do crescimento das plantas, na exergia específica ou em ambos. Para os cálculos foram considerados os resultados obtidos por Ronga et al. (2019) que avaliaram a aplicação de biomassa de *Chlorella vulgaris* no desenvolvimento de plantas de tomates em diferentes concentrações e obtiveram os ganhos em massa e número de frutos gerados com a aplicação da biomassa. A equação correspondente é:

$$0 = \dot{E}_{19_{frac}} - \dot{E}_{20} - \dot{E}_{DPCV}$$

$\dot{E}_{19_{frac}}$ representa a biomassa microalgal seca utilizada como PCV, constituindo uma fração da biomassa total produzida. \dot{E}_{20} denota a diferença de exergias apresentada pelo cultivo vegetal ao utilizar o bioestimulante em comparação com o cultivo de controle ($\dot{E}_{21} - \dot{E}_{22}$). Não foram computados valores como os nutrientes recebidos por cada um dos cultivos ou a quantidade adicional de radiação solar que absorveram. O foco estava na avaliação do ganho de exergia, que, neste caso, resulta de uma melhor absorção das fontes naturalmente disponíveis para ambos os cultivos. Portanto, isso representa uma simplificação do processo de fotossíntese e crescimento vegetal, mas que se mostra conveniente para esta análise, permitindo-nos atingir nossos objetivos.

4.4 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE EXERGEOECONOMICA DO SISTEMA

A aplicação das equações derivadas para a exergia do sistema, em consonância com os princípios da exergoeconomia e a equação (2.4), resulta em um conjunto de equações representativas para cada componente do processo como segue.

4.4.1 Incinerador

$$c_1 \cdot (\dot{E}_1 + \dot{E}_2) = c_{CH} \cdot \dot{E}_{Q_{INC}} - c_{elet} \cdot \dot{W}_{ven} + \dot{Z}_{CI_{INC}} + \dot{Z}_{OM_{INC}}$$

Esta equação permite encontrar o valor de c_1 , que é o custo exergético para produzir os gases ricos em CO_2 e cinzas que são os produtos desta etapa. c_{elet} é o custo exergético na energia elétrica e c_{CH} é o custo do combustível híbrido (ar, RSM, Gas natural).

O componente $Z_{CI_{INC}}$ foi derivado dos valores de investimento gastos anteriormente no desenvolvimento deste equipamento pelo grupo NPDEAS, com uma estimativa do encarecimento dado o tempo decorrido, levando em consideração uma estimativa de vida útil do incinerador de 10 anos, sendo a mesma lógica aplicada para as etapas posteriores para os componentes Z_{CI} . O componente $\dot{Z}_{OM_{INC}}$ foi contabilizado com o custo de um operário, cujo salário foi estimado em R\$ 6.000, necessário para manter a queima do combustível híbrido, juntamente com um custo médio de manutenção do incinerador já estabelecido no grupo.

4.4.2 Trocador de calor

$$c_5 \cdot \dot{E}_5 = c_1 \cdot \dot{E}_1 - c_4 \cdot \dot{E}_4 + \dot{Z}_{CI_{TC}} + \dot{Z}_{OM_{TC}}$$

Onde c_5 é o custo exergético para a produção do gás resfriado (35 °C) e c_4 o custo exergético da água quente, sendo que $c_3 \cdot \dot{E}_3 = 0$. Dada a natureza estática

do trocador de calor, não é necessária a presença de um operador ativo, então para operações esporádicas, o operador do incinerador atuara, reduzindo assim os custos de operação e manutenção.

4.4.3 Coluna de fixação

$$c_6 \cdot \dot{E}_6 = c_5 \cdot \dot{E}_5 + c_{elet} \cdot \dot{W}_{pCF} + \dot{Z}_{CI_{CF}}$$

c_6 é o custo exergético dos gases que saem com menos CO_2 dado a interação com o cultivo. Similar ao trocador de calor, não é necessária a presença de um operador ativo devido à natureza estática da operação, o que resulta em custos de manutenção mais baixos. Então temos um operador para estas 3 etapas (INC, TC, CF), que são o sistema de incineração e emissão de gases ricos em CO_2 .

4.4.4 Fotobiorreator

$$\dot{W}_p \cdot c_{elet} = \dot{E}_8 \cdot c_8 + \dot{E}_9 \cdot c_9 + \dot{E}_{10} \cdot c_{10} + \dot{E}_{sol_{FBR}} \cdot c_{sol} - \dot{E}_7 \cdot c_7 - \dot{E}_{12} \cdot c_{12} - \dot{E}_{11} \cdot c_{11} + \dot{Z}_{OM_{FBR}} + \dot{Z}_{CI_{FBR}} + \dot{Z}_{CHU}$$

Onde c_7 é o custo exergético do cultivo rico em CO_2 que vem da CF, c_8 o custo do cultivo, c_9 o custo do meio (que neste caso foi considerado como água), c_{10} e c_{11} o custo do ar utilizado para gerar a turbidez no meio, c_{12} que é o valor do cultivo rico em microalgas e c_{sol} refere-se ao custo exergético da energia solar. É crucial observar que os valores relativos à energia solar e às correntes de massa de ar foram considerados como custo zero.

O fotobiorreator desenvolvido e construído pelo grupo NPDEAS possui uma estimativa de vida útil de 10 anos, embora sua estrutura de ferro possa durar mais e ser reutilizada. Um operador é necessário nesta etapa, mas o trabalho é menos braçal e mais técnico, sendo idealmente desempenhado por um bolsista com um salário estimado em R\$ 2.000. O custo de manutenção anual é um pouco mais elevado devido à complexidade e à utilização de bombas e compressores no sistema. O termo \dot{Z}_{CHU} representa o gasto anual com os nutrientes químicos adquiridos para a preparação do meio CHU. Dado que esses nutrientes possuem uma massa consideravelmente reduzida em comparação com outros elementos e uma exergia específica não substancialmente superior, optou-se por não utilizar o custo exergético para esses nutrientes.

4.4.5 Floculador

$$\dot{W}_f \cdot c_{elet} = \dot{E}_{12} \cdot c_{12} - \dot{E}_{14} \cdot c_{14} - c_{15} \cdot \dot{E}_{15} + \dot{Z}_{OM_{FLOC}} + \dot{Z}_{CI_{FLOC}} + \dot{Z}_{FLOC}$$

c_{14} é o custo exergético da água extraída no processo, c_{15} o custo do caldo floculado. Seguindo a mesma lógica aplicada ao meio CHU, o agente floculador foi considerado apenas como um custo não exergético, \dot{Z}_{FLOC} . A floculação ocorre em um recipiente semelhante a uma caixa d'água, feito do mesmo material, com um funil e uma saída de material. Um técnico responsável pela produção de biomassa seca, que inclui etapas como floculação, centrifugação e desidratação do cultivo, foi considerado para esta etapa, com um salário estimado em R\$ 2.000.

4.4.6 Centrífuga

$$\dot{W}_c \cdot c_{elet} = \dot{E}_{15} \cdot c_{15} - \dot{E}_{16} \cdot c_{16} - \dot{E}_{17} \cdot c_{17} + \dot{Z}_{OMCEN} + \dot{Z}_{CICEN}$$

Onde c_{16} é o custo da água sobrenadante retirada no processo e c_{17} o custo da pasta de biomassa de microalgas. O custo da máquina de centrifugação, que o grupo já possui, foi ajustado para valores encontrados para equipamentos semelhantes em pesquisa de mercado. Esta etapa utiliza o mesmo técnico da etapa anterior.

4.4.7 Desidratador

$$\dot{W}_d \cdot c_{elet} = \dot{E}_{17} \cdot c_{17} - \dot{E}_{18} \cdot c_{18} - \dot{E}_{19} \cdot c_{19} + \dot{Z}_{OMDESI} + \dot{Z}_{CIDESI}$$

c_{18} é o custo do vapor de água retirada e c_{19} o custo exergético da biomassa seca. O custo da máquina de desidratação, que o grupo já possui, foi ajustado para refletir o período desta análise. Neste contexto, é importante notar que esta etapa utiliza o mesmo técnico que a etapa anterior, o que implica em uma continuidade na alocação de recursos humanos e na gestão de pessoal. Essa decisão foi tomada visando otimizar a eficiência operacional, aproveitando a experiência e habilidades do técnico já treinado e familiarizado com as operações do sistema.

Essa abordagem tem várias vantagens, incluindo a redução dos custos de treinamento e adaptação, a manutenção da consistência na operação e manutenção do equipamento e a maximização da eficiência da força de trabalho. Ao manter o mesmo técnico para ambas as etapas, há uma maior continuidade e fluidez no fluxo de trabalho, minimizando interrupções e possíveis erros decorrentes de mudanças frequentes de operadores.

Além disso, a familiaridade do técnico com o equipamento e os procedimentos operacionais pode levar a um aumento da produtividade e qualidade do trabalho realizado. Essa familiaridade permite uma resolução mais rápida de problemas e uma resposta mais eficiente a possíveis contingências durante o processo de desidratação da biomassa de microalgas.

4.4.8 Promotor de crescimento vegetal

$$0 = c_{19} \cdot \dot{E}_{19_{frac}} - c_{20} \cdot \dot{E}_{20} + \dot{Z}_{CI_{PCV}} + \dot{Z}_{OM_{PCV}}$$

Onde c_{20} é o custo exergético da utilização da biomassa de microalgas seca como promotor de crescimento vegetal. Para esta etapa, os custos $\dot{Z}_{CI_{PCV}}$ foram atribuídos à compra dos equipamentos necessários para a aplicação do bioestimulante, que, nesta análise, tem um caráter laboratorial e, portanto, custos menores, sem equipamentos muito caros ou complexos. Um operador foi incluído nesta etapa, cuja função é o cultivo e colheita das plantas submetidas ao tratamento com o PCV.

4.5 MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DAS FUNÇÕES OBJETIVO

As funções objetivo são ferramentas que empregam os conceitos e valores derivados das análises exergéticas e exergoeconômicas para fornecer mais informações ou comparações ao sistema, utilizando-os de maneira diferenciada. Por exemplo, a equação (4.1) oferece uma visão mais perspicaz da exergia destruída, expressando-a como uma proporção da exergia total utilizada no sistema na forma de combustíveis e trabalho em cada etapa. Além disso, a equação (4.2) revela a eficiência exergética de cada etapa em relação à exergia dos produtos gerados em comparação com a exergia de entrada na forma de combustíveis e trabalho. Vale destacar que essa eficiência pode ultrapassar 100% em casos nos quais uma fonte externa de exergia, como a luz solar, não é considerada. A equação (4.3), visa avaliar qual etapa do sistema possui o maior custo, considerando os custos de capital inicial, operação e manutenção, bem como o custo associado à ineficiência da etapa, obtido a partir do custo do combustível e da exergia destruída.

Taxa de destruição de exergia:

$$y_{D,k} = 100 \cdot \frac{\dot{E}_{Dk}}{\dot{E}_{F,tot}} \quad (4.1)$$

Relação entre taxas de exergia do produto e do combustível:

$$\varepsilon_k = 100 \cdot \frac{\dot{E}_{Pk}}{\dot{E}_{F,k}} \quad (4.2)$$

Destruição exergética + taxas de custo não exergético:

$$\dot{Z}\dot{C}_{D,k} = \dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_{CI_k} + \dot{Z}_{OM_k} \quad (4.3)$$

Onde o subscrito k refere-se a cada etapa do processo, P representa o produto gerado na etapa, F é o combustível (entrada) utilizado que também considera o trabalho (\dot{W}) da etapa, e tot refere-se à quantidade total do sistema.

A aplicação das equações derivadas para a exergia do sistema, em consonância com os princípios da exergoeconomia e as equações (4.1), (4.2) e (4.3), resulta em um conjunto de equações representativas para cada componente do processo como segue onde $\dot{E}_{F,tot}$ é:

$$\dot{E}_{F,tot} = \dot{E}_{comb} - \dot{W}_{ven} + \dot{E}_3 - \dot{W}_{FC} + \dot{E}_{sunPBR} - \dot{W}_p - \dot{W}_f - \dot{W}_c - \dot{W}_d + \dot{E}_9$$

4.5.1 Incinerador

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,INC} &= \dot{E}_{D,INC} \cdot c_{CH} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,INC} &= \dot{C}_{D,INC} + \dot{Z}\dot{C}_{I,INC} + \dot{Z}\dot{O}_{M,INC} \\ \epsilon_{INC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_1 + \dot{E}_2}{\dot{E}_{Q,INC} - \dot{W}_{ven}} \\ y_{INC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D,INC}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.2 Trocador de calor

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,TC} &= \dot{E}_{D,TC} \cdot c_3 \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,TC} &= \dot{C}_{D,TC} + \dot{Z}\dot{C}_{I,TC} + \dot{Z}\dot{O}_{M,TC} \\ \epsilon_{TC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_5 + \dot{E}_4}{\dot{E}_3 + \dot{E}_1} \\ y_{TC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D,TC}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.3 Coluna de fixação

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,CF} &= \dot{E}_{D,CF} \cdot c_{elet} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,CF} &= \dot{C}_{D,CF} + \dot{Z}\dot{C}_{I,CF} + \dot{Z}\dot{O}_{M,CF} \\ \epsilon_{CF} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_6}{\dot{E}_5 - \dot{W}_{FC}} \\ y_{CF} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D,CF}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.4 Fotobiorreator

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,FBR} &= \dot{E}_{D,FBR} \cdot c_{elet} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,FBR} &= \dot{C}_{D,FBR} + \dot{Z}\dot{C}_{I,FBR} + \dot{Z}\dot{O}_{M,FBR} \\ \epsilon_{FBR} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{12} + \dot{E}_{11} + \dot{E}_8}{\dot{E}_9 + \dot{E}_7 + \dot{E}_{10} - \dot{W}_p} \\ y_{FBR} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D,FBR}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.5 Floculador

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,FLOC} &= \dot{E}_{D_{FLOC}} \cdot c_{12} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,FLOC} &= \dot{C}_{D,FLOC} + \dot{Z}C_{I_{FLOC}} + \dot{Z}OM_{FLOC} \\ \varepsilon_{FLOC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{15} + \dot{E}_{14}}{\dot{E}_{12} - \dot{W}_f} \\ y_{FLOC} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D_{FLOC}}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.6 Centrífuga

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,CEN} &= \dot{E}_{D_{CEN}} \cdot c_{15} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,CF} &= \dot{C}_{D,CEN} + \dot{Z}C_{I_{CEN}} + \dot{Z}OM_{CEN} \\ \varepsilon_{CEN} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{16} + \dot{E}_{17}}{\dot{E}_{15} - \dot{W}_c} \\ y_{CEN} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D_{CEN}}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.7 Desidratador

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,DESI} &= \dot{E}_{D_{DESI}} \cdot c_{17} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,DESI} &= \dot{C}_{D,DESI} + \dot{Z}C_{I_{DESI}} + \dot{Z}OM_{DESI} \\ \varepsilon_{DESI} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{18} + \dot{E}_{19}}{\dot{E}_{17} - \dot{W}_d} \\ y_{DESI} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D_{DESI}}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.5.8 Promotor de crescimento vegetal

$$\begin{aligned}\dot{C}_{D,PCV} &= \dot{E}_{D_{PCV}} \cdot c_{19} \\ \dot{Z}\dot{C}_{D,PCV} &= \dot{C}_{D,PCV} + \dot{Z}C_{I_{PCV}} + \dot{Z}OM_{PCV} \\ \varepsilon_{PCV} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{20}}{\dot{E}_{19_{frac}}} \\ y_{PCV} &= 100 \cdot \frac{\dot{E}_{D_{PCV}}}{\dot{E}_{F,tot}}\end{aligned}$$

4.6 ANÁLISE DE PARÂMETROS

Com o objetivo de compreender como determinados parâmetros, como a eficácia da utilização de biomassa, o volume de produção e utilização da biomassa, o custo do meio de cultivo (CHU) e a integração de uma usina de recuperação de energia acoplada na etapa de troca de calor, podem interferir, modificar e idealmente

diminuir os custos encontrados por esta análise exergoeconômica, realizamos uma análise detalhada desses fatores.

A análise dos parâmetros foi conduzida mantendo os demais elementos do sistema constantes, conforme utilizados na análise exergoeconômica principal. Em seguida, cada parâmetro de interesse foi variado para avaliar o comportamento do sistema com essa variação. Essa abordagem nos permitiu identificar as principais influências de cada parâmetro nos resultados da análise exergoeconômica e entender como esses fatores podem ser otimizados para reduzir os custos e melhorar a eficiência exergética do sistema como um todo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CUSTO DE CAPITAL INICIAL E DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

É importante ressaltar que o custo exergético elétrico, denotado por c_{elet} , é derivado de uma taxa de R\$ 0,78 por quilowatt-hora ($R\$/kWh$) cobrada pela Copel/PR. Embora o meio de cultivo não tenha um impacto significativo na análise exergeticamente, seu custo é considerável para a produção, estimado em 100 R\$ para 10.000 litros ($10 m^3$) de meio produzido, sendo necessários apenas 7,22 kg de nutrientes para o mesmo volume. Portanto, a cada ciclo de produção de microalgas (batelada de 14 dias), são gastos 120 R\$ com meio CHU ($12 m^3$ por FBR). O valor do c_{CH} usado foi de $3,476 \cdot 10^{-5}$, que é um numero pequeno pois o combustível possui alta quantidade de exergia.

A Tabela 2 apresenta os valores empregados para os investimentos de capital inicial (\dot{Z}_{CI}) e para a operação e manutenção (\dot{Z}_{OM}) de cada componente do sistema, o valor de \dot{Z}_{CHU} é de $3,129 \cdot 10^{+3}$ e o valor de \dot{Z}_{FLOC} é $4,912 \cdot 10^{+2} R\$/ano$.

TABELA 2 – Investimentos em capital inicial (\dot{Z}_{CI}) e operação/manutenção (\dot{Z}_{OM}) para a produção de biomassa de microalgas para cada etapa do processo

Etapa	$\dot{Z}_{CI}(R\$/ano)$	$\dot{Z}_{OM}(R\$/ano)$
INC	$1,50 \cdot 10^{+4}$	$9,60 \cdot 10^{+4}$
TC	$5,00 \cdot 10^{+3}$	$1,00 \cdot 10^{+3}$
CF	$5,00 \cdot 10^{+3}$	$0,00 \cdot 10^{+0}$
FBR	$2,00 \cdot 10^{+4}$	$2,55 \cdot 10^{+4}$
FLOC	$1,00 \cdot 10^{+2}$	$0,00 \cdot 10^{+0}$
CEN	$6,00 \cdot 10^{+3}$	$5,00 \cdot 10^{+2}$
DESI	$1,00 \cdot 10^{+3}$	$2,41 \cdot 10^{+4}$
PCV	$5,00 \cdot 10^{+2}$	$2,40 \cdot 10^{+3}$

Fonte: Autor.

5.2 TAXAS DE EXERGIA NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PROMOÇÃO DE CRESCIMENTO VEGETAL

Os resultados das exergias encontradas pelo sistema estão resumidos na Tabela 3. A tabela fornece uma visão geral dos principais parâmetros de exergia e seus valores correspondentes para os fluxos de massas no sistema analisado.

A informação mais interessante que emerge da análise exergética é a quantificação da destruição de exergia pelo sistema, conforme apresentado na Tabela 4, com a Figura 16 proporcionando uma compreensão mais clara dos valores. O incinerador (INC) destaca-se como o principal agente de destruição no sistema analisado, sendo

a transferência de calor e a reação química os principais fatores responsáveis pela destruição de exergia durante a combustão. A exergia química dos gases de escape revela uma forte relação entre as perdas de exergia, as emissões de combustão e a temperatura de exaustão dos gases.

TABELA 3 – Exergias para cada fluxo de massa no sistema

nº	Taxa de fluxo de massa	\dot{m} (kg/dia)	\dot{E} (kJ/dia)	e (kJ/kg)
1	gás	$1,268 \cdot 10^4$	$4,162 \cdot 10^6$	$3,282 \cdot 10^2$
2	cinzas	$2,400 \cdot 10^1$	$1,797 \cdot 10^4$	$7,486 \cdot 10^2$
3	água	$1,514 \cdot 10^5$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
4	água quente	$1,514 \cdot 10^5$	$3,272 \cdot 10^6$	$2,161 \cdot 10^1$
5	gás menor temperatura	$1,268 \cdot 10^4$	$1,902 \cdot 10^4$	$1,500 \cdot 10^0$
6	gás menos CO_2	$1,138 \cdot 10^4$	$1,902 \cdot 10^4$	$1,671 \cdot 10^0$
7	caldo rico em CO_2	$3,600 \cdot 10^4$	$1,708 \cdot 10^3$	$4,744 \cdot 10^2$
8	caldo	$3,600 \cdot 10^4$	$1,709 \cdot 10^{+03}$	$4,747 \cdot 10^2$
9	meio CHU	$8,571 \cdot 10^2$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
10	ar	$1,621 \cdot 10^5$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
11	ar mais limpo	$1,621 \cdot 10^5$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
12	biomassa/caldo	$8,571 \cdot 10^2$	$1,381 \cdot 10^7$	$1,611 \cdot 10^4$
13	agente floculador	$8,571 \cdot 10^1$	-	-
14	água	$7,271 \cdot 10^2$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
15	caldo floculado	$1,309 \cdot 10^2$	$2,109 \cdot 10^6$	$1,611 \cdot 10^4$
16	água	$1,223 \cdot 10^2$	$0,000 \cdot 10^0$	$0,000 \cdot 10^0$
17	biomassa em pedaços	$8,571 \cdot 10^0$	$1,381 \cdot 10^5$	$1,611 \cdot 10^4$
18	água	$6,857 \cdot 10^0$	$6,777 \cdot 10^1$	$9,884 \cdot 10^0$
19	biomassa seca	$1,714 \cdot 10^0$	$1,611 \cdot 10^2$	$1,611 \cdot 10^4$
20	ganho com uso de PCV / Colheita	$6,288 \cdot 10^0$	$2,761 \cdot 10^4$	$7,531 \cdot 10^2$
21	cultivo com uso de PCV / Colheita	$1,124 \cdot 10^1$	$8,463 \cdot 10^3$	$7,531 \cdot 10^2$
22	cultivo controle / Colheita	$4,95 \cdot 10^0$	$3,728 \cdot 10^3$	$7,531 \cdot 10^2$
23	mudas		-	-

Fonte: Autor

Além disso, tanto o trocador de calor (TC) quanto o fotobiorreator (FBR) contribuem significativamente para a destruição de exergia, indicando áreas potenciais para melhorias. A exergia destruída pelo FBR pode ser explicada pela produção de microalgas abaixo da capacidade total do fotobiorreator, resultando em uma absorção incompleta da energia solar disponível. Além disso, as plantas, em geral, não conseguem absorver a energia solar em todos os comprimentos de onda (Figura 17). Portanto, mesmo com um aumento na produção de microalgas, melhorando essa eficiência e permitindo uma maior absorção da energia solar, ainda haverá uma fração dessa energia emitida pelo sol que as plantas não conseguiram absorver. Conscientes disso, torna-se imperativa a busca por alternativas para a utilização dessa energia não absorvida. Uma das possibilidades poderia ser a adoção de painéis solares com maior eficiência na captação de energia solar em faixas espectrais não absorvidas pelas plantas, maximizando assim a utilização desse recurso energético valioso.

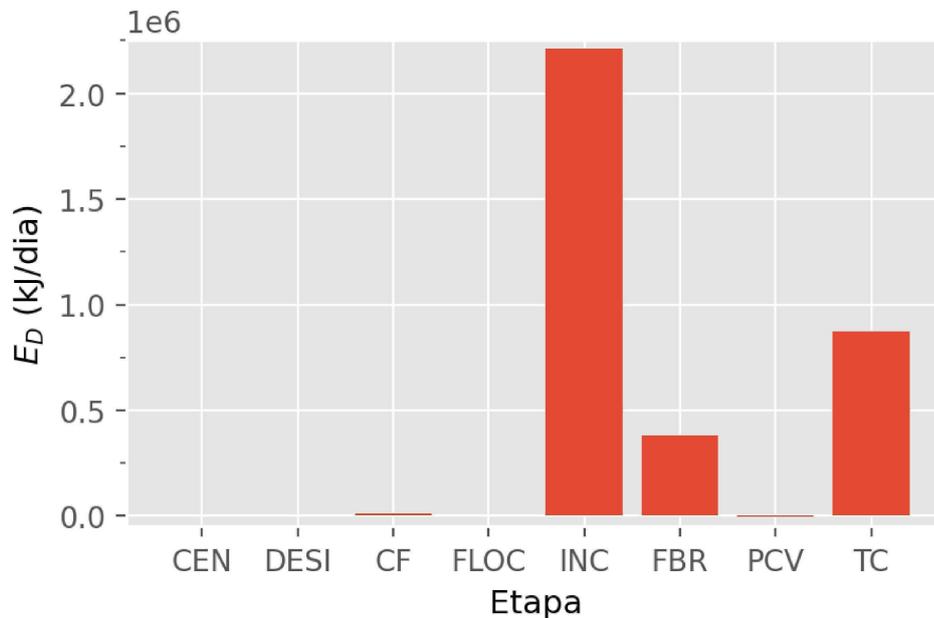
TABELA 4 – Exergia destruída pelas etapas do sistema de produção de biomassa de microalgas e a sua utilização como PCV

Etapa	\dot{E}_D (kJ/dia)
CEN	$1,143 \cdot 10^{-3}$
DESI	$1,544 \cdot 10^{+2}$
CF	$1,294 \cdot 10^{+4}$
FLOC	$4,286 \cdot 10^{-5}$
INC	$2,210 \cdot 10^{+6}$
FBR	$3,538 \cdot 10^{+5}$
PCV	$-3,125 \cdot 10^{+3}$
TC	$8,707 \cdot 10^{+5}$

Fonte: Autor

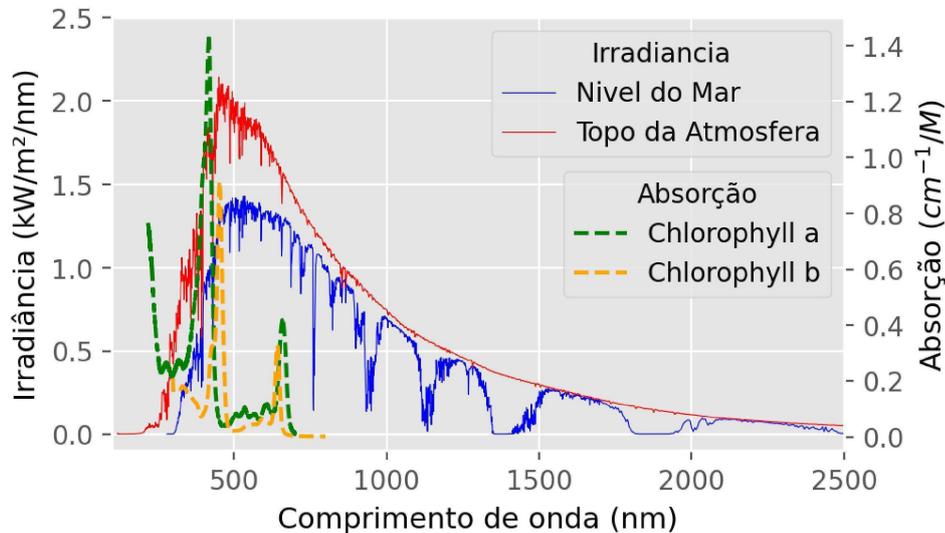
Aprimorar a eficiência dessas etapas não apenas aumentaria a sustentabilidade do sistema, mas também poderia impactar positivamente nos custos associados aos produtos gerados. Vale ressaltar que a etapa do PCV apresenta uma destruição de exergia negativa, indicando um ganho líquido de exergia no processo. Esse resultado é atribuído à utilização da biomassa de microalgas, que otimizou a absorção de nutrientes e a eficiência energética da planta, impulsionando seu crescimento e, conseqüentemente, aumentando a conversão de energia solar e nutrientes disponíveis em frutos em comparação ao cultivo controle.

FIGURA 16 – Exergia destruída no sistema de produção de microalgas, valores referentes a Tabela 4



Fonte: Autor

FIGURA 17 – Irradiação solar no topo da atmosfera, bem como a quantidade que consegue penetrar na atmosfera e chegar ao nível do mar. Faixas de absorção de radiação dos pigmentos *Chlorophyll a* e *Chlorophyll b* presentes nas plantas e responsáveis pela absorção de energia utilizada para a fotossíntese.



FONTE: Autor, National Renewable Energy Laboratory (2023), Prah1 (2023).

5.3 AVALIAÇÃO DE CUSTOS EXERGÉTICOS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA PROMOÇÃO DE CRESCIMENTO VEGETAL

Nesta seção, apresentaremos os resultados da análise exergoeconômica do sistema, Tabela 5. Esta tabela inclui os parâmetros relacionados a custos exergéticos associados com o fluxo de massas do sistema, \dot{C}_x é a taxa de custo do fluxo de massa x , encontrado através da seguinte equação:

$$\dot{C}_x = c_x \cdot \dot{E}_x$$

5.3.1 Custo exergético da produção de biomassa seca de microalgas

A análise exergoeconômica revela que o custo exergético associado à produção de biomassa seca é de $8,440 \cdot 10^{-3} \text{ R\$/kJ}$. Ao comparar os custos exergéticos c_{12} , c_{15} , c_{17} , c_{19} referentes aos produtos de saída das etapas FBR, FLOC, CEN e DESI, respectivamente, observa-se que as etapas posteriores ao FBR têm um impacto pouco significativo no custo exergético, especialmente quando comparadas ao aumento na etapa de promoção de crescimento vegetal (Figura 18). Isso indica que a produção da biomassa seca é viável, dada sua utilização e armazenamento, com pouca influência no custo exergético.

TABELA 5 – Taxa de custos exergéticos e custos diários para cada fluxo de massa no sistema

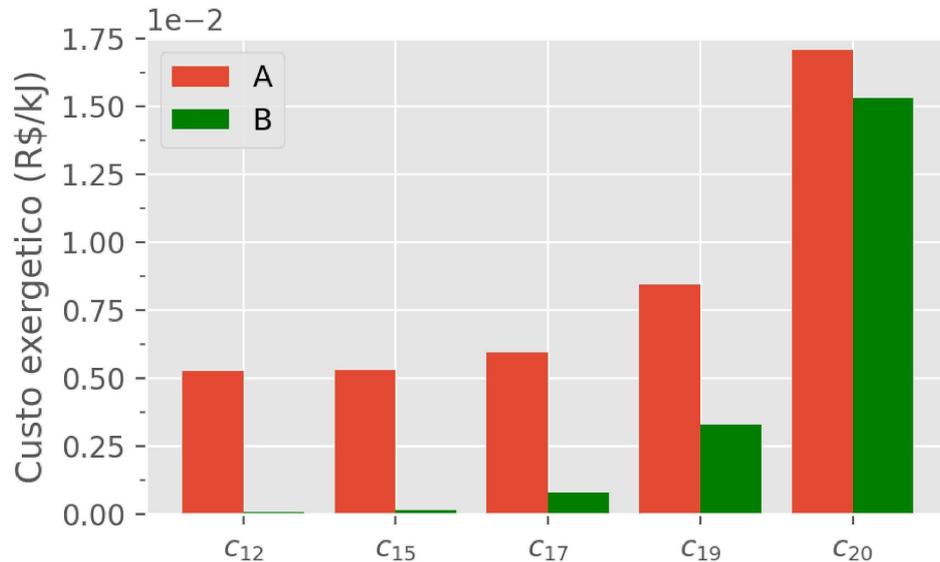
nº	Taxa de fluxo de massa	\dot{m} (kg/dia)	c (R\$/kJ)	\dot{C} (R\$/dia)
1	gás	$1,268 \cdot 10^{+4}$	$1,259 \cdot 10^{-4}$	$5,239 \cdot 10^{+2}$
2	cinzas	$2,400 \cdot 10^{+1}$	$1,259 \cdot 10^{-4}$	$2,262 \cdot 10^{+0}$
3	água	$1,514 \cdot 10^{+5}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
4	água quente	$1,514 \cdot 10^{+5}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$1,390 \cdot 10^{+1}$
5	gás menor temperatura	$1,268 \cdot 10^{+4}$	$2,768 \cdot 10^{-2}$	$5,265 \cdot 10^{+2}$
6	gás menos CO_2	$1,138 \cdot 10^{+4}$	$2,822 \cdot 10^{-2}$	$5,366 \cdot 10^{+2}$
7	caldo rico em CO_2	$3,600 \cdot 10^{+4}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$7,255 \cdot 10^{-3}$
8	caldo	$3,600 \cdot 10^{+4}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$7,259 \cdot 10^{-3}$
9	meio CHU	$8,571 \cdot 10^{+2}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
10	ar	$1,621 \cdot 10^{+5}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
11	ar mais limpo	$1,621 \cdot 10^{+5}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
12	biomassa/caldo	$8,571 \cdot 10^{+2}$	$5,245 \cdot 10^{-3}$	$7,242 \cdot 10^{+4}$
13	agente floculador	$8,571 \cdot 10^{-1}$	-	-
14	água	$7,271 \cdot 10^{+2}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
15	caldo floculado	$1,309 \cdot 10^{+2}$	$5,304 \cdot 10^{-3}$	$1,119 \cdot 10^{+4}$
16	água	$1,223 \cdot 10^{+2}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$0,000 \cdot 10^{+0}$
17	biomassa em pedaços	$8,571 \cdot 10^{+0}$	$5,948 \cdot 10^{-3}$	$8,213 \cdot 10^{+2}$
18	água	$6,857 \cdot 10^{+0}$	$4,248 \cdot 10^{-6}$	$2,879 \cdot 10^{-4}$
19	biomassa seca	$1,714 \cdot 10^{+0}$	$8,440 \cdot 10^{-3}$	$2,330 \cdot 10^{+2}$
20	ganho com uso de PCV / Colheita	$6,288 \cdot 10^{+0}$	$1,705 \cdot 10^{-2}$	$8,074 \cdot 10^{+1}$
21	cultivo com uso de PCV / Colheita	$1,124 \cdot 10^{+1}$	-	-
22	cultivo controle	$4,950 \cdot 10^{+0}$	-	-
23	mudas	-	-	-

Fonte: Autor

O custos exergético encontrado por Galante et al. (2022) para a produção de microalgas foi de $1,7 \cdot 10^{-5}$ US\$/kJ, que em reais equivale a aproximadamente $6,66 \cdot 10^{-5}$ R\$/kJ (3,92 R\$/US\$). Comparado ao valor encontrado nesta análise (c_{12}) de $5,245 \cdot 10^{-3}$, mostra-se significativamente menor, indicando que a utilização de uma usina Rankine, efluentes de biodigestores e um subsídio para a incineração de resíduos sólidos municipais tem o potencial de reduzir o custo na produção de microalgas consideravelmente, sendo o valor encontrado neste trabalho tende a ser mais realista por não depender dos subsídios e dos custos eletricos, embora esses fatores podem ser considerados fundamental financeiramente para manter este sistema.

O custo exergético da produção de microalgas (c_{12}), quando pensando como uma fonte de energia, possui um valor não muito superior quando comparado a outras fontes. Por exemplo, a eletricidade, avaliada a $0,78$ R\$/kWh nesta análise, equivale a $2,16 \cdot 10^{-4}$ R\$/kJ. A gasolina, com um custo exergético de $1,77 \cdot 10^{-4}$ R\$/kJ e um preço de 6 R\$/L, também se apresenta mais vantajosa do ponto de vista exergoeconômico. Em comparação, até mesmo o tomate, com um custo estimado de $6,00$ R\$/kg, resulta em $7,967 \cdot 10^{-3}$ R\$/kJ.

FIGURA 18 – Valores do custo exergético para as etapas de produção de microalgas (c_{12}), e etapas subsequentes para produção de biomassa seca, floculador (c_{15}), centrifuga (c_{17}), desidratador (c_{19}) e a sua utilização como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) para a análise feita neste trabalho (A), e para a análise utilizando os valores de c_{12} encontrados por Galante et al. (2022) (B).



Fonte: Autor

Considerando os benefícios da produção e utilização da biomassa de microalgas, juntamente com a geração de coprodutos no sistema, além de um subsídio para a incineração de resíduos e para a captação de CO_2 da atmosfera, existe a possibilidade de usar outras fontes de emissões, utilização de meios de cultivo mais acessíveis, como dejetos suínos, agregando valor ao tratamento de águas residuais (não só reduzindo os custos com o meio, mas aumentando a produtividade) o custo (c_{12}) encontrado pode se tornar mais interessante e reduzido.

5.3.2 Custo exergético da utilização biomassa seca de microalgas como promotor de crescimento vegetal

O custo exergético associado à utilização da biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) é de $1,705 \cdot 10^{-2} \text{ R}\$/\text{kJ}$, representando um aumento significativo em comparação aos custos das outras etapas do processo. Utilizando os valores encontrados por Galante et al. (2022) para a análise da produção e utilização de biomassa como promotor de crescimento vegetal revela que os custos c_{19} e c_{20} para as etapas posteriores à produção de microalgas (FBR) são menores, totalizando $3,262 \cdot 10^{-3}$ e $1,528 \cdot 10^{-2} \text{ R}\$/\text{kJ}$, respectivamente. Portanto, embora o custo exergético da produção de microalgas seja consideravelmente menor, o custo da utilização do PCV fica muito próximo ao encontrado nesta análise, $1,705 \cdot 10^{-2} \text{ R}\$/\text{kJ}$ (Figura 18). Essa observação destaca que, embora o custo de produção de microalgas não seja

muito elevado, o custo exergético da utilização da biomassa seca como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) se revela mais alto quando comparado aos valores mencionados anteriormente. Essa diferença de custo merece atenção e pode influenciar a viabilidade econômica do processo em questão.

Isso indica a necessidade de investigar estratégias para reduzir esse custo, como a otimização dos processos de produção e utilização, o uso de fontes de energia mais eficientes e a busca por alternativas de cultivo de microalgas que possam reduzir os custos sem comprometer a qualidade do produto final. Além disso, considerando o potencial impacto ambiental positivo da utilização de biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal, é importante encontrar maneiras de tornar essa etapa mais economicamente viável, a fim de promover sua adoção em larga escala.

5.4 AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES OBJETIVO

Nesta seção, serão discutidas as funções objetivo, equações (4.1), (4.2) e (4.3), utilizadas na análise do sistema, essenciais para avaliar o desempenho do sistema em relação aos critérios de otimização. Os resultados da análise das funções objetivo são apresentados na Tabela 6.

Com base nos valores encontrados para a função ε , podemos observar que as etapas de transformação no cultivo de microalgas em biomassa seca possuem uma eficiência exergética alta, todas próximas de 100%. Isso indica que, do ponto de vista de sustentabilidade, essa transformação não gera destruição e perdas significativas. Por outro lado, observamos que o incinerador é a etapa que mais destrói exergia em valor absoluto e a menos eficiente exergéticamente, indicando que é uma etapa que necessita de mais atenção. As etapas CF, TC e PCV apresentam eficiência exergética maior que 50%, mostrando que existem possibilidades de melhorias (Figura 19).

TABELA 6 – Valores das funções objetivo referentes as equações (4.1), (4.2) e (4.3)

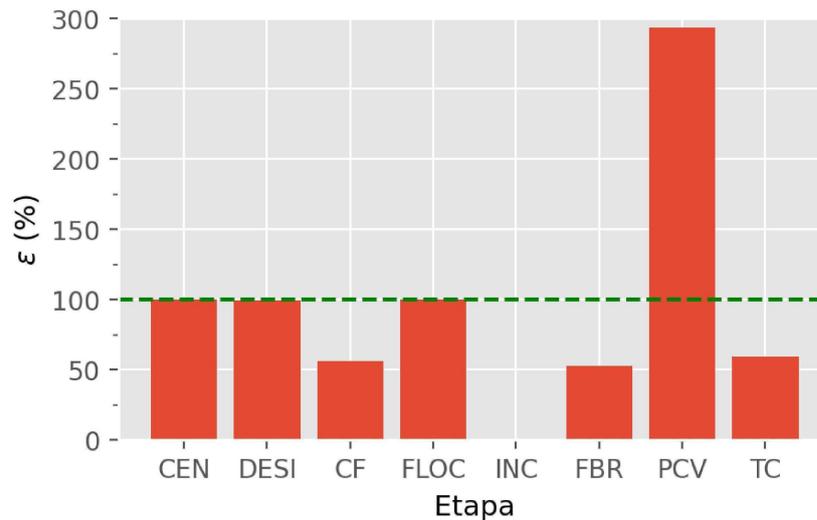
Etapa	$\varepsilon(\%)$	$y_D(\%)$	$\dot{Z}\dot{C}_D(R\$/dia)$
CEN	100	$3,89 \cdot 10^{-13}$	$6,50 \cdot 10^{+3}$
DESI	99,45	$5,26 \cdot 10^{-8}$	$2,51 \cdot 10^{+4}$
CF	56,26	$4,40 \cdot 10^{-6}$	$5,00 \cdot 10^{+3}$
FLOC	100	$1,46 \cdot 10^{-14}$	$5,91 \cdot 10^{+2}$
INC	0,001423	$7,52 \cdot 10^{-4}$	$1,11 \cdot 10^{+5}$
FBR	52,94	$1,20 \cdot 10^{-4}$	$4,87 \cdot 10^{+4}$
PCV	293,9	$-1,06 \cdot 10^{-6}$	$2,45 \cdot 10^{+4}$
TC	59,07	$2,96 \cdot 10^{-4}$	$6,00 \cdot 10^{+3}$

Fonte: Autor

O resultado mais interessante da função ε é observado na etapa PCV, onde temos uma eficiência exergética de 294%. Este valor foi alcançado devido à não consideração da energia solar absorvida pelo cultivo na equação, e como a utilização do

bioestimulante de microalgas permitiu um maior crescimento e desenvolvimento das plantas, a energia solar absorvida e utilizada por elas foi maior, gerando assim um aumento de eficiência exergetica na etapa superior a 100% “gerando” energia.

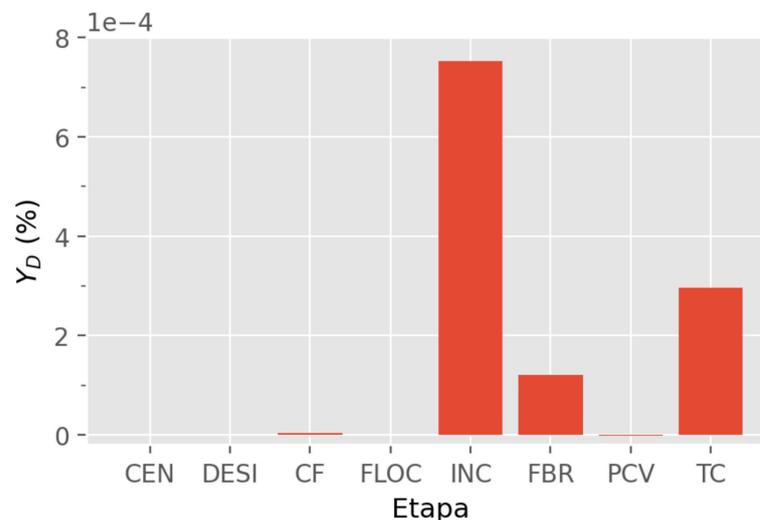
FIGURA 19 – Valores da Relação entre taxas de exergetica do produto e do combustível (equação (4.2)) para cada etapa do sistema, a etapa PCV mostra uma eficiência exergetica maior que 100 % devida a maneira que a exergetica da etapa foi contabilizada, neste caso não colocando numericamente o valor referente a energia solar absorvida pelo cultivo.



Fonte: Autor

A função y_D mostra que a etapa com a maior proporção de exergetica destruída em relação à exergetica que entra no sistema, na forma de combustíveis ou trabalho, é a etapa do INC, seguida pelas etapas TC e FBR, pois essas etapas possuem a maior destruição de exergetica no sistema (Figura 20).

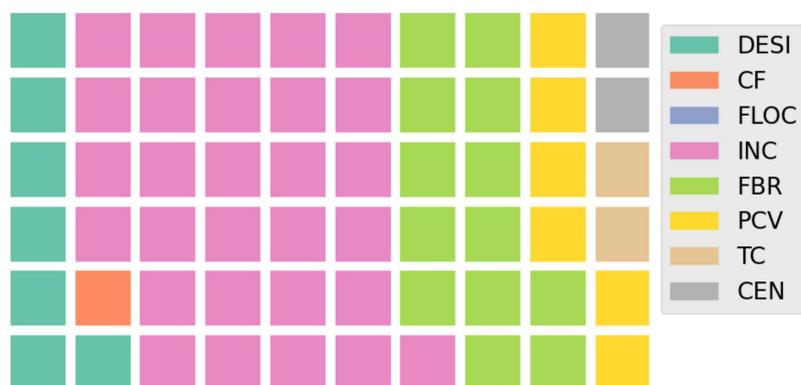
FIGURA 20 – Gráfico da razão entre as exergeticas do fluxo de massas dos produtos pela exergetica utilizada como combustível e trabalho para cada etapa.



Fonte: Autor

Por último, a função $\dot{Z}\dot{C}_D$ possibilita identificar a etapa onde se concentram os maiores custos, tanto de investimento inicial, operação e manutenção, quanto os custos atribuídos à exergia destruída pelos processos da etapa. Mais uma vez, o Incinerador é a etapa que possui os maiores custos, indicando que esta etapa, tanto pelos gastos como pela ineficiência, deve ser alvo de análises detalhadas em busca de melhorias (Figura 21).

FIGURA 21 – Valores obtidos através da função de Destruição exergética + taxas de custo não exergético $\dot{Z}\dot{C}_D$ (4.3), onde cada quadrado representa uma porcentagem dos valores totais do sistema, mostram que a etapa mais custosa para construção, operação, manutenção e gastos com combustíveis dado sua ineficiência é a etapa do incinerador.



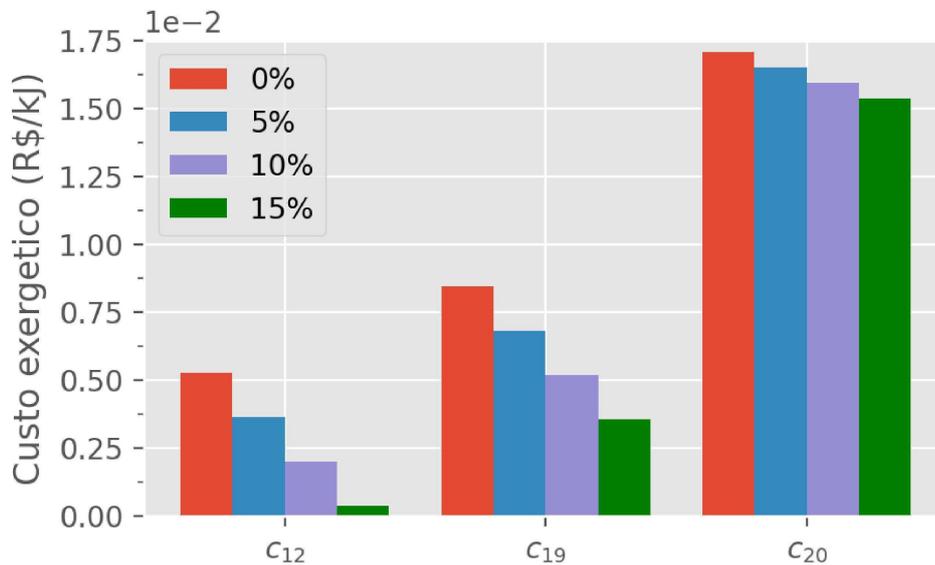
Fonte: Autor

5.5 ANÁLISE DOS PARAMETROS

Um ciclo Rankine foi integrado à etapa do TC, buscando recuperar energia através da utilização da temperatura da água de saída do trocador de calor para a geração de eletricidade com o objetivo de avaliar potenciais melhorias nos custos exergéticos c_{12} , c_{19} , c_{20} . Houve uma redução nos custos, alcançando valores de $3,672 \cdot 10^{-3}$, $6,808 \cdot 10^{-3}$, $1,649 \cdot 10^{-2}$ $R\$/kJ$ para uma eficiência na recuperação de energia térmica de 5% e $3,495 \cdot 10^{-4}$, $3,545 \cdot 10^{-3}$, $1,538 \cdot 10^{-2}$ $R\$/kJ$ para eficiência de 15% no ciclo Rankine para os valores de c_{12} , c_{19} , c_{20} , respectivamente (Figura 22). Com eficiências maiores no ciclo, é possível obter custos exergéticos negativos nas etapas de produção de microalgas e produção de biomassa.

Esses resultados indicam que é possível obter ganhos ao reduzir a dependência da energia elétrica no sistema. No entanto, é necessário realizar uma análise exergoeconômica completa do acoplamento do sistema Rankine para garantir que os custos de compra, desenvolvimento e manutenção da usina rankine sejam menores que os ganhos obtidos pela recuperação de energia. A análise completa deve considerar investimentos de capital inicial, operação e manutenção da usina recuperadora de energia para determinar a viabilidade econômica dessa integração.

FIGURA 22 – Custo exergetico das etapas de produção de microalgas (FBR), etapa final da produção de biomassa seca de microalgas (DESI) e a sua utilização como bioestimulante (PCV) com a utilização de uma usina rankine para recuperação de energia na etapa do trocador de calor.

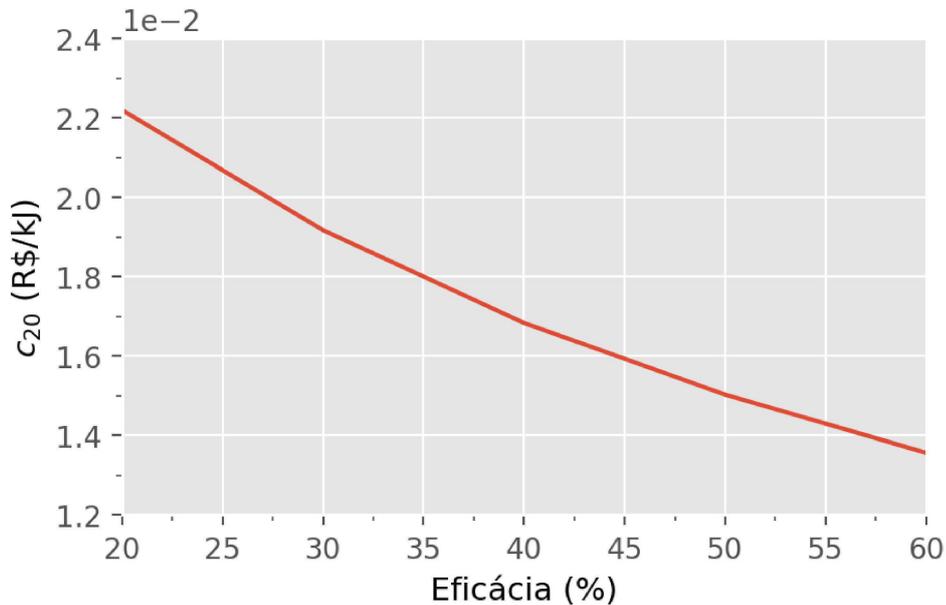


Fonte: Autor

Uma análise adicional foi conduzida, variando a eficácia da utilização de PCV, com eficiências de produção de colheita aumentando de 20 a 60% em relação ao controle. Por exemplo, para uma produção do controle de 495g, o PCV gerou de 594g (30%) até 842g (60%) para o peso médio de 10 frutos (tomates), mantendo o número médio de frutos por planta de 8 para o controle e aumentando para 14 no caso do PCV. Os resultados revelam uma variação praticamente linear negativa, mas não abrupta, chegando a um valor de $1,276 \cdot 10^{-2} \text{ R\$/kJ}$ para o c_{20} quando a eficiência de produção é de 60% (Figura 23). Esse resultado destaca a possibilidade de otimização ao encontrar uma espécie específica de microalga para essa aplicação, bem como um método de aplicação e o alvo da aplicação, diverentes platas podem reagir de diferentes maneiras a esta aplicação, visando a redução do custo exergetico.

Para avaliar o quão influente são os custos associados ao meio CHU, foi feita uma analise variando seu valor de valores de 0 R\$/1000L e 200 R\$/1000L. Os custos exergeticos encontrados foram $1,694 \cdot 10^{-2}$ e $1,715 \cdot 10^{-2} \text{ R\$/kJ}$, respectivamente. Essa variação sugere que a utilização de outros meios, como resíduos agrícolas, pode não apenas ser mais vantajosa do ponto de vista ambiental, mas também resultará em uma redução no custo exergetico final. Isso torna o sistema mais sustentável, tanto em termos de tratamento de gases e líquidos quanto em viabilidade econômica, embora a redução não seja expressiva.

FIGURA 23 – Custo exergético da utilização de biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) em função da eficácia no uso do PCV.



Fonte: Autor

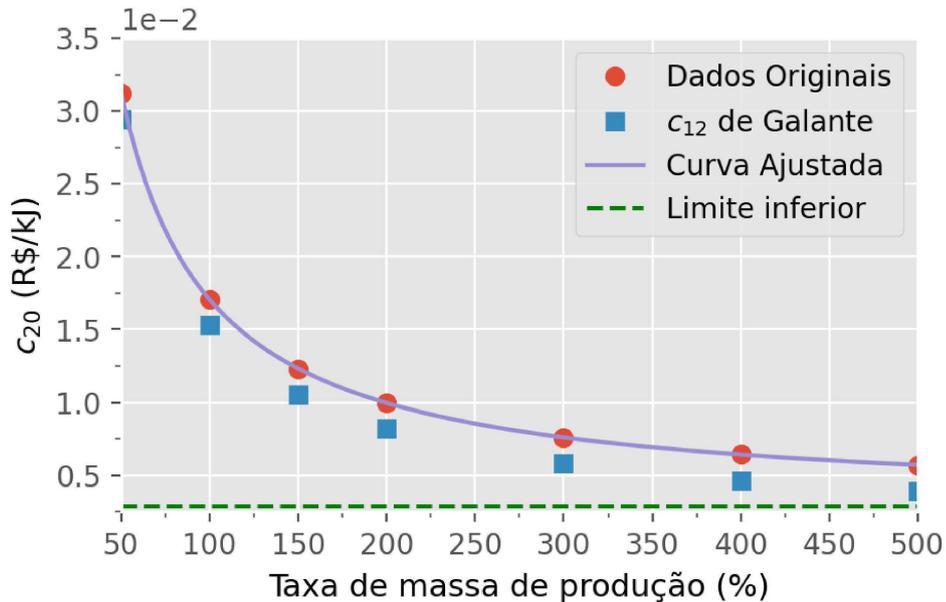
A análise da taxa de massa na etapa do PCV revelou ser um fator determinante para o custo exergético (c_{20}), indicando que um aumento na taxa de biomassa de microalgas utilizadas e nos produtos gerados, mantendo o mesmo trabalho e custos não exergéticos, pode ter um impacto significativo nos resultados. Em outras palavras, aumentar a quantidade de microalgas cultivadas e colhidas, sem aumentar os custos operacionais exergéticos, pode reduzir o custo exergético por unidade de energia produzida.

Para ilustrar esse impacto, foi realizado um estudo de caso simulando diferentes cenários de aumento na taxa de produção na etapa do PCV para os custos encontrados nesta análise e também utilizando como base os resultados encontrados por Galante et al. (2022) para o c_{12} . Um aumento de 50% na biomassa utilizada e nos produtos gerados resultou em uma redução no valor de c_{20} para $1,232 \cdot 10^{-2}$ R\$/kJ. Além disso, ao considerar uma produção cinco vezes maior, o custo exergético diminuiu ainda mais, atingindo $5,706 \cdot 10^{-3}$ R\$/kJ.

Esses resultados são visualizados no gráfico apresentado na Figura 24, onde é possível observar a tendência de queda do custo exergético (c_{20}) à medida que a taxa de produção no PCV aumenta. No entanto, é importante notar que, embora um maior fluxo de massas na etapa de PCV tenha um impacto significativo na redução do custo exergético, existe um limite para essa redução. Como mostra o gráfico, o valor de c_{20} possui um limite inferior próximo de $3 \cdot 10^{-3}$ R\$/kJ que foi encontrado ajustando uma função $b + a/x$ nos dados obtidos e realizando o limite da taxa de produção indo para

infinito.

FIGURA 24 – Valores do Custo exergético da utilização de biomassa de microalgas como promotor de crescimento vegetal (c_{20}) com a variação de massas de entradas e saídas (mantendo as proporções) na etapa de PCV. Curva ajustada é uma função $b + a/x$. Limite inferior obtido avaliando o valor da função encontrado quando x tende ao infinito.



FONTE: Autor

Essa análise ressalta a importância da eficiência na utilização dos recursos na etapa do PCV para a redução do custo exergético da produção de biomassa de microalgas. No entanto, também destaca que, apesar do impacto positivo inicial, há um ponto de saturação onde os benefícios adicionais de aumentar a taxa de produção se tornam menos significativos em termos de redução de custos exergéticos.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho, dedicado à análise exérgica e exergoeconomia representou um esforço significativo para avaliar e compreender a eficiência de um sistema complexo em termos de uso de exergia e custos. As conclusões a seguir destacam os principais resultados e contribuições deste estudo.

Eficiência do Sistema: A análise exérgica revelou a eficiência exérgica do sistema em termos da conversão de energia de entrada em trabalho útil. Os resultados demonstraram que o incinerador, trocador de calor e o fotobiorreator são as etapas onde ocorre a maior destruição de energia útil (exergia) os tornando as etapas menos eficientes do processo.

Viabilidade Exergoeconômica: A análise exergoeconômica trouxe à tona os custos exérgicos do sistema. Os principais achados foram o valor do custo exérgico associado a produção de microalgas, produção de biomassa seca de microalgas e a utilização da biomassa seca como bioestimulante, que é de $5,245 \cdot 10^{-3}$, $8,440 \cdot 10^{-3}$, e $1,705 \cdot 10^{-1}$ $R\$/kJ$ respectivamente. A utilização de uma usina rankine ou a substituição do meio CHU por nutrientes mais baratos permitiram um custo mais baixo tornando também o sistema mais sustentável, e com a produção de coprodutos o valor pode se tornar mais competitivo.

Modelo: As equações desenvolvidas nesta análise proporcionaram a capacidade de calcular tanto a exergia quanto a exergoeconomia do sistema, permitindo a realização de análises detalhadas e uma maior facilidade para comparações futuras. Essa estrutura modelar oferece flexibilidade para incorporar possíveis mudanças e suporta investigações adicionais, tornando-a uma ferramenta valiosa para pesquisas subsequentes.

Funções Objetivo: A etapa de Promoção de Crescimento Vegetal demonstrou uma eficiência exérgica de mais de 100%, indicando um ganho energético com a utilização da biomassa seca de microalgas como promotor de crescimento vegetal. Por outro lado, o Incinerador se destacou como a etapa mais problemática, tanto pela exergia destruída quanto pelo alto custo de construção, operação, manutenção e combustível adicional devido à sua ineficiência. Portanto, sugere-se que sua utilização seja vinculada a uma usina Rankine e/ou a um subsídio para a destinação sustentável de resíduos sólidos municipais (RSM), visando mitigar seus impactos negativos e promover uma gestão mais eficiente dos recursos.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho permite reconhecer a importância de considerar as limitações inerentes a este estudo, que incluem simplificações em alguns aspectos do sistema, como as aproximações de temperaturas, trocas de calor e exergias relacionadas ao meio CHU e agente floculante, bem como a produção mais estável e sem perdas de eficiência ou contaminação. A utilização da biomassa como promotor de crescimento vegetal em escala laboratorial também apresenta um cenário mais controlado, sendo relevante para estudos preliminares.

Para aprimorar e expandir o conhecimento nessa área, é sugerido que futuras pesquisas explorem detalhadamente essas limitações. Recomenda-se o desenvolvimento de modelos mais sofisticados que aprofundem a modelagem matemática do sistema, considerando variabilidades mais realistas, como a variação da temperatura ao longo do dia e do ano. Além disso, investigações mais precisas sobre como as possíveis contaminações na produção de biomassa impactam na produção diária de microalgas podem fornecer insights valiosos.

Em estudos subsequentes, é aconselhável adotar uma abordagem voltada para aprimorar o sistema. Isso pode incluir a substituição do meio CHU por resíduos suínos ou outros dejetos de baixo custo, o acoplamento de uma usina Rankine para a recuperação de energia dos gases resultantes da incineração, a avaliação da coprodução de biodiesel ou outros produtos à base de biomassa, a experimentação com diferentes espécies de microalgas, a avaliação de diferentes modelos de aplicação de biomassa como promotor de crescimento vegetal ou biofertilizantes em termos de eficiência exergoeconômica, e a busca por estratégias para aprimorar a eficiência exérgica no incinerador, trocador de calor e fotobiorreator.

Essas iniciativas oferecem oportunidades valiosas para otimizar o desempenho do sistema, maximizando sua eficácia e sustentabilidade, ao mesmo tempo em que possibilitam a redução do custo exérgico.

REFERÊNCIAS

- ACIÉN, F.G. et al. 1 - Photobioreactors for the production of microalgae. In: GONZALEZ-FERNANDEZ, Cristina; MUÑOZ, Raúl (Ed.). **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2017. (Woodhead Publishing Series in Energy). P. 1–44. ISBN 978-0-08-101023-5. Citado 1 vez nas páginas 19, 21, 22.
- ALVAREZ, Adriana L. et al. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture. **Algal Research**, v. 54, p. 102200, 2021. ISSN 2211-9264. Citado 2 vezes nas páginas 17, 33.
- BARROS, Ana I. et al. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1489–1500, 2015. ISSN 1364-0321. Citado 1 vez na página 38.
- BEJAN, Adrian. **Advanced Engineering Thermodynamics**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 1948. Citado 7 vezes nas páginas 15, 34, 35, 37.
- BILANOVIC, Dragoljub et al. Microalgal CO₂ sequestering – Modeling microalgae production costs. **Energy Conversion and Management**, v. 58, p. 104–109, 2012. ISSN 0196-8904. Citado 3 vezes nas páginas 18, 24, 38.
- BISCHOFF, H. W.; BOLD, H. C. Phycological studies. IV. Some soil algae from Enchanted Rock and related algal species. **University of Texas Publications**, v. 6318, p. 1–95, 1963. Citado 1 vez nas páginas 23, 24.
- BOM, F. et al. Long-term fertilisation form, level and duration affect the diversity, structure and functioning of soil microbial communities in the field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 122, p. 91–103, 2018. Citado 1 vez na página 30.
- BOSCHIERO, B.N. et al. Nitrogen fertilizer effects on sugarcane growth, nutritional status, and productivity in tropical acid soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 117, p. 367–382, 2020. Citado 2 vez na página 30.
- CALVO, Pamela et al. Agricultural Uses of Plant Biostimulants. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1, p. 3–41, out. 2014. ISSN 1573-5036. Citado 2 vezes nas páginas 33, 34.
- CAVALCANTI, E.J.C. et al. Biodiesel Production from Microalgae: Exergy Analysis Using Specific Exergy Costing Approach. **Bioenerg. Res.**, 2023. Citado 1 vez na página 36.
- CHISTI, Yusuf. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007. ISSN 0734-9750. Citado 4 vezes nas páginas 15, 18, 21, 22.

CLIMATE CHANGE (IPCC), Intergovernmental Panel on. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: CLIMATE Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [S. l.]: Cambridge University Press, 2014. P. 465–570.

Citado 1 vez na página 14.

COHEN, Ephraim et al. A closed system for outdoor cultivation of microalgae. **Biomass and Bioenergy**, 1:2, p. 83–88, 1991. ISSN 0961-9534. Citado 2 vezes nas páginas 20, 21.

CORBELLINI, J.R. et al. Effect of microalgae *Messastrum gracile* and *Chlorella vulgaris* on the in vitro propagation of orchid *Cattleya labiata*. **J Appl Phycol**, v. 32, p. 4013–4027, 2020. Citado 1 vez na página 15.

DINCER, Ibrahim; ROSEN, Marc A. Exergy, environment, and sustainable development. In: EXERGY (Third Edition). [S. l.]: Elsevier, 2021. P. 61–89. ISBN 9780128243725. Citado 1 vez na página 35.

DRAAISMA, René B et al. Food commodities from microalgae. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 24, n. 2, p. 169–177, 2013. Food biotechnology • Plant biotechnology. ISSN 0958-1669. Citado 1 vez na página 38.

DU JARDIN, Patrick. Plant biostimulants: Definition, concept, main categories and regulation. **Scientia Horticulturae**, v. 196, p. 3–14, 2015. Biostimulants in Horticulture. ISSN 0304-4238. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34.

DUBIS, B. et al. Effect of different nitrogen fertilizer treatments on the conversion of *Miscanthus × giganteus* to ethanol. **Bioresource Technology**, 2017. Citado 2 vez na página 30.

EBADOLLAHI, Mohammad et al. Flexibility concept in design of advanced multi-energy carrier systems driven by biogas fuel for sustainable development. **Sustainable Cities and Society**, v. 86, p. 104121, 2022. Citado 1 vez na página 38.

ENAMALA, Manoj Kumar 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. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23.

ERISMAN, J.W. et al. How a Century of Ammonia Synthesis Changed the World. **Nature Geoscience**, v. 1, p. 636–639, 2008. Citado 1 vez na página 29.

ESJ, Thoré et al. Microalgae. **Curr Biol**, v. 33, n. 3, r91–r95, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 17, 21.

FALKOWSKI, P. G.; RAVEN, J. A. **Aquatic Photosynthesis**. 1st. [S. l.]: Blackwell Science, 1997. Citado 1 vez na página 19.

- GALANTE, Renan M. et al. Exergoeconomic analysis of a municipal solid waste fired power plant with biological filters for emissions. **International Journal of Development Research**, v. 12, p. 24579, 2022. Research Article, 11 pages. DOI: 10.37118/ijdr.24579.05.2022. Citado 5 vezes nas páginas 40, 61, 62, 67.
- GUILLARD, R. R. L. **Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates**. Edição: W. L. SMITH e M. H. CHANLEY. [S. l.]: Plenum, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 19, 23.
- HABER, Fritz. **The Synthesis of Ammonia from Its Elements**. Nobel Lecture, June 2, 1920. 1920. Citado 2 vez na página 29.
- HAMPTON, J. G. et al. Effects of elevated CO₂ and temperature on seed quality. **The Journal of Agricultural Science**, v. 151, n. 2, p. 154–162, 2013. Citado 1 vez na página 14.
- IFOAM. **Organic in Europe**. 2020. Disponível em: <<https://www.organicseurope.bio/about-us/vision/>>. Citado 1 vez na página 28.
- IPCC. **Climate change 2013. The physical science basis. Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing**. [S. l.: s. n.], 2013. Citado 1 vez na página 30.
- JACINAVICIUS, Francisco Roberto et al. **Manual para Cultivos de Cianobactérias**. [S. l.], 2006. P. 32. Citado 1 vez na página 23.
- JERNEY, J.; SPILLING, K. Large Scale Cultivation of Microalgae: Open and Closed Systems. In: **METHODS in Molecular Biology**. [S. l.: s. n.], 2018. Citado 1 vez na página 25.
- JORQUERA, Orlando 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. Citado 1 vez na página 15.
- KANTER, D.R. Nitrogen pollution: a key building block for addressing climate change. **Climatic Change**, v. 147, p. 11–21, 2018. Citado 2 vez na página 30.
- KIISKI, Harri et al. Fertilizers, 1. General. In: **ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry**. [S. l.]: John Wiley & Sons, Ltd, 2016. P. 1–30. ISBN 9783527306732. Citado 7 vezes nas páginas 17, 27, 28, 31.
- KUSMAYADI, Adi et al. Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. **Chemosphere**, v. 271, p. 129800, 2021. ISSN 0045-6535. Citado 2 vez na página 18.
- LANG, T. I. M. Sustainable Diets: Hairshirts or a Better Food Future? **Development (Society for International Development)**, v. 57, n. 2, p. 240–256, 2014. Citado 1 vez na página 14.

- LAUKKANEN, Timo P. et al. Primary exergy efficiency—Effect of system efficiency environment to benefits of exergy savings. **Energy and Buildings**, v. 124, p. 248–254, 2016. ISSN 0378-7788. Citado 1 vez na página 35.
- LI, Xinyue et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer over seven years increases yields and restores soil bacterial community diversity in wheat–rice rotation. **European Journal of Agronomy**, v. 133, p. 126445, 2022. Citado 1 vez na página 32.
- LIU, Bin et al. Combined applications of organic and synthetic nitrogen fertilizers for improving crop yield and reducing reactive nitrogen losses from China's vegetable systems: A meta-analysis. **Environmental Pollution**, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 32, 33.
- LUANGPIPAT, Tiyaorn; CHISTI, Yusuf. Biomass and oil production by *Chlorella vulgaris* and four other microalgae — Effects of salinity and other factors. **Journal of Biotechnology**, v. 257, p. 47–57, 2017. Dedicated to Prof. Dr. Alfred Pühler on the occasion of his 75th birthday. ISSN 0168-1656. Citado 1 vez na página 18.
- MALIK, S.S.; CHAUHAN, R.C. Impact of organic farming in enhancing the soil microbial pool. In: **CLIMATE Change and Biodiversity: Advances in Geographical and Environmental Sciences**. [S. l.: s. n.], 2014. P. 183–196. Citado 1 vez na página 30.
- MAZEPA, Ester et al. Plant growth biostimulant activity of the green microalga *Desmodesmus subspicatus*. **Algal Research**, v. 59, p. 102434, 2021. Citado 1 vez na página 15.
- MEDEIROS, Diego Lima et al. Energy production from microalgae biomass: carbon footprint and energy balance. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 493–500, 2015. Integrating Cleaner Production into Sustainability Strategies. ISSN 0959-6526. Citado 1 vez na página 36.
- MEYER, William B.; TURNER, Billie L. Human population growth and global land-use/cover change. **Annual Review of Ecology and Systematics**, p. 39–61, 1992. Citado 1 vez na página 14.
- MIYAWAKI, B. et al. Microalgae derived biomass and bioenergy production enhancement through biogas purification and wastewater treatment. **Renewable Energy**, v. 163, p. 1153–1165, 2021. ISSN 0960-1481. Citado 1 vez na página 24.
- MORAN, Michael J. et al. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 8th. [S. l.]: Wiley, 2014. Citado 5 vezes nas páginas 15, 34, 35.
- MYERS, Samuel S. et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition. **Nature**, v. 510, n. 7503, p. 139–142, 2014. Citado 1 vez na página 14.

NADIM, M. A. et al. Integration of organic, synthetic fertilizers and micronutrients for higher growth and yield of wheat. **Sarhad Journal of Agriculture**, v. 32, n. 1, p. 9–16, 2016. Citado 1 vez na página 30.

NAGARAJAN, Dillirani et al. Recent insights into biohydrogen production by microalgae – From biophotolysis to dark fermentation. **Bioresource Technology**, v. 227, p. 373–387, 2017. ISSN 0960-8524. Citado 1 vez na página 19.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, NREL. **2000 ASTM Standard Extraterrestrial Spectrum Reference E-490-00**. [S. l.: s. n.], 2023.

<https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-astm-e490.html>. Citado 0 vez na página 60.

NAVARRO, Quezia Rocha et al. Efficient use of biomass and extract of the microalga *Desmodesmus subspicatus* (Scenedesmaceae) in asymbiotic seed germination and seedling development of the orchid *Cattleya warneri*. **Journal of Applied Phycology**, v. 33, n. 4, p. 2189–2207, 2021. Citado 1 vez na página 15.

NOAA. **Earth System Research Laboratory Website**. Acessado em dezembro de 2022. 2020. Disponível em:

<<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/weekly.html>>. Citado 1 vez na página 14.

NPDEAS. **NPDEAS Blog**. 2024. Disponível em: <<https://npdeas.blogspot.com/>>. Citado 2 vezes nas páginas 25–27.

ORDONEZ, J.C. **Integrative Energy-Systems Design: System Structure from Thermodynamic Optimization**. 2003. Tese (Doutorado) – Duke University. Citado 1 vez na página 16.

OSAT, Mohammad et al. A solar-biomass system associated with CO₂ capture, power generation and waste heat recovery for syngas production from rice straw and microalgae: Technological, energy, exergy, exergoeconomic and environmental assessments. **Applied Energy**, v. 340, p. 120999, 2023. ISSN 0306-2619. Citado 1 vez na página 39.

PERALTA et al. Exergy Analysis for third Generation Biofuel Production from Microalgae Biomass. **Chemical Engineering Transactions**, v. 21, p. 1363–1368, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 35, 36.

PERALTA-RUIZ, Y. et al. Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. **Applied Energy**, v. 101, p. 226–236, 2013. Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. ISSN 0306-2619. Citado 1 vez na página 36.

PRAHL, Scott. **PhotochemCAD Spectra**. [S. l.: s. n.], 2023.

<https://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/html/122.html>. Citado 0 vez na página 60.

QIAO, C. et al. Synthetic nitrogen fertilizers alter the soil chemistry, production and quality of tea. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 10, 2018. Citado 1 vez na página 30.

RASK, Kolleen J.; RASK, Norman. Economic development and food production–consumption balance: a growing global challenge. **Food Policy**, v. 36, n. 2, p. 186–196, 2011. Citado 1 vez na página 14.

RAZZAK, Shaikh A. et al. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing—A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 622–653, 2013. ISSN 1364-0321. Citado 4 vezes nas páginas 22, 23.

RETALLACK, Gregory J.; CONDE, Giselle D. Deep Time Perspective on Rising Atmospheric CO₂. **Global and Planetary Change**, v. 189, p. 103177, 2020. Citado 1 vez na página 14.

RICHMOND, A. **Handbook of Microalgal Culture**. Oxford: Blackwell Publishing, 2004. (Biotechnology and Applied Phycology). Citado 2 vezes nas páginas 18, 19.

RONGA, Domenico et al. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. **Agronomy**, v. 9, n. 4, p. 192, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 15, 31–34, 49.

RUSSEL, D.A.; WILLIAMS, G.G. History of Chemical Fertilizer Development. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 260–265, 1977. Citado 2 vez na página 29.

SANLI, Bengi Gozmen; OTHERSZ. Assessment of thermodynamic Performance of an IC engine using microalgae biodiesel at various ambient temperatures. **Fuel**, v. 277, p. 118108, 2020. ISSN 0016-2361. Citado 1 vez na página 39.

SAPKOTA, Tek B. et al. Identifying optimum rates of fertilizer nitrogen application to maximize economic return and minimize nitrous oxide emission from rice–wheat systems in the Indo-Gangetic Plains of India. **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2020. Citado 1 vez na página 30.

SAVCI, Serpil. An agricultural pollutant: chemical fertilizer. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 3, n. 1, p. 73, 2012. Citado 1 vez na página 14.

SCAGLIA, Barbara et al. The Anaerobic Digestion Process Capability to Produce Biostimulant: The Case Study of the Dissolved Organic Matter (DOM) vs. Auxin-Like Property. **Sci Total Environ**, v. 589, p. 36–45, jul. 2017. Citado 1 vez na página 33.

- SCHNEIDER, Uwe A. et al. Impacts of population growth, economic development, and technical change on global food production and consumption. **Agricultural Systems**, v. 104, n. 2, p. 204–215, 2011. Citado 1 vez na página 14.
- SCOPUS. **Data Base**. [S. l.: s. n.], 2023. <https://www.scopus.com/home.uri>. Citado 1 vez nas páginas 19, 20, 31, 37–39.
- SEUFERT, V. et al. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. **Nature**, v. 485, p. 229–232, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 32, 33.
- SHARMA, Ameeta. A Review on the Effect of Organic and Chemical Fertilizers on Plants. **International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology**, v. 6, p. 677–680, 2017. Citado 1 vez na página 28.
- SINGH, G. et al. Development and Applications of Attached Growth System for Microalgae Biomass Production. **Bioenerg. Res.**, v. 14, p. 709–722, 2021. Citado 6 vezes nas páginas 22–24.
- SLEGGERS, P.M. et al. Scenario evaluation of open pond microalgae production. **Algal Research**, 2:4, p. 358–368, 2013. ISSN 2211-9264. Citado 1 vez na página 20.
- STEWART, W. et al. The Contribution of Commercial Fertilizer Nutrients to Food Production. **Agronomy Journal**, v. 97, 2005. Citado 1 vez na página 30.
- SUCHITHRA, M.R. et al. Effectiveness of green microalgae as biostimulants and biofertilizer through foliar spray and soil drench method for tomato cultivation. **South African Journal of Botany**, v. 146, p. 740–750, 2022. ISSN 0254-6299. Citado 1 vez na página 34.
- SUGAI, Daniela Y. et al. Sustainable Biodiesel Production From Blends of Waste Cooking Oil and Microalgae Oil. ASME 2019 13th International Conference on Energy Sustainability, v001t11a005, jul. 2019. Citado 1 vez na página 40.
- SUN, M.-J. et al. Changes in Foxtail Millet (*Setaria italica* L.) Yield, Quality, and Soil Microbiome after Replacing Chemical Nitrogen Fertilizers with Organic Fertilizers. **Sustainability**, v. 14, p. 16412, 2022. Citado 1 vez na página 33.
- SWIETLIK, D. Causes and Consequences of Overfertilization in Orchards. **HortTechnology**, v. 2, p. 112–132, 1992. Citado 1 vez na página 30.
- TAN, Jia Sen et al. A review on microalgae cultivation and harvesting, and their biomass extraction processing using ionic liquids. **Bioengineered**, 11:1, p. 116–129, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 20, 21, 24, 25.
- VARGAS, J. et al. Power Extraction from a Hot Stream in the Presence of Phase Change. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 43, n. 2, p. 191–201, 2000. Citado 1 vez na página 16.

VO, H.N.P. et al. A Critical Review on Designs and Applications of Microalgae-Based Photobioreactors for Pollutants Treatment. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1549–1568, 2019. Citado 1 vez na página 15.

WANG, Bei et al. Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. **Biotechnology Advances**, 30:4, p. 904–912, 2012. ISSN 0734-9750. Citado 7 vezes nas páginas 22–24.

WORLDBANK. **Data**. [S. l.: s. n.], 2023. <https://www.worldbank.org/en/home>. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28.

ZHANG, Z.; CAI, J. Energy Issues in Carbon Capture. In: INTERNATIONAL Journal of Energy Clean Environment. [S. l.: s. n.], 2018. v. 19. Citado 1 vez na página 15.