

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ARTHUR CORRADO SALOMÃO

INFLUÊNCIA DA LUZ NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA  
BIOCOMBUSTÍVEIS: MODELAGEM CINÉTICA E ANÁLISE DA LITERATURA

SÃO CARLOS - SP

2025

ARTHUR CORRADO SALOMÃO

INFLUÊNCIA DA LUZ NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA  
BIOCOMBUSTÍVEIS: MODELAGEM CINÉTICA E ANÁLISE DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Química.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Luperni  
Horta

SÃO CARLOS - SP

2025

ARTHUR CORRADO SALOMÃO

INFLUÊNCIA DA LUZ NA PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE MICROALGAS PARA  
BIOCOMBUSTÍVEIS: MODELAGEM CINÉTICA E ANÁLISE DA LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Química.

Trabalho de graduação apresentado no dia \_\_\_\_\_ perante a  
banca examinadora:

---

Antonio Carlos Luperni Horta – Doutor (UFSCar)

---

Fabio Bentes Freire – Doutor (UFSCar)

---

João Pedro Gaudencio Ribeiro dos Santos – Graduado (UFSCar)

Dedico este trabalho aos meus pais  
por todo o amor, suporte e  
incentivo.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, Edison Salomão e Rosangela Corrado, por sempre me apoiarem e acreditarem em mim, oferecendo conselhos sábios e suporte emocional incondicional, fazendo com que, mesmo à distância, eu sempre me sentisse em casa.

À minha irmã, Renata Salomão, sou grato pelas palavras de motivação, pelo apoio constante, independentemente das circunstâncias.

À minha namorada, Giulia Ursi, agradeço o amor incondicional, carinho e apoio emocional em todos os momentos, especialmente nos períodos mais desafiadores desta jornada.

Aos amigos que fiz ao longo da minha trajetória em São Carlos, com um carinho especial para André Gobbato, Gabriel Friozi, João Pedro Gaudencio e Victor Elias; à 'Diretoria' – Lucas Ravagnani, Pedro Toledo, Victor Mazutti e Vinicius Doimo –; e aos meus amigos de Londrina que estiveram comigo nessa jornada, Guilherme Tanaka e Vitor Kitamura, que tornaram esse percurso mais leve e divertido, seja enfrentando desafios juntos ou compartilhando momentos de descontração.

Ao meu orientador, Professor Doutor Antonio Carlos Luperni Horta, expresso minha sincera gratidão pela disponibilidade, compreensão e generosidade ao me guiar durante mais de dois anos de desenvolvimento do trabalho. Também sou grato aos meus demais professores, em especial ao Professor Doutor Fábio Bentes Freire, pela parceria e pelos valiosos ensinamentos que ultrapassaram o ambiente acadêmico.

Por fim, sou grato à Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade, pois sem ela nada disso teria sido possível. Foi nesse ambiente que vivi experiências transformadoras e conheci pessoas que marcaram e continuarão marcando minha vida.

*“Uma pessoa que nunca cometeu  
um erro, nunca tentou algo novo”  
Albert Einstein*

## RESUMO

Com o crescimento populacional e tecnológico, aumentou-se significativamente a demanda por energia nos últimos anos. Nesse contexto, os biocombustíveis de terceira geração, obtidos a partir de biomassa de microrganismos, surgem como uma alternativa sustentável. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar como diferentes condições de iluminação, incluindo intensidade e espectro luminoso, influenciam a taxa de crescimento e a biossíntese de compostos bioquímicos de interesse em microalgas, com ênfase na produção de biocombustíveis, como biodiesel e SAF. Para isso, foi modelado matematicamente e avaliado o efeito da luz no crescimento de microalgas, sendo escolhida a espécie *Scenedesmus obliquus*, além de se realizar uma análise da literatura. Os resultados indicaram que o modelo matemático desenvolvido apresentou boa capacidade preditiva em relação à intensidade de luz, à concentração celular e à concentração de produto, visto que tanto os valores simulados quanto o comportamento mantiveram-se próximos dos dados experimentais. A análise da literatura revelou uma diversidade nas condições ótimas de iluminação, principalmente em relação à intensidade luminosa, evidenciando que tais condições podem variar de acordo com a espécie cultivada, as condições de cultivo e os objetivos do processo produtivo, que determinam os metabólitos de interesse. Para a literatura analisada, verifica-se uma predominância da luz azul e vermelha, isoladamente ou em combinação, como os espectros mais eficientes para o crescimento das microalgas e a produção de biomassa. Ao comparar os resultados experimentais com os dados da literatura, observa-se uma concordância na relevância da luz azul para o crescimento das microalgas. No entanto, experimentalmente, verificou-se que a luz vermelha teve menor impacto. Essa discrepância pode estar relacionada a diferenças nas condições de cultivo, na espécie de microalga utilizada ou a limitações da modelagem aplicada.

**Palavras-chave:** Combustíveis Renováveis; Biocombustíveis; Biodiesel; Microalgas; Intensidade de Luz; RGB; Modelagem.

## ABSTRACT

With population and technological growth, the demand for energy has increased significantly in recent years. In this context, third-generation biofuels, obtained from microorganism biomass, have emerged as a sustainable alternative. Thus, the present study aimed to evaluate how different lighting conditions, including light intensity and spectrum, influence the growth rate and biosynthesis of biochemical compounds of interest in microalgae, with an emphasis on the production of biofuels, such as biodiesel and SAF. For this purpose, the effect of light on the growth of microalgae was mathematically modeled and evaluated, choosing the species *Scenedesmus obliquus*, in addition to performing a literature analysis. The results indicated that the mathematical model developed presented good predictive capacity in relation to light intensity, cell concentration and product concentration, since both the simulated values and the behavior remained close to the experimental data. The literature analysis revealed a diversity in the optimal lighting conditions, mainly in relation to light intensity, evidencing that such conditions can vary according to the cultivated species, the cultivation conditions and the objectives of the production process, which determine the metabolites of interest. The literature analyzed shows a predominance of blue and red light, alone or in combination, as the most efficient spectra for microalgae growth and biomass production. When comparing the experimental results with the literature data, there is agreement on the relevance of blue light for microalgae growth. However, experimentally, it was found that red light had a lesser impact. This discrepancy may be related to differences in cultivation conditions, in the species of microalgae used, or to limitations of the modeling applied.

**Keywords:** Renewable Fuels; Biofuels; Biodiesel; Microalgae; Light Intensity; RGB; Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Reação de transesterificação para a produção de biodiesel.....	19
Figura 2 -	Evolução da produção anual brasileira de biodiesel de 2019 a 2023.	20
Figura 3 -	Produção em m <sup>3</sup> de biodiesel por região no Brasil.....	20
Figura 4 -	Matérias primas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil...	21
Figura 5 -	Aparato experimental do cultivo.....	49
Figura 6 -	Cultivo em biorreator durante o período claro.....	53
Figura 7 -	Densidades ópticas obtidas para o cultivo.....	56
Figura 8 -	Resultado da simulação do modelo para concentração celular em função do tempo.....	58
Figura 9 -	Resultado da simulação do modelo para concentração de produto em função do tempo.....	58
Figura 10 -	Resultado da simulação do modelo para intensidade média de luz vermelha, verde e azul em função do tempo.....	59
Figura 11 -	Dados considerados do cultivo para a realização do ajuste.....	60
Figura 12 -	Simulação com parâmetros ajustados pelo Simulated Annealing e dados experimentais da concentração celular x tempo.....	62
Figura 13 -	Simulação com parâmetros ajustados pelo Simulated Annealing e dados experimentais da concentração de produto x tempo.....	62
Figura 14 -	Dados de covariância entre os parâmetros obtidos.....	63
Figura 15 -	Dados de correlação entre os parâmetros encontrados.....	63
Figura 16 -	Dados de desvio padrão obtidos para cada parâmetro.....	64
Figura 17 -	Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chave, entre 1960 e 2024.....	65
Figura 18 -	Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chave, entre 2004 e 2024.....	65
Figura 19 -	Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chave, entre 2005 e 2024.....	64
Figura 20 -	Quantidade de publicações por país com a palavra-chave “Microalgae” .....	67
Figura 21 -	Quantidade de publicações por país com as palavras-chave “Microalgae” e “Light” .....	68

Figura 22 - Quantidade de publicações por país com as palavras-chave “Microalgae” e “Biofuel” .....	69
Figura 23 - Quantidade de publicações por país com as palavras-chave “Microalgae” e “Biodiesel” .....	69
Figura 24 - Quantidade de publicações por país com as palavras-chave “Microalgae” e “SAF” .....	70
Figura 25 - Quantidade de publicações por área de pesquisa com a palavra-chave “Microalgae” .....	71
Figura 26 - Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “Light” .....	71
Figura 27 - Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “Biofuel” .....	72
Figura 28 - Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “Biodiesel” .....	73
Figura 29 - Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “SAF” .....	74

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Perfil de luz descrito por Lambert-Beer.....	30
Equação 2 - Modelo cinético de Steele.....	47
Equação 3 - Modelo cinético de Steele adaptado com três termos (R, G e B) .....	47
Equação 4 - Simplificação adotada no perfil de luz ao longo do comprimento do reator.....	48
Equação 5 - Perfil de luz de Lambert-Beer simplificado.....	48
Equação 6 - Modelo cinético final, considerando as adaptações.....	48
Equação 7 - Equação diferencial da concentração celular em função do tempo.....	48
Equação 8 - Equação diferencial da produção de produto em função do tempo.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação das eficiências de produção e aproveitamento de área para diferentes matérias primas na produção de biodiesel.....	22
Tabela 2 – Principais rotas e matérias primas para a produção de SAF.....	25
Tabela 3 – Conteúdo de óleo em massa por espécie.....	28
Tabela 4 – Cultivos de microalgas sob diferentes condições de iluminação presentes na literatura.....	33
Tabela 5 – Identificação das melhores intensidades de luz em cultivos de diferentes espécies de microalgas.....	43
Tabela 6 – Nutrientes do meio de cultivo utilizado (BG-11 modificado) .....	50
Tabela 7 – Compostos da solução Traço de Metais utilizada.....	51
Tabela 8 – Parâmetros encontrados pelo ajuste.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i>
IATA	<i>International Air Transport Association</i>
CORSIA	<i>Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation</i>
ATAG	<i>Air Transport Action Group</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
SAF	<i>Sustainable Aviation Fuel</i> (Combustível Sustentável para Aviação)
FBR	Fotobiorreator
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
RGB	<i>Red, Green, Blue</i> (Vermelho, Verde, Azul)
IFA	Irradiância Fotossinteticamente Ativa
FT-SPK	<i>Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene</i>
HEFA-SPK	<i>Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene</i>
ATJ-SPK	<i>Alcohol-to-Jet Synthetic Paraffinic Kerosene</i>
CHJ	<i>Catalytic Hydrothermolysis Jet</i>
DSHC	<i>Direct Sugar to Hydrocarbon</i>
HFS-SIP	<i>Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Iso-Paraffins</i>
HC-HEFA-SPK	<i>Hydrocarbon HEFA Synthetic Paraffinic Kerosene</i>

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
2.1.	Biocombustíveis .....	17
2.1.1.	Biodiesel.....	18
2.1.2.	<i>Sustainable Aviation Fuel</i> (SAF).....	23
2.2.	Microalgas .....	27
2.3.	Luz.....	29
2.3.1.	Fontes de Luz .....	30
2.4.	Efeitos da luz nas microalgas .....	32
2.4.1.	Intensidade de Luz.....	41
2.4.2.	Comprimentos de onda.....	43
3.	METODOLOGIA.....	46
3.1.	Experimental.....	46
3.1.1.	Modelagem Cinética a Partir da Intensidade de Luz.....	46
3.1.2.	Perfil de Luz - Modelo de Lambert-Beer .....	47
3.1.3.	Aparato Experimental.....	48
3.1.4.	Meio de Cultura .....	50
3.1.5.	Procedimento Experimental .....	51
3.1.6.	Simulação .....	53
3.1.7.	Ajuste dos Parâmetros – <i>Simulated Annealing</i> .....	53
3.2.	Análise da Literatura .....	54
4.	RESULTADOS .....	56
4.1.	Experimentais .....	56
4.1.1.	Densidade Óptica do Cultivo.....	56
4.1.2.	Simulação do modelo .....	57
4.1.3.	Ajuste dos Parâmetros .....	59

4.1.4.	Medidas estatísticas dos parâmetros.....	63
4.2.	Análise da Literatura .....	64
4.2.1.	Publicações por Ano .....	64
4.2.2.	Publicações por Países.....	67
4.2.3.	Publicações por Áreas de Pesquisa.....	70
5.	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS .....	75
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	77

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento populacional das últimas décadas, atrelado ao desenvolvimento exponencial da tecnologia, houve um importante aumento da demanda energética no cenário global. Para suprir essa demanda, cada vez mais, os combustíveis fósseis são usados descomedidamente, gerando diversos problemas ambientais e econômicos, como aquecimento global, grande emissão de CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> e aerossóis à atmosfera, instabilidade do preço dos barris de petróleo (MATA, 2010), entre outros.

Dessa forma, torna-se imprescindível a busca por fontes de energia que sejam renováveis e menos agressivas ao meio ambiente como os biocombustíveis para que, gradualmente, os combustíveis fósseis sejam menos utilizados, gerando uma maior segurança energética (TOMEI, 2015). Biocombustíveis são os combustíveis produzidos direta ou indiretamente de fontes de biomassa e, mais especificamente os biocombustíveis de terceira geração (3G), utilizam microrganismos para a produção da biomassa (SALADINI, 2016). Assim, os micróbios fotossintéticos como microalgas e cianobactérias vêm ganhando relevância no tema nos últimos anos (ANANTHI, 2021).

A produtividade e a qualidade dos biocombustíveis de 3G variam drasticamente com a composição dos ácidos graxos da matéria-prima; sucesso da cultura; eficiência de colheita, processamento e extração de lipídios; cor da luz ou comprimentos de ondas a qual a cultura é submetida e controle da irradiância fotossinteticamente ativa (IFA) (DE ALMEIDA, 2021). Portanto, é de grande relevância estudar as condições mais apropriadas para uma maior produtividade e qualidade na produção dos biocombustíveis.

No projeto em questão, foi analisado o impacto da iluminação e suas diferentes condições (intensidades e comprimentos de ondas) no crescimento de microalgas e na produção de compostos biológicos, tais como proteínas, carboidratos e lipídeos, com foco em uma futura potencial otimização das condições de produção de biocombustíveis, em especial biodiesel e *Sustainable Aviation Fuel* (SAF).

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Biocombustíveis**

A crise do petróleo, combinada ao aumento da demanda por combustíveis e à crescente preocupação ambiental, tem impulsionado a busca por fontes alternativas de energia em escala global. Nesse contexto, os biocombustíveis têm se destacado como uma solução promissora, visto que utiliza a biomassa para a sua produção, matéria prima de ampla disponibilidade, biodegradabilidade e baixo custo (SUAREZ, 2009).

Entretanto, a utilização da biomassa para a produção de biocombustíveis não está isenta de desafios, destacando-se o conflito entre segurança alimentar e energética. Enquanto alguns países, como Brasil e Estados Unidos, incentivam a produção de biocombustíveis de primeira geração, como álcool e biodiesel, outros expressam preocupações com o impacto no suprimento global de alimentos. O deslocamento de áreas tradicionalmente dedicadas à produção de alimentos para a indústria de biocombustíveis agravaria a crise alimentar mundial (INSPER, 2023).

O Brasil se destaca como um exemplo de como é possível conciliar a produção de biocombustíveis com a segurança alimentar. Com vasta extensão territorial, o país possui áreas estratégicas que podem ser utilizadas para o cultivo de cana-de-açúcar e palmáceas oleaginosas, sem comprometer a produção de alimentos. Ademais, o Brasil detém tecnologia altamente eficiente para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. Dados do IBGE indicam que, em 2008, o complexo da cana-de-açúcar ocupou apenas 13,35% da área agrícola brasileira (IBGE, 2009), sendo suficiente para atender à demanda interna de açúcar, exportações e à crescente demanda por etanol combustível.

Além das conquistas já alcançadas, o cenário dos biocombustíveis continua a evoluir. Inovações tecnológicas, como biocombustíveis de segunda e terceira gerações, prometem explorar novas matérias-primas e aumentar a eficiência na produção. Desafios persistem, como a competitividade de preços em relação aos combustíveis fósseis, mas as oportunidades de contribuir para uma matriz energética mais sustentável são notáveis (Hedgepoint Global Markets, 2023).

No contexto global, diferentes regiões adotam estratégias específicas para a produção e uso de biocombustíveis, refletindo as características e recursos de cada local. A busca por soluções equilibradas e sustentáveis continua a ser essencial na construção de um futuro energético mais resiliente e ambientalmente responsável.

Dentre os biocombustíveis mais promissores, destaca-se o biodiesel, uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, produzido pela reação de um óleo ou gordura com um álcool, na presença de um catalisador (FRANCO, 2013) e o combustível sustentável de aviação, conhecido como SAF (*Sustainable Aviation Fuel*).

### **2.1.1. Biodiesel**

O biodiesel, um combustível obtido exclusivamente de fontes renováveis, destaca-se por suas propriedades biodegradáveis e por apresentar uma alternativa mais alinhada à sustentabilidade em comparação ao diesel convencional. Sua produção pode ser realizada a partir de uma ampla variedade de matérias-primas, o que demonstra sua versatilidade. Os processos industriais envolvidos incluem principalmente a transesterificação, considerada o mais comum, além de alternativas como a esterificação e o craqueamento, cada um direcionado para fontes específicas de insumos (SILVA, 2008).

A flexibilidade operacional do biodiesel é outra característica de destaque. Ele pode ser utilizado diretamente em motores — neste caso, denominado B100 — ou integrado em misturas com diesel de petróleo, formando combustíveis de diferentes proporções. Essas misturas são identificadas pela porcentagem de biodiesel presente, como B2, contendo 2%, ou B20, com 20%. Em aplicações específicas que buscam minimizar emissões de poluentes, o uso do biodiesel puro (B100) tem ganhado relevância, porém, o uso do B100 pode apresentar desafios como a compatibilidade limitada com motores mais antigos, maior suscetibilidade à oxidação, desempenho reduzido em baixas temperaturas, menor densidade energética e custos de produção elevados (MONYEM, 1998).

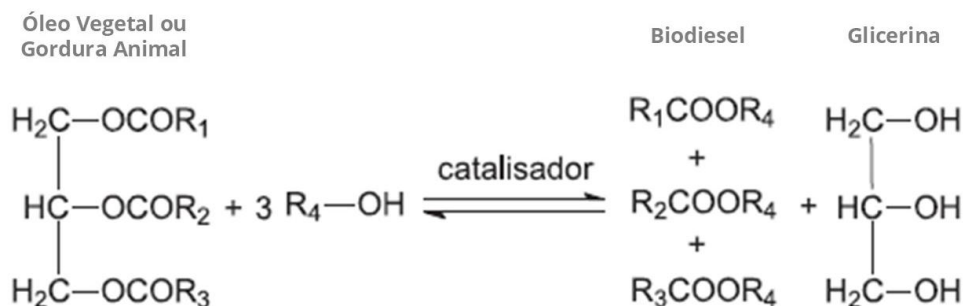
O emprego de tais misturas não apenas amplia a participação de fontes renováveis na matriz energética, mas também reduz a dependência de combustíveis fósseis. Essa transição oferece benefícios tangíveis em termos ambientais, como a diminuição de emissões de gases de efeito estufa, e, também, incentiva ganhos econômicos ao promover cadeias produtivas locais. Em virtude dessas vantagens, o biodiesel tem sido amplamente incorporado em políticas globais de sustentabilidade e transição energética (SILVA, 2008).

#### **2.1.1.1. Produção**

A produção de biodiesel no Brasil representa um cenário dinâmico e promissor, impulsionado pela busca por fontes de energia mais sustentáveis e pela crescente demanda por

biocombustíveis. A fabricação industrial do biodiesel é proporcionada pela reação de transesterificação, ilustrada pela Figura 1.

**Figura 1.** Reação de transesterificação para a produção de biodiesel.



Fonte: Adaptado de ANTUNES *et al.*, 2011.

A transesterificação é um processo químico fundamental, envolvendo a interação de um álcool de cadeia curta, como metanol ou etanol, com óleo vegetal ou gordura animal. Este processo ocorre em uma única etapa, promovido pelo uso de catalisadores. A escala de produção industrial desempenha um papel crucial na definição do modo de processo utilizado.

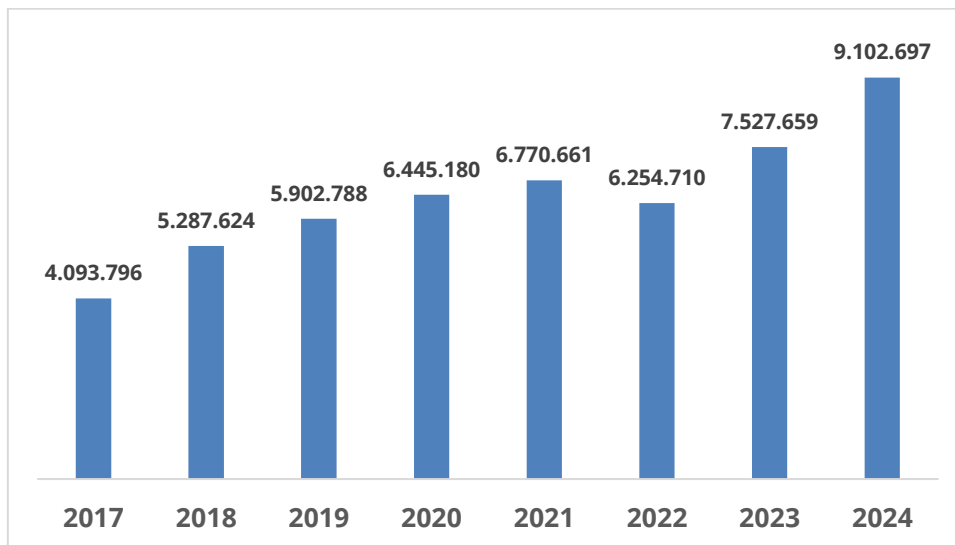
No estudo de reações e reatores químicos, observa-se que o aumento da temperatura é favorável para aumentar a conversão do processo. No caso específico da transesterificação, a faixa de operação ótima, entre 60 e 70°C (THOMAS, 2017), está relacionada à proximidade com os pontos de ebulição dos álcoois utilizados como reagentes (78,3°C para o etanol e 64,5°C para o metanol) (CETESB). A elevação da temperatura intensifica o grau de agitação das moléculas, promovendo um maior choque entre elas e, conseqüentemente, uma conversão mais eficiente.

Entretanto, é crucial notar que o aumento da temperatura não é eficaz quando o álcool se encontra em estado gasoso, resultando na perda do reagente em fase líquida. Diante desse desafio, a pesquisa em tecnologias capazes de otimizar a conversão da reação por meio do controle preciso da temperatura torna-se uma área valiosa de exploração, com a introdução de sistemas de aferição e controle específicos para esse processo produtivo. Essas inovações contribuirão para a eficiência e sustentabilidade contínuas da produção de biodiesel no Brasil e no âmbito global.

Em relação às quantidades de produção no contexto brasileiro, em 2024 foram produzidos 9.102.697 m<sup>3</sup> de biodiesel, aumento percentual de 20,9% em relação ao ano anterior,

20233 (ANP, 2024). A evolução da produção anual pode ser observada na Figura 2 de 2017 a 2024.

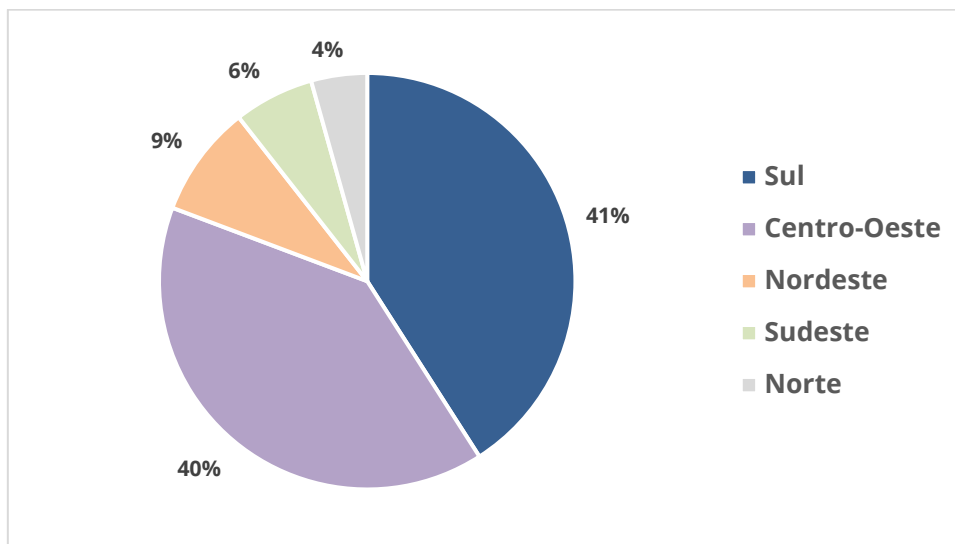
**Figura 2.** Evolução da produção anual brasileira de biodiesel de 2017 a 2024.



Fonte: Adaptado de ANP, 2024.

Ademais, destacam-se as regiões Sul e Centro-Oeste, conforme ilustrado na Figura 3, como as regiões com maior produção nacional. Entretanto, os maiores consumidores são as regiões Sudeste e Sul, respectivamente (ANP, 2024).

**Figura 3.** Representatividade da produção de biodiesel por região no Brasil em 2024.

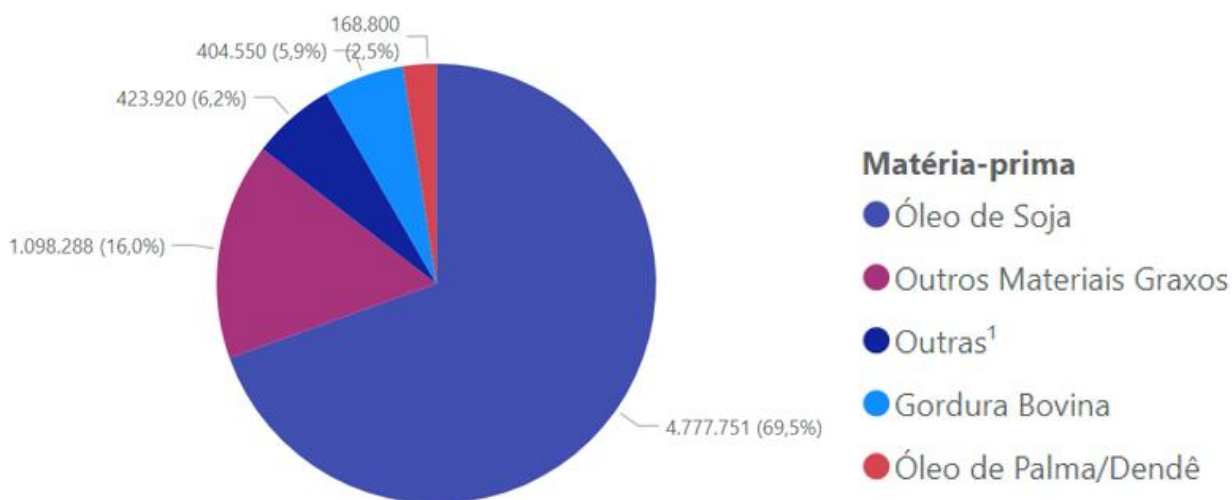


Fonte: Adaptado de ANP, 2024.

### 2.1.1.2. Matérias-Primas

O biodiesel, produzido pela reação de transesterificação, pode utilizar diferentes fontes oleaginosas, sejam vegetais ou animais, sendo as vegetais mais presentes nas produções em grande escala, com destaque para a matéria prima mais utilizada (69,5% da produção total em 2023) que é a soja, conforme ilustrado na Figura 4.

**Figura 4.** Matérias primas utilizadas para a produção de biodiesel no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANP, 2023.

A Tabela 1 compara as eficiências de produção e aproveitamento de terra para diferentes matérias primas. Diante os dados apresentados, o biodiesel produzido a partir de microalgas demonstra um grande potencial, tornando-se, portanto, um tema relevante no meio científico nos últimos anos. Ademais, as microalgas não requerem muita atenção para serem cultivadas, podem crescer em ambientes nas mais diversas condições, pode-se utilizar águas impróprias para o consumo humano e os nutrientes requeridos por elas são de fácil obtenção.

**Tabela 1.** Comparação das eficiências de produção e aproveitamento de área para diferentes matérias primas na produção de biodiesel.

<b>Fonte vegetal</b>	<b>Teor de óleo de semente (%)</b>	<b>Rendimento de óleo (L/ha ano)</b>	<b>Uso de terra (m<sup>2</sup> ano/kg biodiesel)</b>	<b>Produtividade de biodiesel (kg biodiesel/ha ano)</b>
Milho ( <i>Zea mays</i> L.)	44	172	66	152
Cânhamo ( <i>Cannabis sativa</i> L.)	33	363	31	321
Soja ( <i>Glycine max</i> L.)	18	636	18	562
Jatropha ( <i>Jatropha curcas</i> L.)	28	741	15	656
Camelina ( <i>Camelina sativa</i> L.)	42	915	12	809
Canola ( <i>Brassica napus</i> L.)	41	974	12	862
Girassol ( <i>Helianthus annuus</i> L.)	40	1070	11	946
Mamona ( <i>Ricinus communis</i> )	48	1307	9	1156
Óleo de palma ( <i>Elaeis guineensis</i> )	36	5366	2	4747
Microalgas (teor baixo de óleo)	30	58.700	0,2	51.927
Microalgas (teor médio de óleo)	50	97.800	0,1	86.515
Microalgas (teor alto de óleo)	70	136.900	0,1	121.104

Fonte: Adaptado de CHISTI *et al.*, 2007.

### 2.1.2. *Sustainable Aviation Fuel (SAF)*

O Combustível Sustentável para Aviação (*Sustainable Aviation Fuel - SAF*) apresenta-se como uma solução promissora para mitigar as emissões de carbono no setor aeronáutico, um dos mais desafiadores de descarbonizar (FAPESP, 2022). Produzido a partir de recursos renováveis, como óleos residuais, gorduras animais e biomassa, o SAF possui um potencial de redução de até 80% das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo de seu ciclo de vida, comparado aos combustíveis fósseis convencionais (MIDFR, 2024). Além de sua compatibilidade com turbinas atuais, o SAF elimina a necessidade de modificações estruturais significativas na infraestrutura aeronáutica (ICAO, 2019).

O setor da aviação é responsável por aproximadamente 2 a 3% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, o que reflete sua elevada dependência de combustíveis com alta densidade energética (MINETOO, 2024). Para enfrentar este desafio, a *International Air Transport Association* (IATA) estabelece que até 2050, o SAF deverá compor 65% do fornecimento de combustível para voos de média e longa distância (IATA, 2021). Contudo, tecnologias complementares, como aeronaves à base de hidrogênio e elétricas, ainda estão em desenvolvimento inicial.

Apesar de seu potencial, a expansão do uso de SAF enfrenta desafios significativos, incluindo custos elevados de produção, limitada disponibilidade de matérias-primas e discrepâncias regulatórias entre regiões. Enquanto a União Europeia (UE) e os Estados Unidos avançam com mandatos para sua incorporação, outros países ainda carecem de políticas que promovam essa transição (European Commission, 2020; ICAO, 2019).

O Brasil, com sua vasta disponibilidade de biomassa e uma indústria de biocombustíveis consolidada, encontra-se em posição estratégica para liderar a produção de SAF na escala global (ANP, 2023). A flexibilidade para adaptar a produção de etanol e biodiesel ao mercado de SAF coloca o país em vantagem competitiva. Além disso, investimentos em pesquisa e desenvolvimento de rotas tecnológicas, como álcool-para-querosene (ATJ-SPK) e hidroprocessamento de óleos residuais (HEFA-SPK), poderiam maximizar sua capacidade produtiva (EMBRAPA, 2022).

Entretanto, desafios estruturais persistem. A competição pelo uso de biomassa entre setores industriais e a ausência de incentivos fiscais específicos para SAF restringem seu crescimento. A harmonização regulatória com mercados internacionais, especialmente os padrões estabelecidos pelo CORSIA (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), é essencial para posicionar o Brasil como um ator relevante nesse cenário (ICAO, 2019).

### **2.1.2.1. Produção**

A flexibilidade técnica das rotas produtivas do SAF permite que diferentes fontes de carbono sejam aproveitadas. Estas tecnologias são reguladas por padrões rigorosos e continuam a evoluir para atender às demandas crescentes de sustentabilidade e redução de emissões (ATAG, 2023).

A Tabela 2 ilustra as principais rotas produtivas e suas respectivas limitações de mistura, conforme padronização da ASTM (*American Society for Testing and Materials*), destacando as características fundamentais de cada processo e sua aplicação no contexto industrial.

**Tabela 2.** Principais rotas e matérias primas para a produção de SAF.

<b>Rota</b>	<b>Matéria-Prima</b>	<b>Nome da Certificação e Limite de Mistura</b>
Fischer-Tropsch	Culturas energéticas, biomassa lignocelulósica, resíduos sólidos	FT-SPK (até 50%)
Ésteres e Ácidos Graxos Hidroprocessados (HEFA)	Gorduras, óleos, graxas (FOGs) provenientes de fontes vegetais e animais	HEFA-SPK (até 50%)
Açúcares Diretos para Hidrocarbonetos (DSHC)	Açúcares convencionais, açúcares lignocelulósicos	HFS-SIP (até 10%)
Fischer-Tropsch com Aromáticos	Culturas energéticas, biomassa lignocelulósica, resíduos sólidos	FT-SPK+A (até 50%)
Álcool para Jato (AtJ)	Açúcar, culturas amiláceas, biomassa lignocelulósica	ATJ-SPK (até 50%)
Hidrotermólise Catalítica para Jato (CHJ)	Gorduras, óleos, graxas (FOGs) provenientes de fontes vegetais e animais	CHJ ou CH-SK (até 50%)
HEFA a partir de Algas	Óleos de microalgas	HC-HEFA-SPK (até 10%)
Co-processamento FOG	Gorduras, óleos, graxas (FOGs) provenientes de fontes vegetais e animais	FOG-CP (até 5%)
Co-processamento FT	Biocombustível Fischer-Tropsch	FT-CP (até 5%)

Fonte: Adaptado de ATAG *et al.*, 2023.

### 2.1.2.2. Matérias-Primas

As matérias-primas empregadas na produção de combustíveis de aviação sustentável (SAF) compreendem uma ampla gama de recursos, com destaque para fontes renováveis e

resíduos que podem ser convertidos em combustíveis química e funcionalmente equivalentes aos combustíveis fósseis tradicionais.

Primeiramente, os óleos e gorduras residuais, derivados de óleos de cozinha usados e gorduras animais descartadas, representam uma categoria amplamente utilizada devido à sua disponibilidade e processos de conversão bem estabelecidos, embora a limitação de fornecimento imponha a necessidade de diversificação para outras fontes (ATAG, 2023).

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) constituem outra fonte importante, abrangendo materiais a base de carbono como embalagens, restos alimentares e papel. A utilização de RSU implica tanto na redução do descarte em aterros sanitários, quanto na mitigação das emissões de metano associadas à decomposição desses resíduos (ATAG, 2023).

De maneira análoga aos RSU, os resíduos celulósicos, provenientes de resíduos florestais e agrícolas, são convertidos em combustíveis através de processos como Fischer-Tropsch ou fermentação (ATAG, 2023).

Ademais, culturas de cobertura como camelina, carinata e pennycress, cultivadas em rotação com cereais, oferecem uma alternativa sustentável ao maximizar a utilização do solo durante períodos em que a terra permaneceria improdutivo. Essas culturas promovem a diversificação agrícola e a redução da monocultura, mitigando a degradação do solo e aumentando sua resistência a pragas e doenças (ATAG, 2023).

Técnicas mais avançadas incluem combustíveis alternativos não biogênicos, como os processos *Power-to-Liquid* (PtL), que envolvem a conversão de fontes de carbono, como gases de resíduos industriais ou CO<sub>2</sub> capturado diretamente do ar, em combustíveis de aviação. Esse processo combina o carbono capturado com hidrogênio verde produzido por eletrólise alimentada por energia renovável. Além disso, avanços como o uso de energia solar concentrada para quebrar moléculas de água e CO<sub>2</sub> apresentam potencial de fornecimento teórico ilimitado para SAF, embora necessitem de maior desenvolvimento tecnológico e comercial (ATAG, 2023).

Por fim, microalgas se destacam como recurso emergente de grande potencial. As microalgas, caracterizadas por seu crescimento acelerado e capacidade de sequestro de CO<sub>2</sub>, podem ser cultivadas em áreas impróprias para a agricultura convencional e apresentam produtividade de óleo até 15 vezes superior às demais culturas equivalentes. As halófitas, por sua vez, são plantas adaptadas a solos salinos e podem integrar sistemas sustentáveis de aquicultura, combinando a produção de alimentos (como peixes) com biomassa para combustíveis. Ambas as alternativas ainda enfrentam desafios de comercialização, mas representam caminhos promissores para a produção de SAF (ATAG, 2023).

## 2.2. Microalgas

As microalgas, microrganismos fotossintetizantes que compõem o fitoplâncton, são autótrofos ou mixotróficos, capazes de converter luz solar e dióxido de carbono em biomassa rica em diversos produtos de valor agregado (PALMA, 2022) e têm despertado considerável interesse global, destacando-se como protagonistas em pesquisas voltadas para a produção de biocombustíveis (ABIUSI, 2014). Diferenciando-se de outras plantas oleaginosas, as microalgas apresentam vantagens notáveis que as tornam altamente atrativas para a produção de biodiesel, sem representar uma ameaça direta aos suprimentos de alimentos.

O potencial das microalgas reside na sua capacidade de crescimento eficiente em espaços reduzidos, o que contrasta com o espaço substancialmente maior necessário para o cultivo de plantas oleaginosas tradicionais. Além disso, sua elevada produtividade de lipídios, conforme destacado por Liu *et al.* (2012), torna-as uma fonte viável e sustentável para a produção de biocombustíveis, especialmente biodiesel. Essas características tornam as microalgas uma alternativa promissora no contexto da busca por fontes de energia renovável e ambientalmente amigáveis.

Uma produção eficiente de biocombustível a partir de microalgas envolve muitas variáveis, tais como: espécie de microalga escolhida, a luz incidente (comprimento de onda e intensidade específica), temperatura, pH, entre outros fatores. Dessa maneira, o presente projeto estudará os efeitos da luz na produtividade desse processo e, para isso, foi escolhida uma espécie a partir de uma revisão bibliográfica e de acordo com a disponibilidade.

A espécie escolhida foi a *Scenedesmus obliquus*. Foi atingido o conteúdo de óleo em massa de 57,10% por Taleb *et al.* em 2016 para essa espécie, demonstrando alto potencial para a produção de biodiesel. Esse valor reportado é relativamente alto quando comparado a outras espécies (Tabela 3).

**Tabela 3.** Conteúdo de óleo em massa por espécie.

<b>Espécie da microalga</b>	<b>Conteúdo de óleo em massa (%)</b>	<b>Referência</b>
<i>N. oleoabundans</i>	65,70	Pruvost <i>et al.</i> , 2011
<i>S. obliquus</i>	57,10	Taleb <i>et al.</i> , 2016
<i>Desmodesmus sp.</i>	55,00	Kaur <i>et al.</i> , 2012
<i>Micractinium sp.</i>	50,00	Onay <i>et al.</i> , 2014
<i>B. braunii</i>	33,55	Giraldo Calderón <i>et al.</i> , 2018
<i>S. quadricauda</i>	31,00	Goswami <i>et al.</i> , 2011
<i>C. closterium</i>	30,50	Pruvost <i>et al.</i> , 2011
<i>C. pyrenoidosa</i>	26,75	Fan <i>et al.</i> , 2012
<i>C. vulgaris</i>	26,50	Illman <i>et al.</i> , 2000
<i>C. sorokiniana</i>	22,00	Calixto <i>et al.</i> , 2016
<i>Dunaliella sp.</i>	20,00	BenMoussa-Dahmen <i>et al.</i> , 2016
<i>C. reinhardtii</i>	20,00	Lohman <i>et al.</i> , 2013
<i>Chaetoceros sp.</i>	20,00	Natrah <i>et al.</i> , 2007
<i>C. protothecoides</i>	18,75	Xiong <i>et al.</i> , 2008

<b>Espécie da microalga</b>	<b>Conteúdo de óleo em massa (%)</b>	<b>Referência</b>
<i>Scenedesmus sp.</i>	12,00	Kaur <i>et al.</i> , 2012
<i>S. platensis</i>	10,00	Gumbi <i>et al.</i> , 2017
<i>H. tetrachotoma</i>	7,50	Onay <i>et al.</i> , 2014
<i>S. maxima</i>	5,00	Gouveia e Oliveira, 2009

Fonte: Acervo pessoal.

### **2.3. Luz**

A luz é um fator central na vida das microalgas, desempenhando um papel crucial na regulação do metabolismo e na realização da fotossíntese, conforme destacado por Gris *et al.* (2014). A luz, sendo a fonte de energia para esses microrganismos autotróficos, é essencial para o seu crescimento e produção de biomassa.

Desde os experimentos pioneiros de Newton no século XVII, que elucidaram as propriedades ópticas da luz, até os avanços conceituais no início do século XX, com as contribuições de Planck e Einstein para a compreensão da natureza dual da luz, a evolução desses estudos destaca a complexidade e a importância desse fenômeno.

A compreensão contemporânea reconhece a luz como uma fonte de energia fundamental para as microalgas, desempenhando um papel essencial em seu crescimento autotrófico ou mixotrófico. Além disso, essa interação entre luz e microalgas não apenas possui implicações teóricas, mas também se traduz em aplicações práticas de grande potencial, especialmente no contexto do cultivo desses microrganismos para diversos fins biotecnológicos (GUEDES *et al.*, 2023).

Ademais, por conta da dependência da luz, diferentes “qualidades” de luz podem influenciar o crescimento das microalgas, promoverem a produção de componentes específicos e mudar seu metabolismo. A luz pode sofrer variações, basicamente, em intensidade e composição de cores. Assim, torna-se especialmente promissor analisar e entender o comportamento das microalgas sob diferentes condições de luz.

A heterogeneidade dos valores de intensidade de luz deve-se a efeitos como reflexão, absorção, emissão e espalhamento. Em adição, outro fenômeno que dificulta a passagem de luz pelo reator é o efeito de sombreamento que as microalgas fazem umas sobre as outras.

A abordagem escolhida para definir o perfil de luz considera intensidades locais em toda extensão do reator. A equação mais utilizada para descrever esse perfil é a de Lambert-Beer (Equação 1), que possui um termo exponencial de queda da intensidade de luz com o aumento da concentração celular no reator, de forma que o efeito de sombreamento, principalmente, é aumentado.

$$I(z) = I_0 \cdot e^{-\sigma \cdot C_X \cdot z} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que  $I(z)$  representa a intensidade luminosa local,  $I_0$  a intensidade luminosa inicial emitida,  $\sigma$  (sigma) a constante da lei de Lambert-Beer,  $C_X$  a concentração celular e  $z$  o comprimento local do reator.

### 2.3.1. Fontes de Luz

A luz é um dos fatores fundamentais que afetam a eficiência do crescimento e da produção de biomassa em microalgas, desempenhando um papel central no processo de fotossíntese. A principal fonte natural de energia luminosa é o Sol, cuja radiação, em condições ideais, pode alcançar até  $10^{21}$  quanta de luz visível por segundo sobre uma superfície horizontal de  $1 \text{ m}^2$  na Terra (KIRK, 1994). Contudo, embora economicamente vantajosa e amplamente acessível, a luz solar apresenta desafios inerentes relacionados à sua variação diária e sazonal. Durante o período diurno, a intensidade luminosa pode oscilar significativamente, alcançando valores máximos ao meio-dia e reduzindo-se drasticamente ao amanhecer e ao entardecer. Essa oscilação na disponibilidade de luz não apenas limita a eficiência fotossintética, mas também impõe barreiras ao planejamento e ao manejo de sistemas de cultivo.

Além disso, as condições climáticas, como nebulosidade e mudanças sazonais, podem impactar diretamente a irradiância disponível, restringindo o cultivo em muitas regiões ou durante determinados períodos do ano. Tais limitações evidenciam a necessidade de estratégias complementares que possam mitigar a dependência exclusiva da luz solar, garantindo a continuidade e a eficiência dos sistemas de produção de biomassa de microalgas.

Nesse contexto, as fontes artificiais de luz, especialmente os LEDs, têm demonstrado um enorme potencial para superar essas limitações. Os LEDs possibilitam um controle sobre diversos parâmetros luminosos, incluindo a densidade do fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD), o fotoperíodo – que define os ciclos de iluminação e escuro – e o espectro de emissão luminosa (CARVALHO *et al.*, 2011). Essa capacidade de ajuste fino permite adaptar as condições luminosas às necessidades específicas de diferentes espécies de microalgas, otimizando tanto o metabolismo fotossintético quanto a taxa de crescimento. Conseqüentemente, a utilização de LEDs tem sido associada a incrementos significativos na produtividade e na qualidade da biomassa gerada, fatores críticos para aplicações comerciais e industriais.

Outro aspecto relevante é a viabilidade energética e econômica do uso de LEDs, especialmente para a produção de compostos de alto valor agregado, como pigmentos, ácidos graxos e outros metabólitos bioativos (BLANKEN *et al.*, 2013). A eficiência energética e a longevidade desses dispositivos reduzem os custos operacionais de longo prazo, tornando-os uma alternativa atrativa para sistemas intensivos de cultivo. Além disso, a capacidade dos LEDs de operar em modos de iluminação intermitente, através da modulação da largura de pulso, tem demonstrado potencial para otimizar ainda mais o uso de energia luminosa, minimizando o estresse fotoinibidor em condições de alta irradiância (GROBBELAAR; NEDBAL; TICHÝ, 1996; LUNKA; BAYLESS, 2013; MATTHIJS *et al.*, 1996).

A eficácia das fontes de luz artificial também depende do espectro de luz emitido, pois diferentes comprimentos de onda possuem impactos diferenciados sobre os processos fotossintéticos. Estudos recentes sugerem que combinações otimizadas desses espectros não apenas aumentam a eficiência fotossintética, mas também favorecem a produção de compostos bioativos de interesse comercial. Essa abordagem baseada em espectros ajustáveis reforça o papel dos LEDs como ferramentas essenciais na engenharia de sistemas de cultivo de microalgas.

Portanto, embora a luz solar continue sendo a fonte mais natural e acessível de energia luminosa, a integração de tecnologias de iluminação artificial, como os LEDs, surge como uma solução avançada e versátil para aprimorar a produtividade em condições controladas ou em ambientes com restrições de irradiância solar. Essa estratégia representa um avanço significativo na busca por sistemas de cultivo mais eficientes, previsíveis e sustentáveis.

## 2.4. Efeitos da luz nas microalgas

A luz desempenha um papel fundamental no crescimento e metabolismo das microalgas, atuando como a principal fonte de energia para a fotossíntese (MALTSEV, 2021). Como organismos fotoautotróficos, as microalgas dependem da luz para a fixação de carbono e a produção de biomassa, influenciando diretamente sua taxa de crescimento, composição bioquímica e rendimento de metabólitos de interesse biotecnológico (MALTSEV, 2021). No entanto, a resposta das microalgas à luz varia de acordo com a intensidade luminosa, a duração do fotoperíodo e a composição espectral da radiação incidente.

A disponibilidade de luz afeta o equilíbrio metabólico das microalgas, podendo promover a síntese de lipídios, carotenoides e ácidos graxos, além de regular a atividade fotossintética. Condições de baixa luminosidade podem limitar a taxa fotossintética, enquanto exposições excessivas à luz podem induzir estresse foto-oxidativo e fotoinibição, reduzindo a eficiência do crescimento celular (MALTSEV, 2021). Assim, a otimização dos parâmetros luminotécnicos é essencial para maximizar a produtividade das microalgas em cultivos controlados.

Além da intensidade luminosa, o espectro de luz influencia a absorção fotônica pelas microalgas, uma vez que diferentes pigmentos fotossintéticos apresentam picos de absorção em comprimentos de ondas específicos (MALTSEV, 2021). Dessa forma, compreender os efeitos da luz no crescimento e na composição bioquímica das microalgas é essencial para aprimorar sua aplicação em biotecnologia, desde a produção de bioenergia até a obtenção de compostos bioativos de alto valor agregado.

Para analisar e avaliar esses efeitos sob diferentes aspectos, foram compilados dados de múltiplos cultivos de microalgas descritos na literatura, abrangendo distintas condições de iluminação, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4.** Cultivos de microalgas sob diferentes condições de iluminação presentes na literatura.

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Arthrospira maxima</i>	Branca	25	120	12:12	0,114	0,714 g L <sup>-1</sup>	(PARK, 2019)
<i>Arthrospira maxima</i>	Azul	25	120	12:12	0,018	0,332 g L <sup>-1</sup>	(PARK, 2019)
<i>Arthrospira maxima</i>	Verde	25	120	12:12	0,057	0,709 g L <sup>-1</sup>	(PARK, 2019)
<i>Arthrospira maxima</i>	Vermelha	25	120	12:12	0,113	0,453 g L <sup>-1</sup>	(PARK, 2019)
<i>Arthrospira platensis</i>	Branca	28	150	23:1	0,43	1,08 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	Vermelha	28	150	23:1	0,45	1,28 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	Vermelha e Verde (80:20)	28	150	23:1	0,44	1,19 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	Vermelha e Azul (80:20)	28	150	23:1	0,46	1,44 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	Vermelha, Verde e Azul (80:15:5)	28	150	23:1	0,45	1,19 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Arthrospira platensis</i>	Vermelha, Verde e Azul (80:5:15)	28	150	23:1	0,45	1,30 g L <sup>-1</sup>	(MAO, 2018)
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Branca	26	200	12:12	0,272	0,048 g L <sup>-1</sup>	(BAIDYA <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Verde	26	200	12:12	0,279	0,051 g L <sup>-1</sup>	(BAIDYA <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Azul	26	200	12:12	0,286	0,059 g L <sup>-1</sup>	(BAIDYA <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	Vermelha	26	200	12:12	0,27	0,041 g L <sup>-1</sup>	(BAIDYA <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella homosphaera</i>	Branca	25–35	5500–6000 lx	24:0		0,38 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(BORAH <i>ET AL.</i> , 2023)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Chlorella homosphaera</i>	Roxa	25–35	3000 lx	24:0		0,38 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(BORAH <i>ET AL.</i> , 2023)
<i>Chlorella homosphaera</i>	Azul	25–35	500 lx	24:0		0,32–0,35 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(BORAH <i>ET AL.</i> , 2023)
<i>Chlorella homosphaera</i>	Vermelha	25–35	800–1000 lx	24:0		0,17 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(BORAH <i>ET AL.</i> , 2023)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Branca	25	200	12:12	0,066	1,92 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Roxa	25	200	12:12	0,063	1,85 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Azul	25	200	12:12	0,062	1,76 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Verde	25	200	12:12	0,063	1,78 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Amarela	25	200	12:12	0,071	1,96 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Vermelha	25	200	12:12	0,078	2,08 g L <sup>-1</sup>	(CHU <i>et al.</i> , 2021)
<i>Chlorella sp.</i>	Branca	25	35 e 150				(PATEL <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Branca	20	100	12:12	0,268	1,10 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Roxa	20	100	12:12	0,266	1,06 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Azul	20	100	12:12	0,271	1,15 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Verde	20	100	12:12	0,254	0,88 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Amarela	20	100	12:12	0,265	1,04 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,275	1,23 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Branca	25	200	24:0	3,49	2,4 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Chlorella vulgaris</i>	Vermelha	25	200	24:0	3	2,11 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)
<i>Chlorella vulgaris</i>	Verde	25	200	24:0	2,3	-	(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Branca	20	100	12:12	0,576	0,4 g L <sup>-1</sup>	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Azul	20	100	12:12	0,672	0,55 g L <sup>-1</sup>	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Azul	23	100	24:0		1,40 g L <sup>-1</sup>	(KUMAR <i>et al.</i> , 2017)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Vermelha	23	100	24:0		1,64 g L <sup>-1</sup>	(KUMAR <i>et al.</i> , 2017)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Roxa	23	100	24:0		1,81 g L <sup>-1</sup>	(KUMAR <i>et al.</i> , 2017)
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	Branca	23	100	24:0		1,79 g L <sup>-1</sup>	(KUMAR <i>et al.</i> , 2017)
<i>Ecosystema complexo contendo microalgas, algas e bactérias</i>	PAR: 400–700 nm	22	40, 85 e 125				(GONZÁLEZ-CAMEJO <i>et al.</i> , 2018)
<i>Isochrysis galbana</i>	Branca	20	100	12:12	0,768	0,6 g L <sup>-1</sup>	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Isochrysis galbana</i>	Azul	20	100	12:12	0,96	0,79 g L <sup>-1</sup>	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Isochrysis galbana</i>	Branca	20	100	12:12	1,08	0,62 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Isochrysis galbana</i>	Azul	20	100	12:12	1,23	0,70 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Isochrysis galbana</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	1,34	0,75 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Isochrysis galbana</i>	Vermelha	20	100	12:12	1,15	0,66 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Isochrysis galbana</i>	Branca	20	100	12:12	0,53	0,64 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Isochrysis galbana</i>	Azul	20	100	12:12	0,6	0,84 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Isochrysis galbana</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	1,01	1,03 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Isochrysis galbana</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,06	0,72 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Isochrysis zhanjiangensis</i>	Branca	25	192	14:10	0,29	1,18 g L <sup>-1</sup>	(LV <i>et al.</i> , 160)
<i>Isochrysis zhanjiangensis</i>	Vermelha	25	192	14:10	0,44	0,57 g L <sup>-1</sup>	(LV <i>et al.</i> , 160)
<i>Isochrysis zhanjiangensis</i>	Azul	25	192	14:10	0,41	0,62 g L <sup>-1</sup>	(LV <i>et al.</i> , 160)
<i>Isochrysis zhanjiangensis</i>	Verde	25	192	14:10	0,25	0,89 g L <sup>-1</sup>	(LV <i>et al.</i> , 160)
<i>Isochrysis zhanjiangensis</i>	Amarela	25	192	14:10	0,22	0,79 g L <sup>-1</sup>	(LV <i>et al.</i> , 160)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Branca	20	100	12:12	0,43	0,40 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Azul	20	100	12:12	0,46	0,42 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	0,1	0,60 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,1	0,44 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Branca	20	100	12:12	0,5	0,60 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Azul	20	100	12:12	0,5	0,50 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	0,7	0,85 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,58	0,58 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	5		0,05		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	50		0,32		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	120		0,5		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	150		0,55		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	250		0,52		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	350		0,34		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	23	1000		0,35		(SFORZA <i>et al.</i> , 2012)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Branca	20	100	12:12	1,03	0,36 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Azul	20	100	12:12	1,1	0,39 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	1,34	0,46 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Nannochloropsis salina</i>	Vermelha	20	100	12:12	1,49	0,52 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Branca	25	100	12:12	0,29	0,132 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(VADIVELLO <i>et al.</i> , 2015)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Azul	25	15	12:12	0,16	0,028 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(VADIVELLO <i>et al.</i> , 2015)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Azul-Verde	25	20	12:12	0,09	$0,013 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	(VADIVELO O <i>et al.</i> , 2015)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Vermelha	25	75	12:12	0,24	$0,086 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	(VADIVELO O <i>et al.</i> , 2015)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Roxa (Azul + Vermelha)	25	85	12:12	0,34	$0,101 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$	(VADIVELO O <i>et al.</i> , 2015)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Verde	25	30	12:12			(VADIVELO O <i>et al.</i> , 2015)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Branca	23	100	24:0	1,59	$0,93 \times 10^7 \text{ cell mL}^{-1}$	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Azul	23	100	24:0	1,64	$1,23 \times 10^7 \text{ cell mL}^{-1}$	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	23	100	24:0	1,61	$1,11 \times 10^7 \text{ cell mL}^{-1}$	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Vermelha	23	100	24:0	1,61	$1,10 \times 10^7 \text{ cell mL}^{-1}$	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Pavlova lutheri</i>	Branca	20	100	12:12	0,255	$0,89 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pavlova lutheri</i>	Roxa	20	100	12:12	0,262	$0,99 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pavlova lutheri</i>	Azul	20	100	12:12	0,268	$1,09 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pavlova lutheri</i>	Verde	20	100	12:12	0,253	$0,86 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pavlova lutheri</i>	Amarela	20	100	12:12	0,233	$0,62 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Pavlova lutheri</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,261	$0,98 \text{ g L}^{-1}$	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Branca	20	100	12:12	0,912	$0,7 \text{ g L}^{-1}$	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Azul	20	100	12:12	1,13	$0,97 \text{ g L}^{-1}$	(JUNG <i>et al.</i> , 2019)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Branca	20	100	12:12	0,77	$0,60 \text{ g L}^{-1}$	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b>	<b>Referência</b>
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Azul	20	100	12:12	0,84	0,62 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	0,94	0,72 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,89	0,68 g L <sup>-1</sup>	(SIRISUK <i>et al.</i> , 158)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Branca	20	100	12:12	0,6	0,76 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Azul	20	100	12:12	0,7	0,80 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	20	100	12:12	0,89	0,95 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Phaeodactylum tricornerum</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,07	0,82 g L <sup>-1</sup>	(RA <i>et al.</i> , 2018)
<i>Policultura microalgal</i>	Branca	25	20	24:0		0,211 g L <sup>-1</sup>	(IASIMONE <i>et al.</i> , 2018)
<i>Policultura microalgal</i>	Branca	25	50	24:0		0,219 g L <sup>-1</sup>	(IASIMONE <i>et al.</i> , 2018)
<i>Policultura microalgal</i>	Branca	25	100	24:0		0,227 g L <sup>-1</sup>	(IASIMONE <i>et al.</i> , 2018)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Branca	20	100	12:12	0,214	1,22 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Roxa	20	100	12:12	0,214	1,23 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Azul	20	100	12:12	0,214	1,23 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Verde	20	100	12:12	0,217	1,28 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Amarela	20	100	12:12	0,213	1,20 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Vermelha	20	100	12:12	0,211	1,17 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2019)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Porphyridium cruentum</i>	Verde	20	300	24:0		0,91 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2021)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Verde	20	300	18:6		0,79 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2021)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Verde	20	300	12:12		0,75 g L <sup>-1</sup>	(KIM <i>et al.</i> , 2021)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	10		0,102	0,17 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	50		0,482	1,22 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	150		0,863	3,30 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	200		0,548	1,71 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	350		0,493	4,18 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	23	1000		0,571	4,92 g L <sup>-1</sup>	(GRIS <i>et al.</i> , 2014)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	20	50	12:12	0,96		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Azul	20	50	12:12	0,39		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Vermelha	20	50	12:12	0,09		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Branca	20	200	12:12	1,49		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Azul	20	200	12:12	1,27		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Vermelha	20	200	12:12	1,23		(WHITTON <i>et al.</i> , 2019)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Branca	25	200	24:0	2,84	1,56 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Vermelha	25	200	24:0	2,6	1,31 g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)

<b>Espécie</b>	<b>Cor de Luz</b>	<b>Temperatura</b> (°C)	<b>Intensidade de Luz</b> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ou unidades específicas)	<b>Fotoperíodo</b> (Claro: Escuro; h: h)	<b>Taxa de crescimento específica</b> ( $\text{d}^{-1}$ )	<b>Concentração final de biomassa ou produtividade</b> e	<b>Referência</b>
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	Verde	25	200	24:0	1		(ANYANWE <i>et al.</i> , 2022)
<i>Scenedesmus sp.</i>	Branca	25	50			2,55 g L <sup>-1</sup>	(LIU <i>et al.</i> , 2012)
<i>Scenedesmus sp.</i>	Branca	25	250			3,62 g L <sup>-1</sup>	(LIU <i>et al.</i> , 2012)
<i>Scenedesmus sp.</i>	Branca	25	400			3,88 g L <sup>-1</sup>	(LIU <i>et al.</i> , 2012)
<i>Tetraselmis sp.</i>	Branca	23	100	24:0	1,44	$0,24 \times 10^7$ cell mL <sup>-1</sup>	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Tetraselmis sp.</i>	Azul	23	100	24:0	1,47	$0,26 \times 10^7$ cell mL <sup>-1</sup>	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Tetraselmis sp.</i>	Azul e Vermelha (50% cada)	23	100	24:0	1,44	$0,23 \times 10^7$ cell mL <sup>-1</sup>	(TEO <i>et al.</i> , 2014)
<i>Tetraselmis sp.</i>	Vermelha	23	100	24:0	1,43	$0,21 \times 10^7$ cell mL <sup>-1</sup>	(TEO <i>et al.</i> , 2014)

Fonte: Acervo pessoal.

#### 2.4.1. Intensidade de Luz

A intensidade luminosa desempenha um papel crítico nos processos bioquímicos e fisiológicos das microalgas, influenciando diretamente a dinâmica metabólica e a composição de biomoléculas de interesse biotecnológico. Microalgas, como organismos fotossintetizantes, utilizam a luz como principal fonte de energia para sustentar processos metabólicos e gerar produtos de alto valor agregado. Estudos recentes demonstraram que a modulação da intensidade luminosa pode direcionar a síntese de lipídios, proteínas e pigmentos, o que evidencia sua importância estratégica em sistemas de cultivo otimizados (GUEDES *et al.*, 2023).

No caso da *Scenedesmus sp.*, Liu *et al.* (2012) destacaram que uma intensidade de luz de 400  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  proporcionou um maior rendimento de biomassa, além de aumentar a concentração de lipídios e a relação carotenoide/clorofila, essencial para a qualidade do

biodiesel. Por outro lado, Gris *et al.* (2014) observaram que, para a mesma espécie, uma intensidade de 150  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  foi mais eficiente para atingir a taxa m\u00e1xima de crescimento. Acima desse limite, fen\u00f4menos como fotoinibi\u00e7\u00e3o e estresse oxidativo reduziram a efici\u00eancia fotossint\u00e9tica.

Em sistemas utilizando LED, como no estudo de Whitton *et al.* (2019), *Scenedesmus obliquus* apresentou excelente capacidade de remedia\u00e7\u00e3o de nutrientes sob uma intensidade de luz de 200  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , indicando que fontes de luz mais modernas podem oferecer vantagens em processos sustent\u00e1veis de cultivo. Al\u00e9m disso, Sforza *et al.* (2012) mostraram que intensidades mais altas de luz estimularam a taxa de crescimento e a prote\u00e7\u00e3o contra excesso de luz em *Nannochloropsis salina*, destacando a relev\u00e2ncia do controle preciso na exposi\u00e7\u00e3o luminosa para evitar danos celulares.

Estudos em policulturas microalgais tamb\u00e9m evidenciam a import\u00e2ncia da ilumina\u00e7\u00e3o controlada. Iasimone *et al.* (2018) demonstraram que lâmpadas fluorescentes com intensidade de 100  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  foram adequadas para aumentar a biomassa em cultivos de m\u00faltiplas esp\u00e9cies. De forma similar, Gonz\u00e1lez-Camejo *et al.* (2018) verificaram que intensidades moderadas (125  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) favorecem a produtividade em ecossistemas complexos que combinam microalgas, algas e bact\u00e9rias.

Por fim, *Chlorella sp.* tamb\u00e9m respondeu de maneira positiva a intensidades de luz moderadas, como observado por Patel *et al.* (2019), em que valores entre 35 e 150  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  foram suficientes para sustentar um crescimento mixotr\u00f3fico eficiente.

Portanto, atrav\u00e9s dos resultados citados, pode-se inferir que a luz n\u00e3o apenas impulsiona a fotoss\u00edntese, mas tamb\u00e9m atua como moduladora do ac\u00famulo de biomassa e compostos desejados. Assim, a otimiza\u00e7\u00e3o da intensidade luminosa deve ser adaptada \u00e0s caracter\u00edsticas espec\u00edficas das esp\u00e9cies de microalgas, \u00e0s condi\u00e7\u00f5es de cultivo e \u00e0s metas do processo produtivo, seja para a maximiza\u00e7\u00e3o da biomassa, seja para a obten\u00e7\u00e3o de metab\u00f3litos de interesse. Nesse contexto, a Tabela 5 n\u00e3o apenas exibe os resultados acima mencionados, mas tamb\u00e9m re\u00fane refer\u00eancias adicionais que analisaram diversas intensidades de luz, identificando as intensidades \u00f3timas para diferentes condi\u00e7\u00f5es espec\u00edficas.

**Tabela 5.** Identificação das melhores intensidades de luz em cultivos de diferentes espécies de microalgas.

<b>Microrganismo</b>	<b>Fonte de luz</b>	<b>Melhor intensidade de luz</b>	<b>Efeitos Principais</b>	<b>Referência</b>
Policultura microalgal	Lâmpadas fluorescentes	100 (em comparação com 20 e 50)	Maior produtividade de biomassa e maior teor de massa lipídica.	IASIMONE <i>et al.</i> , 2018
<i>Scenedesmus sp.</i>	Lâmpadas tricromáticas (380-780 nm)	400 (em comparação com 50 e 250)	Maior relação de carotenoides e clorofila, conteúdo de lipídios e rendimento de biomassa.	LIU <i>et al.</i> , 2012
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Lâmpadas fluorescentes de até 150 $\mu\text{mol}$ fótons $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e LED para intensidades mais altas	150 (em comparação com 10, 50, 200, 350 e 1000)	Taxa máxima de crescimento.	GRIS <i>et al.</i> , 2014
<i>Scenedesmus obliquus</i>	LED	200 (em comparação com 50, 200 e 1000)	Ótima remediação de nutrientes.	WHITTON <i>et al.</i> , 2019
<i>Nannochloropsis salina</i>	LED SL 3500	150 (em comparação com 5, 50, 120, 150, 250, 350 e 1000)	Maior número de células e taxa de crescimento. Concentrações superiores de células se protegem do excesso de luz.	SFORZA <i>et al.</i> , 2012
Ecossistema complexo contendo microalgas, algas e bactérias	Lâmpadas fluorescentes	125 (em comparação com 40 e 85)	Aumento da produtividade de biomassa.	GONZÁLE Z-CAMEJO <i>et al.</i> , 2018
<i>Chlorella sp.</i>	LED	35 e 150	A deficiência de luz foi adequada para um crescimento mixotrófico efetivo	PATEL <i>et al.</i> , 2019

Fonte: Adaptado de GUEDES *et al.*, 2023.

#### 2.4.2. Comprimentos de onda

A influência dos comprimentos de onda da luz sobre as microalgas está profundamente associada à absorção de energia pelos pigmentos fotossintéticos, particularmente a clorofila a e

os carotenoides, cujas propriedades bioquímicas desempenham um papel fundamental na eficácia da fotossíntese e na promoção do crescimento celular (MARQUES, 2024).

Os comprimentos de onda localizados nas faixas do azul (400-500 nm) e do vermelho (600-700 nm) são especialmente relevantes devido à sua capacidade de excitar a clorofila a, resultando em uma maior eficiência na conversão de energia luminosa em energia química essencial para a produção de compostos orgânicos complexos (CARVALHO *et al.*, 2011; MATTHIJS *et al.*, 1996). Essa eficiência está vinculada à sinergia dos mecanismos fotossintéticos, que maximizam o uso do espectro luminoso.

Estudos demonstram que a luz azul exerce uma influência preponderante no aumento da razão entre carotenoides e clorofila, sugerindo um mecanismo adaptativo que protege as microalgas contra danos oxidativos induzidos pela luz intensa, além de favorecer a biossíntese de astaxantina, um antioxidante de grande relevância bioquímica e funcional (LIU, 2012). Os carotenoides, nesse contexto, desempenham um papel crítico na modulação do metabolismo celular em condições de alta irradiância, contribuindo para a homeostase e a adaptação a estresses ambientais adversos.

Em paralelo, a luz vermelha é igualmente indispensável, pois interage diretamente com a clorofila, promovendo reações metabólicas indispensáveis para o acúmulo de biomassa e a síntese de macromoléculas, como lipídios e carboidratos (GUEDES *et al.*, 2023).

Dessa forma, a combinação sinérgica entre esses espectros de luz configura um fator crítico para a otimização da produtividade, da eficiência bioenergética e do perfil bioquímico das microalgas em sistemas de cultivo controlados.

Já para os comprimentos de onda localizados nas faixas do verde (500-570 nm), foi identificado um menor crescimento, pior fixação fotossintética de CO<sub>2</sub> e menos produção de biomassa, conforme destacado por Baba *et al.*, (2012).

Dessa maneira, os estudos indicam que os melhores resultados geralmente envolvem o uso de luz azul, vermelha, branca ou uma combinação dessas fontes (GUEDES *et al.*, 2023). No entanto, é importante destacar que a resposta ao espectro luminoso pode variar conforme a espécie de microalga analisada, às demais condições de cultivo e aos objetivos do processo produtivo, que determinam os bioprodutos de interesse.

Além dos estudos anteriormente mencionados, destacam-se outros resultados de cultivos de microalgas com o uso de luz vermelha, verde e azul, bem como de outras faixas do espectro luminoso, visando-se otimizar sua taxa de crescimento específica e eficiência fotossintética, que estão disponíveis em Vejrazka *et al.* (2012), Koc e Anderson (2012), Costa

et al. (2013), Kwon et al. (2013), Abiusi et al. (2014), Markou (2014), Kula et al. (2014), Okumura et al. (2015).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Experimental

No contexto da otimização da produção de biocombustíveis, a modelagem matemática desempenha um papel fundamental. No caso das microalgas, a modelagem cinética e da produção de lipídeos são essenciais para maximizar a eficiência e sustentabilidade da conversão da biomassa em combustíveis renováveis.

Esses modelos permitem prever a produção de bioprodutos e otimizar as diferentes condições de cultivo. Neste trabalho, o foco concentrou-se na influência das condições luminosas, um fator crítico para o crescimento das microalgas e a síntese de lipídeos. Por fim, a aplicação de modelos matemáticos contribui significativamente para a engenharia de bioprocessos, facilitando ajustes estratégicos que aumentam a previsibilidade e a eficiência da conversão de biomassa lipídica em biocombustíveis.

##### 3.1.1. Modelagem Cinética a Partir da Intensidade de Luz

Na abordagem cinética para modelar o fenômeno em questão, voltada para a avaliação do impacto da luz no crescimento das microalgas, optou-se por uma perspectiva na qual a concentração de substrato não se configurasse como um fator limitante no cultivo. Isso viabilizou a predominância da influência da luz no modelo, permitindo sua incorporação na equação que descreve o crescimento do microrganismo em substituição à tradicional consideração da concentração de substrato como variável principal. Essa escolha estratégica proporciona uma compreensão mais aprofundada do papel determinante da luz no contexto da cinética de crescimento, enriquecendo a modelagem com informações essenciais para a otimização das condições de cultivo das microalgas.

A ênfase na modelagem a partir da intensidade de luz tem suas raízes no estudo pioneiro sobre o crescimento de *Chlorella* realizado por Tamiya *et al.* (1953). Este trabalho notável, apresentado no capítulo 16 do livro "*ALGAL CULTURE FROM LABORATORY TO PILOT PLANT*" utilizou um modelo muito similar ao proposto por Monod (1949), com a substituição da concentração de substrato pela intensidade de luz como variável determinante.

Essa abordagem não apenas fornece uma base teórica valiosa para compreender o crescimento de microalgas, mas também oferece *insights* cruciais para otimizar as condições

de cultivo e maximizar a produção de biomassa em contextos de interesse biotecnológico e industrial.

Entretanto, o modelo desenvolvido por Tamiya *et al.* (1953) por se basear no modelo de Monod, não leva em consideração a fotoinibição por excesso de luz (LEE, 2015), o que limitaria a análise do efeito da luz no crescimento das microalgas. Portanto, foi adotado o modelo de Steele (Equação 2), em que  $\mu$  representa a taxa específica de crescimento,  $\mu_{max}$  a taxa específica máxima de crescimento,  $I$  a intensidade luminosa e  $I_{opt}$  a intensidade luminosa ótima.

$$\mu = \mu_{max} \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (\text{Equação 2})$$

Em prol da análise do efeito de diferentes comprimentos de onda no crescimento das microalgas, o modelo cinético de Steele foi utilizado para cada comprimento de onda RGB, de forma que ele fosse subdividido em três termos, conforme Equação 3.

$$\mu = \mu_{maxR} \frac{I_R}{I_{optR}} \exp\left(1 - \frac{I_R}{I_{optR}}\right) + \mu_{maxG} \frac{I_G}{I_{optG}} \exp\left(1 - \frac{I_G}{I_{optG}}\right) + \mu_{maxB} \frac{I_B}{I_{optB}} \exp\left(1 - \frac{I_B}{I_{optB}}\right) \quad (\text{Equação 3})$$

A principal característica distintiva da modelagem com base na luz, em comparação com a modelagem por substrato, reside na heterogeneidade dos valores de intensidade no seio do reator, necessitando, portanto, de um modelo para descrever o perfil de luz no reator.

Por fim, destaca-se, também, que a concentração de produtos foi determinada com base na concentração celular, sem medições diretas em experimentos.

### 3.1.2. Perfil de Luz - Modelo de Lambert-Beer

A heterogeneidade dos valores de intensidade de luz deve-se a efeitos como reflexão, absorção, emissão e espalhamento. Em adição, outro fenômeno que dificulta a passagem de luz pelo reator é o efeito de sombreamento que as microalgas fazem umas sobre as outras.

A abordagem escolhida para definir o perfil de luz considera intensidades locais em toda extensão do reator. A equação mais utilizada para descrever esse perfil é a de Lambert-Beer (Equação 1), que possui um termo exponencial de queda da intensidade de luz com o aumento da concentração celular no reator, de forma que o efeito de sombreamento, principalmente, é aumentado.

Em prol da simplificação do perfil da luz para posterior aplicação no modelo cinético descrito anteriormente, foi integrada a intensidade de luz local em todo o comprimento do biorreator ( $L$ ) e dividido o valor encontrado pelo comprimento total do biorreator (Equação 4) de forma a encontrar uma intensidade média de luz ( $I_M$ ) para cada concentração celular (Equação 5).

$$I_M = \frac{\int_0^L I_0 e^{-\sigma Cx z} dz}{L-0} \quad (\text{Equação 4})$$

$$I_M = \frac{I_0 (1 - e^{-\sigma Cx L})}{\sigma Cx L} \quad (\text{Equação 5})$$

A intensidade média encontrada foi implementada no modelo cinético, conforme a Equação 6.

$$\mu = \mu_{maxR} \frac{I_{MR}}{I_{optR}} \exp\left(1 - \frac{I_{MR}}{I_{optR}}\right) + \mu_{maxG} \frac{I_{MG}}{I_{optG}} \exp\left(1 - \frac{I_{MG}}{I_{optG}}\right) + \mu_{maxB} \frac{I_{MB}}{I_{optB}} \exp\left(1 - \frac{I_{MB}}{I_{optB}}\right) \quad (\text{Equação 6})$$

Por fim, as equações diferenciais finais, que descrevem a concentração celular e a produção de produto em função do tempo foram descritas pelas Equações 7 e 8, em que  $kd$  representa a constante de absorção de nutriente armazenado,  $\alpha$  (*alfa*) a produção de produto associada ao crescimento celular,  $\beta$  (*beta*) a produção de produto não associada ao crescimento celular e  $Y_{PX}$  o coeficiente de rendimento ou conversão de substrato a produto.

$$\frac{dCx}{dt} = \mu \cdot Cx - kd \cdot Cx \quad (\text{Equação 7})$$

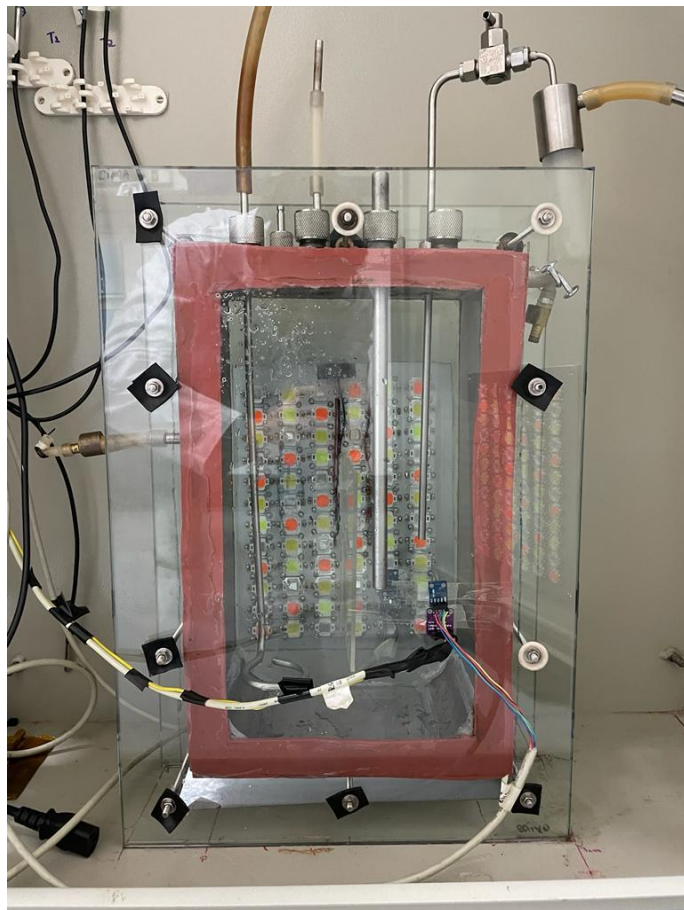
$$\frac{dP}{dt} = (\alpha \cdot \mu + \beta) \cdot Cx \cdot Y_{PX} \quad (\text{Equação 8})$$

### 3.1.3. Aparato Experimental

Para a inoculação e cultivo, foram utilizados: uma cepa de microalgas da espécie *Scenedesmus obliquus* fornecida pela Coleção de Culturas de Microalgas de Água Doce da

Universidade Federal de São Carlos (CCMA-UFSCar) por meio do Laboratório de Biotecnologia de Algas; erlenmeyers de diferentes tamanhos (300 mL, 500 mL, 1 L e 2 L), um biorreator *airlift* de 6 L, Espectrofotômetro Biospectro SP-22, 1 painel de LED constituído por luz: branca, vermelha, azul e verde, responsável por cobrir uma superfície do fotobiorreator e para tanto possui dimensões de 20 x 35 cm; Dois sensores RGB (modelo TCS34725), caixa metálica escura para envolver o reator em prol de evitar interferência da luz externa, software implementado em LabVIEW responsável por monitorar variáveis do processo e controlar a luz automaticamente - Supersys\_PHOTO®. O software foi utilizado para controlar a vazão de CO<sub>2</sub> no reator, a potência da luz em comprimentos de onda escolhidos, ligar e desligar os painéis nos períodos claros e escuros, e para captação dos dados do cultivo pelos sensores RGB. A Figura 5 ilustra o aparato experimental para a realização do cultivo.

**Figura 5.** Aparato experimental do cultivo.



Fonte: Acervo pessoal.

### 3.1.4. Meio de Cultura

O meio de cultura utilizado foi o BG-11 modificado, descrito detalhadamente por RIPPKA *et al.*

Basicamente, o meio é constituído por  $C_6H_8O_7$ ,  $(NH_4)_5[Fe(C_6H_4O_7)_2]$ ,  $NaNO_3$ ,  $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ ,  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $MgNaEDTA \cdot H_2O$  e uma solução traço de metais. Essa solução traço de metais era constituída por  $H_3BO_3$ ,  $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ ,  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ ,  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$  e  $Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ . As concentrações de cada um dos componentes do meio estão descritas nas Tabelas 6 e 7.

**Tabela 6.** Nutrientes do meio de cultivo utilizado (BG-11 modificado).

Nutrientes	Concentração final no meio (mol/L)
$C_6H_8O_7$	3,12E-05
$(NH_4)_5[Fe(C_6H_4O_7)_2]$	3,00E-05
$NaNO_3$	1,76E-02
$K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$	1,75E-04
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	3,04E-04
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	2,45E-04
$Na_2CO_3$	1,89E-04
$Mg EDTA \cdot H_2O$	2,79E-06

Fonte: Acervo pessoal.

**Tabela 7.** Compostos da solução Traço de Metais utilizada.

<b>Traço de Metais</b>	<b>Concentração final no meio (mol/L)</b>
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	4,63E-05
MnCl <sub>2</sub> .4H <sub>2</sub> O	9,15E-06
ZnSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	7,65E-07
CuSO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O	3,16E-07
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	1,16E-06
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	1,70E-07

Fonte: Acervo pessoal.

Ademais, o meio de cultura empregado para o cultivo das microalgas foi submetido a procedimentos de esterilização para mitigação de contaminações. O método adotado consistiu na autoclavagem do meio a uma temperatura de 120°C por um período de 20 minutos. Além disso, o pH do meio foi ajustado para 7, para minimizar possíveis interferências decorrentes de variações de acidez no ambiente de cultivo.

As condições descritas para o meio de cultura foram igualmente empregadas para os inóculos e para o cultivo em biorreator.

### **3.1.5. Procedimento Experimental**

#### **3.1.5.1. Inoculação**

Uma linhagem de microalgas pertencente à espécie *Scenedesmus obliquus* foi inicialmente introduzida em Erlenmeyers com volumes de 300 mL, 500 mL, 1L e 2L. Para mitigar potenciais contaminações e assegurar a esterilidade da cultura, as algas foram manipuladas em uma capela de fluxo laminar devidamente descontaminada com solução de álcool 70° e 20 minutos de luz ultravioleta.

A transição do Erlenmeyer de menor capacidade para o consecutivo de maior volume ocorria quando uma densidade óptica suficiente era alcançada, assegurando que, após a transferência, a cultura apresentasse uma densidade óptica próxima a 0,100 no novo recipiente.

Medidas de densidade óptica foram conduzidas em espectrofotômetro no comprimento de onda de 684 nm, realizadas duas vezes ao dia, com o propósito de viabilizar análises subsequentes referentes ao comportamento de seu crescimento. É relevante observar que uma curva de calibração foi empregada, correlacionando a densidade óptica a 684 nm com a concentração celular. Essa curva foi estabelecida com base em dados previamente coletados em cultivos anteriores, envolvendo microalgas da mesma espécie da escolhida no presente trabalho.

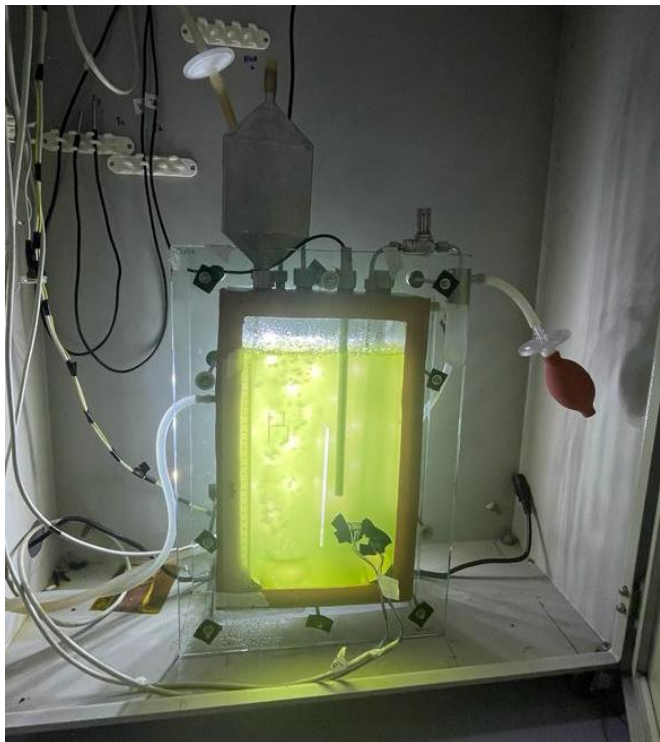
### **3.1.5.2. Cultivo**

O cultivo foi conduzido em um biorreator airlift de 6 L. Durante essa fase, a duração dos períodos de iluminação e escuridão foi estabelecida em 12 horas cada, e as densidades ópticas foram mensuradas no início e final de cada período.

O cultivo teve duração de 7 dias, possibilitando 14 medidas de densidade óptica. Ademais, foi escolhida a potência de  $200 \mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , a alimentação de  $\text{CO}_2$  de  $1,5 \text{ L min}^{-1}$  que também promove a agitação do sistema e temperatura do banho termostático do biorreator a  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A Figura 6 representa o sistema do cultivo no período claro. As bolhas presentes na imagem são devidas ao borbulhamento de  $\text{CO}_2$  no reator na parte inferior, promovendo a circulação característica do airlift e, amenizando, portanto, o efeito de sombreamento das microalgas. Os sensores fixados na superfície do reator são os sensores RGB mencionados no aparato experimental. O banho termostático circula água a  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  na lateral do reator.

**Figura 6.** Cultivo em biorreator durante o período claro.



Fonte: Acervo pessoal.

### **3.1.6. Simulação**

As simulações efetuadas foram relativas à análise da concentração celular, a concentração de produtos (óleos) e a intensidade média de luz ao longo do tempo. Destaca-se, também, que as simulações foram conduzidas ao longo de um período temporal de 7 dias, em consonância com a duração do processo de cultivo. Tal abordagem temporal permitiu avaliar o desempenho da modelagem em um contexto temporal similar ao encontrado nas condições reais de cultivo.

Na simulação em questão, foram considerados os períodos escuros, de forma que, a cada 24 h, 12 h a intensidade de luz era nula, e nas outras 12 h, a intensidade de luz era positiva.

Ressalta-se, ainda, que o algoritmo de simulação foi estabelecido no ambiente computacional proporcionado pelo software Matlab®.

### **3.1.7. Ajuste dos Parâmetros – *Simulated Annealing***

No presente projeto, os dados experimentais relativos ao cultivo foram utilizados para o ajuste dos parâmetros cinéticos do modelo por meio de uma abordagem estocástica utilizando

o *Simulated Annealing*. Esta técnica, fundamentada em conceitos da termodinâmica estatística, consiste em um método de otimização global que busca encontrar os parâmetros ideais, os quais minimizam uma função objetivo predeterminada.

O *Simulated Annealing* é inspirado no processo de recozimento de um material, onde a temperatura é gradativamente reduzida para alcançar um estado de equilíbrio termodinâmico. Analogamente, no contexto da otimização, a "temperatura" é interpretada como uma variável controlada que influencia a aceitação de soluções candidatas, permitindo a exploração de regiões do espaço de busca mesmo em presença de mínimos locais.

Ao aplicar o *Simulated Annealing* aos dados cinéticos experimentais da microalga, os parâmetros cinéticos foram ajustados de forma iterativa, visando minimizar a diferença entre os valores simulados e os observados. Esse processo iterativo é guiado pela dinâmica simulada da otimização, que incorpora elementos aleatórios e busca explorar amplamente o espaço de parâmetros em busca da solução mais otimizada. A robustez e eficácia dessa abordagem residem na sua capacidade de evitar convergência prematura a mínimos locais, proporcionando uma exploração mais abrangente e eficiente do espaço de busca.

Para a aplicação do método descrito foi utilizado o software Matlab®.

### **3.2. Análise da Literatura**

Como etapa inicial para a análise da literatura a respeito do efeito da luz na produção de biocombustíveis, foi realizada uma revisão dos conceitos e princípios que governam os efeitos da luz na fisiologia e fotossíntese das microalgas, utilizando literatura científica reconhecida.

A base teórica permitiu o levantamento bibliográfico foi realizado na base de dados chamada Scopus, que é a maior base de resumos e citações de literatura revisada por pares, com ferramentas bibliométricas para acompanhar, analisar e visualizar a pesquisa. O Scopus, desenvolvido pela editora acadêmica Elsevier e lançado em 2004, abrange as áreas de Ciência, Tecnologia, Medicina, Ciências Sociais e Artes e Humanidades. É uma base internacional com uma ampla representação da produção científica na América Latina. Além de ser uma base de resumos, a Scopus também é uma base de pesquisadores, pois cataloga todos os autores dos artigos por ela indexados e atribui um identificador a cada autor catalogado, o Author ID (UNIVALI, 2022).

A busca utilizou palavras-chave como "microalgae", "light", "biofuel", "biodiesel" e "SAF", sendo compiladas e alternadas entre si. A partir dessa pesquisa foi feita uma análise

baseada em ano de publicação, países, áreas de pesquisa e, por fim, uma análise e verificação de estudos e seus resultados, utilizando como referência alguns artigos encontrados.

O processo analítico incluiu aspectos quantitativos, como a identificação de padrões em dados, e aspectos qualitativos, que exploraram impactos práticos das descobertas, desafios tecnológicos e perspectivas futuras do campo. Essa abordagem permitiu organizar as informações de forma clara, oferecendo uma visão crítica sobre o estado da arte no estudo da influência da luz na produção de biomassa de microalgas para aplicações energéticas.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Experimentais

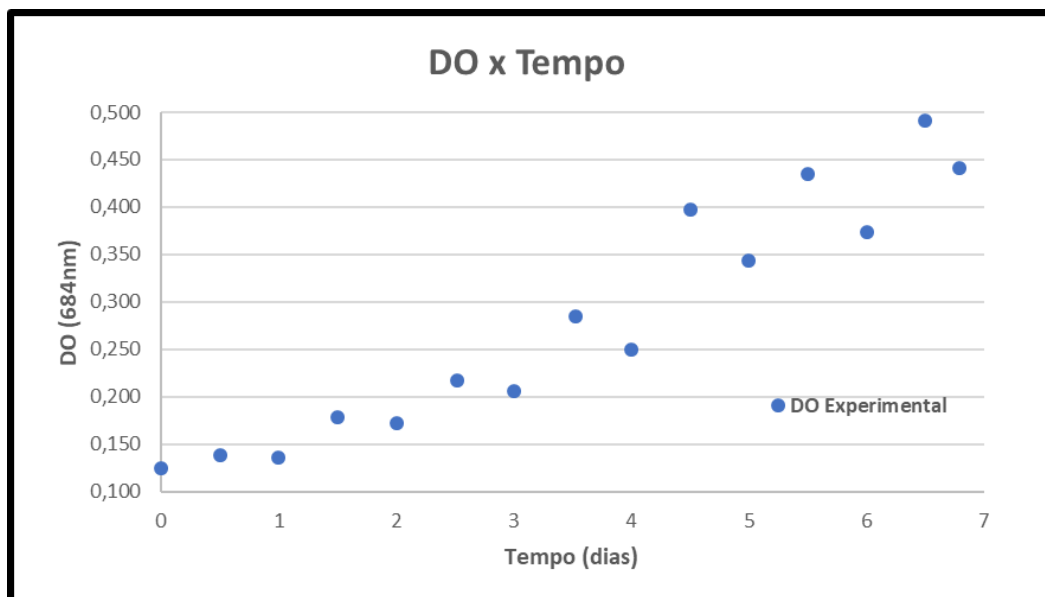
#### 4.1.1. Densidade Óptica do Cultivo

Realizou-se a análise da densidade óptica a um comprimento de onda de 684 nm, um indicador conhecido de crescimento microalgal (LEDUY, 1977), empregando um espectrofotômetro.

No decorrer do experimento, o cultivo das microalgas foi conduzido sob um regime de fotoperíodo de 12 horas de iluminação (período claro) seguidas por 12 horas de escuridão (período escuro). O monitoramento do crescimento microalgal envolveu a realização de medições de densidade óptica no início e final de cada período, totalizando duas avaliações diárias, ao longo de uma semana de experimentos. Todas as medidas foram feitas em triplicata, em prol da minimização de erros experimentais. Os resultados estão ilustrados na Figura 7.

O parâmetro cinético do crescimento foi caracterizado pelo coeficiente da taxa de crescimento ( $\mu$ ), cujo valor aproximado atingiu  $0,2 \text{ d}^{-1}$ . A agitação efetiva do meio de cultura impede que as microalgas decantem no fundo do recipiente de cultivo, garantindo uma distribuição homogênea e, por conseguinte, otimizando as condições para o crescimento acelerado observado durante o experimento.

**Figura 7.** Densidades ópticas obtidas para o cultivo.



Fonte: Acervo pessoal.

No contexto do experimento, observou-se uma diminuição na densidade óptica ao término do período escuro do cultivo. A análise desse fenômeno envolve considerações de ordem metabólica ou potenciais eventos de morte celular.

A primeira hipótese a ser considerada é relacionada a mudanças metabólicas. Sugere-se que durante o período escuro, a supressão da fotossíntese pode redirecionar a alocação de energia para outras vias metabólicas, resultando em diminuição na densidade óptica.

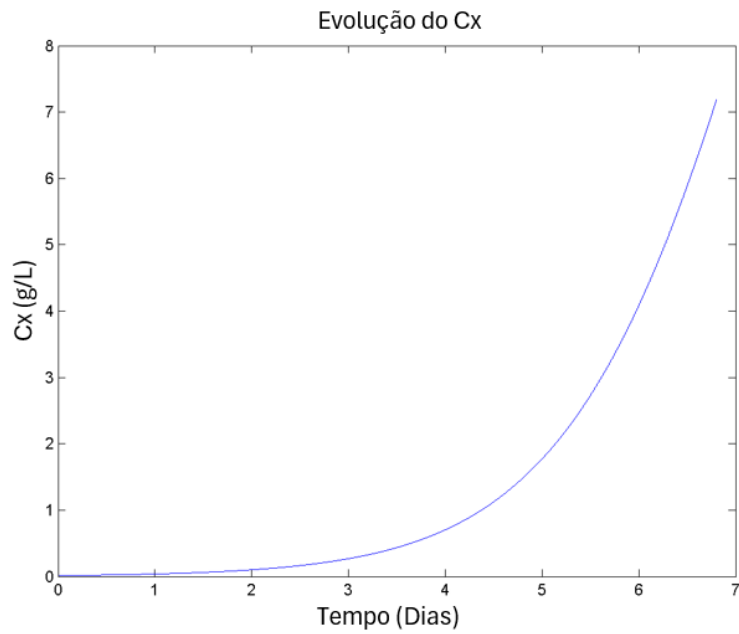
Outra possibilidade a ser ponderada é a morte celular. Embora não seja a explicação imediata, condições adversas durante o período escuro, como estresses ambientais ou desequilíbrios nutricionais, podem influenciar eventos de morte celular, refletindo na densidade óptica.

Essas hipóteses demandam investigações mais aprofundadas, com experimentos controlados e manipulação de variáveis ambientais, para corroborar ou refutar as interpretações propostas.

#### **4.1.2. Simulação do modelo**

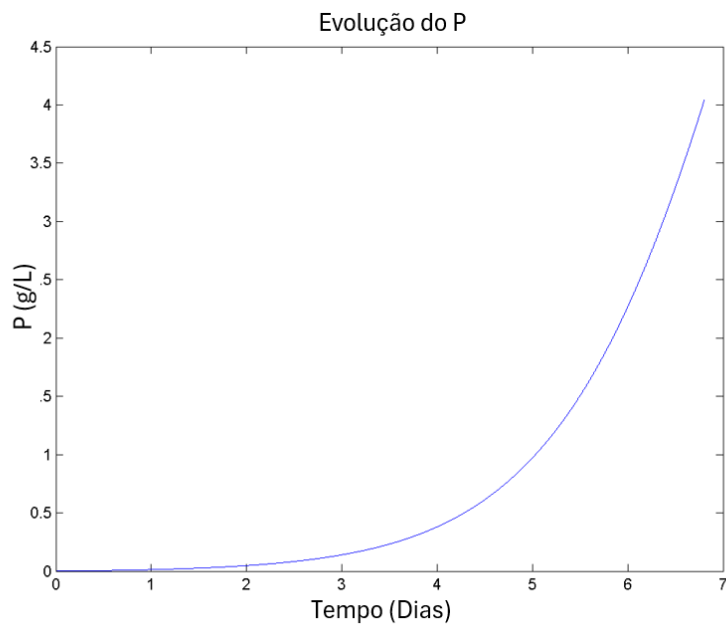
Em relação às simulações para concentração celular, concentração de produto e intensidades médias de luz para os comprimentos de onda RGB realizadas, demonstradas respectivamente nas Figuras 8, 9 e 10 demonstraram um comportamento congruente com o previsto, reforçando, assim, a validade e eficácia do modelo matemático desenvolvido.

**Figura 8.** Resultado da simulação do modelo para concentração celular em função do tempo.



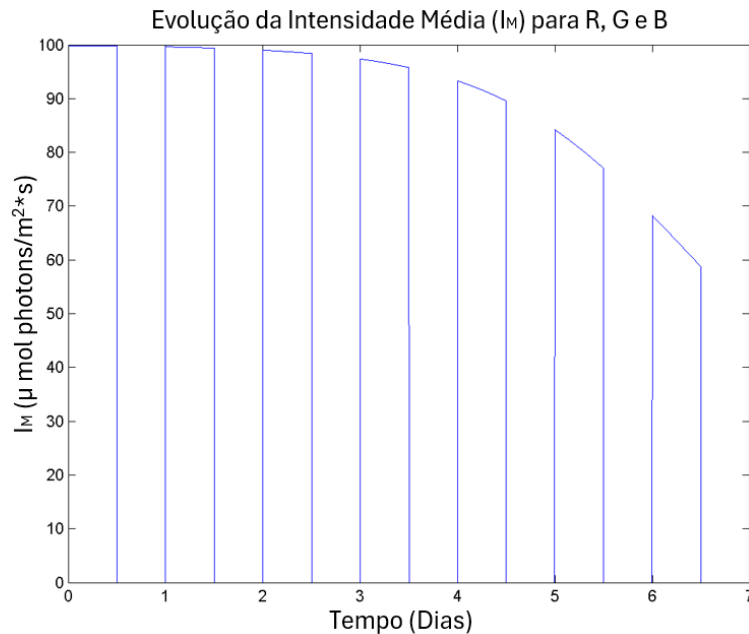
Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 9.** Resultado da simulação do modelo para concentração de produto em função do tempo.



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 10.** Resultado da simulação do modelo para intensidade média de luz vermelha, verde e azul (mesmo comportamento) em função do tempo.



Fonte: Acervo pessoal.

Nas Figuras 8 e 9, observa-se que, com o passar do tempo de cultivo, o comportamento da concentração celular e da concentração de produto é de crescimento, visto que, espera-se que as microalgas se reproduzam e produzam mais óleo, que é o bioproduto de interesse.

Na Figura 10 pode-se observar que, nos períodos escuros, as intensidades de luz são nulas e, nos períodos claros, com o passar do tempo de cultivo, as intensidades médias tendem a diminuir. Esse comportamento é esperado visto que ao longo do cultivo aumenta-se a concentração celular e, conseqüentemente, por conta do efeito de sombreamento anteriormente descrito, a intensidade média de luz tende a decrescer.

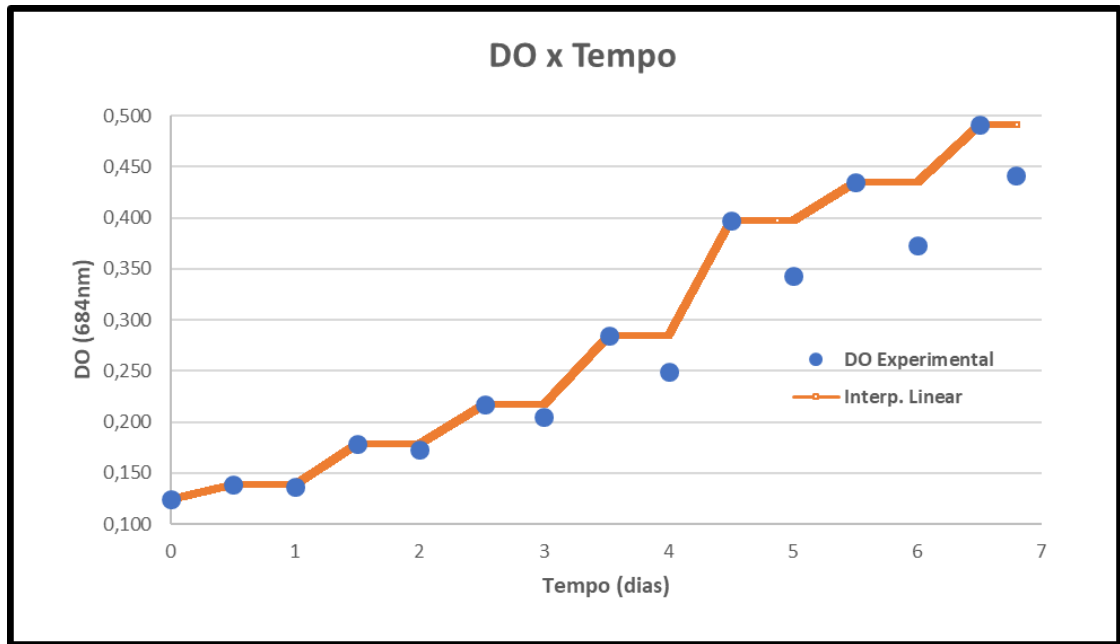
#### 4.1.3. Ajuste dos Parâmetros

Em prol de simplificação dos dados experimentais para posterior ajuste, dentre as hipóteses possíveis à diminuição das densidades ópticas nos períodos escuros (descritas no item 4.1.1.), foi considerado não haver morte celular significativa, principalmente devido a outros estudos na literatura que, mesmo possuindo períodos escuros de durações diferentes e outras condições de cultivo, não apresentaram morte celular significativa.

Portanto, foi adotado que essa diminuição nas densidades ópticas, ao final do período escuro, deve-se a mudanças metabólicas das microalgas. Dessa maneira, foi considerado para

a realização dos ajustes dos parâmetros que a densidade óptica se manteve constante nos períodos escuros, além da consideração de uma variação linear entre os novos pontos de densidade óptica dos fins dos períodos escuros e dos fins dos períodos claros, conforme Figura 11. Os dados utilizados para o ajuste dos parâmetros cinéticos são os dados na cor laranja na figura.

**Figura 11.** Dados considerados do cultivo para a realização do ajuste.



Fonte: Acervo pessoal.

No ajuste em questão, foram ajustados 11 parâmetros e medidas estatísticas que fornecem informações sobre a distribuição, relacionamento e variabilidade entre os parâmetros. Os 11 parâmetros ajustados foram:  $\mu_{\max R}$ ,  $\mu_{\max G}$ ,  $\mu_{\max B}$ ,  $\alpha$  (alfa),  $Y_{PX}$ ,  $\beta$  (beta),  $I_{optR}$ ,  $I_{optG}$ ,  $I_{optB}$ ,  $\sigma$  (sigma),  $k_d$ ; em que  $\mu_{\max}$  é a velocidade específica máxima de crescimento e foi subdividida para luz vermelha, verde e azul (RGB),  $Y_{PX}$  é coeficiente de rendimento ou conversão de substrato a produto,  $I_{opt}$  é a intensidade de luz ideal, que promove o crescimento máximo,  $\mu = \mu_{\max}$ ;  $\sigma$  (sigma) é uma constante da lei de Lambert-Beer e  $k_d$  é a constante de absorção de nutriente armazenado.

Esses parâmetros foram ajustados por meio do *Simulated Annealing* (Tabela 8). Possibilitado pela utilização dos dados experimentais do cultivo, o resultado desse ajuste foi a obtenção dos parâmetros cinéticos do modelo, a qual foi então comparada com os próprios dados experimentais previamente obtidos. Essa comparação teve como objetivo validar a capacidade preditiva do modelo, verificando a coerência entre as simulações realizadas com os

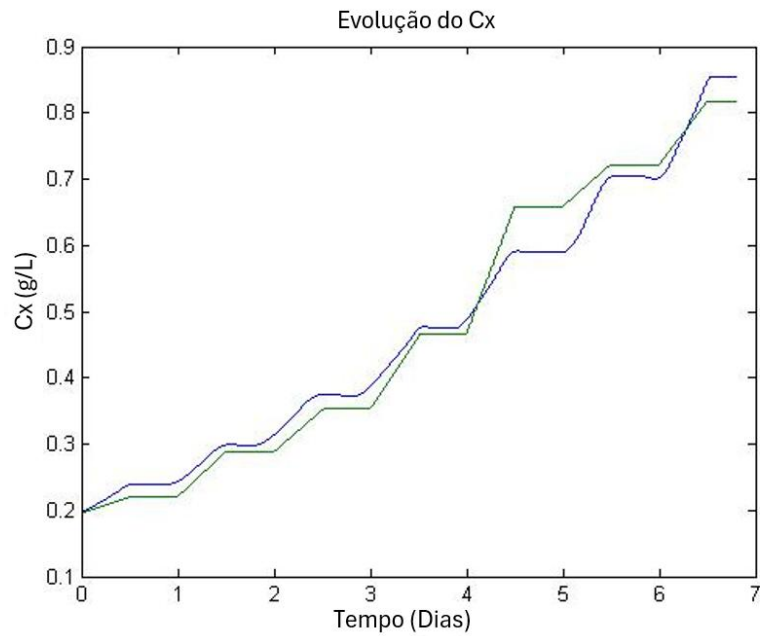
parâmetros ajustados e os resultados experimentais observados durante o cultivo da microalga. Os resultados dessa comparação estão apresentados nas Figuras 12 e 13, em que as linhas verdes representam os dados experimentais, enquanto as linhas azuis foram previstas pelo modelo ajustado.

**Tabela 8.** Parâmetros encontrados pelo ajuste.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor Ajustado</b>	<b>Unidade</b>
$\mu_{\max R}$	0,0348	$d^{-1}$
$\mu_{\max G}$	0,0012	$d^{-1}$
$\mu_{\max B}$	0,3798	$d^{-1}$
$\alpha$	0,0287	-
$Y_{PX}$	0,3787	-
$\beta$	0,2881	-
$I_{\text{opt}R}$	81,0056	$\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$I_{\text{opt}G}$	183,6008	$\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$I_{\text{opt}B}$	133,7946	$\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$
$\sigma$	0,1337	-
kd	0,0019	-

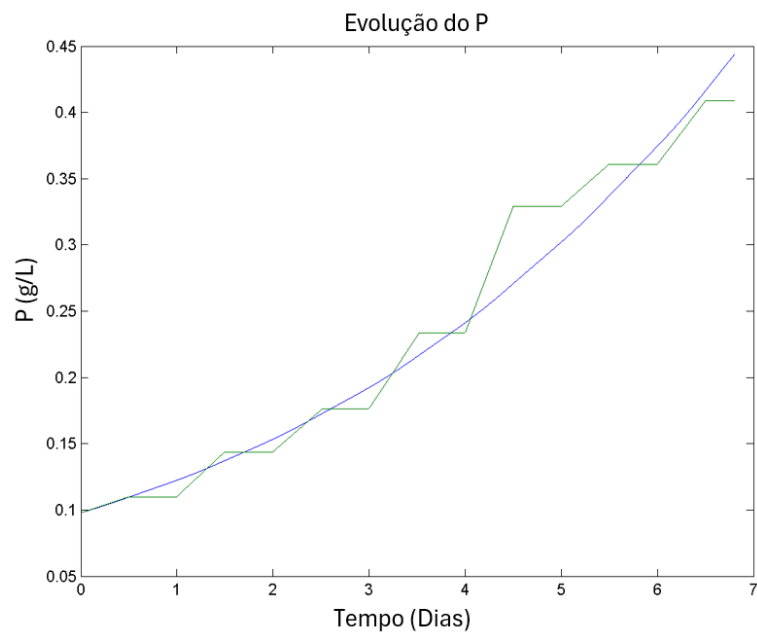
Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 12.** Simulação com parâmetros ajustados pelo *Simulated Annealing* (curva azul) e dados experimentais (curva verde) da concentração celular x tempo.



Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 13.** Simulação com parâmetros ajustados pelo *Simulated Annealing* (curva azul) e dados experimentais (curva verde) da concentração de produto x tempo.



Fonte: Acervo pessoal.

Ao analisar as Figuras 12 e 13, observa-se que o modelo ajustado apresentou elevada precisão na previsão da concentração celular e da concentração de produtos, evidenciada pela proximidade dos valores simulados em relação aos experimentais.

#### 4.1.4. Medidas estatísticas dos parâmetros

No ajuste, foram encontradas as seguintes medidas estatísticas: desvio padrão, covariância e correlação. Os dados encontrados estão presentes nas Figuras 14, 15 e 16. Nos dados de covariância e correlação, existem 11 linhas e 11 colunas de dados de forma que estão na seguinte ordem dos parâmetros, respectivamente:  $\mu_{\max R}$ ,  $\mu_{\max G}$ ,  $\mu_{\max B}$ ,  $\alpha$ ,  $Y_{PX}$ ,  $\beta$ ,  $I_{optR}$ ,  $I_{optG}$ ,  $I_{optB}$ ,  $\sigma$  e  $k_d$ . O elevado desvio padrão de alguns parâmetros, apresentado na Figura 16, possivelmente, decorre da baixa quantidade de dados experimentais analisados.

**Figura 14.** Dados de covariância entre os parâmetros obtidos.

```

covar =
1.0e+011 *
0.0054  0.0131  -0.0171  0.0003  -0.0037  0.0028  0.0031  0.0002  -0.0011  0.0004  0.0000
0.0131  0.0321  -0.0420  0.0007  -0.0092  0.0070  0.0095  -0.0027  -0.0073  0.0010  0.0000
-0.0171 -0.0420  0.0548  -0.0009  0.0120  -0.0091  -0.0118  0.0025  0.0082  -0.0013  -0.0000
0.0003  0.0009  -0.0011  0.0033  -0.0434  0.0330  0.0036  -0.0027  0.0035  0.0000  -0.0000
-0.0046 -0.0114  0.0148  -0.0434  0.5730  -0.4360  -0.0477  0.0361  -0.0459  -0.0001  0.0000
0.0035  0.0087  -0.0113  0.0330  -0.4360  0.3317  0.0363  -0.0275  0.0349  0.0001  -0.0000
0.0032  0.0098  -0.0122  0.0036  -0.0470  0.0357  1.0628  -1.2593  -0.0273  -0.0010  -0.0000
0.0001  -0.0030  0.0029  -0.0027  0.0358  -0.0273  -1.2593  1.5993  0.2779  0.0009  0.0000
-0.0011 -0.0073  0.0082  0.0035  -0.0466  0.0354  -0.0272  0.2778  0.7475  -0.0012  -0.0000
0.0004  0.0010  -0.0013  0.0000  -0.0001  0.0001  -0.0010  0.0009  -0.0012  0.0000  0.0000
0.0000  0.0000  -0.0000  -0.0000  0.0000  -0.0000  -0.0000  0.0000  -0.0000  0.0000  0.0000

```

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 15.** Dados de correlação entre os parâmetros encontrados.

```

corr =
1.0000  0.9975  -0.9987  0.0670  -0.0670  0.0670  0.0412  0.0022  -0.0179  0.8639  0.0740
0.9979  1.0000  -0.9999  0.0680  -0.0680  0.0680  0.0516  -0.0120  -0.0470  0.8401  0.0740
-0.9990 -0.9997  1.0000  -0.0676  0.0676  -0.0676  -0.0489  0.0086  0.0404  -0.8485  -0.0755
0.0830  0.0841  -0.0836  1.0000  -1.0000  1.0000  0.0611  -0.0378  0.0701  0.0268  -0.0680
-0.0830 -0.0841  0.0836  -1.0000  1.0000  -1.0000  -0.0611  0.0378  -0.0701  -0.0268  0.0680
0.0830  0.0841  -0.0836  1.0000  -1.0000  1.0000  0.0611  -0.0378  0.0701  0.0268  -0.0680
0.0427  0.0531  -0.0504  0.0602  -0.0602  0.0602  1.0000  -0.9659  -0.0306  -0.1405  -0.3731
0.0010  -0.0131  0.0098  -0.0374  0.0374  -0.0374  -0.9659  1.0000  0.2542  0.1094  0.1426
-0.0178 -0.0468  0.0403  0.0712  -0.0712  0.0712  -0.0305  0.2541  1.0000  -0.2104  -0.6115
0.8609  0.8368  -0.8453  0.0136  -0.0136  0.0136  -0.1419  0.1105  -0.2103  1.0000  0.3538
0.0720  0.0719  -0.0734  -0.0692  0.0692  -0.0692  -0.3733  0.1427  -0.6114  0.3524  1.0000

```

Fonte: Acervo pessoal.

**Figura 16.** Dados de desvio padrão obtidos para cada parâmetro.

```
dp =  
1.0e+005 *  
0.2315  
0.5668  
0.7405  
0.1814  
2.3938  
1.8213  
3.2600  
3.9992  
2.7340  
0.0212  
0.0000
```

Fonte: Acervo pessoal.

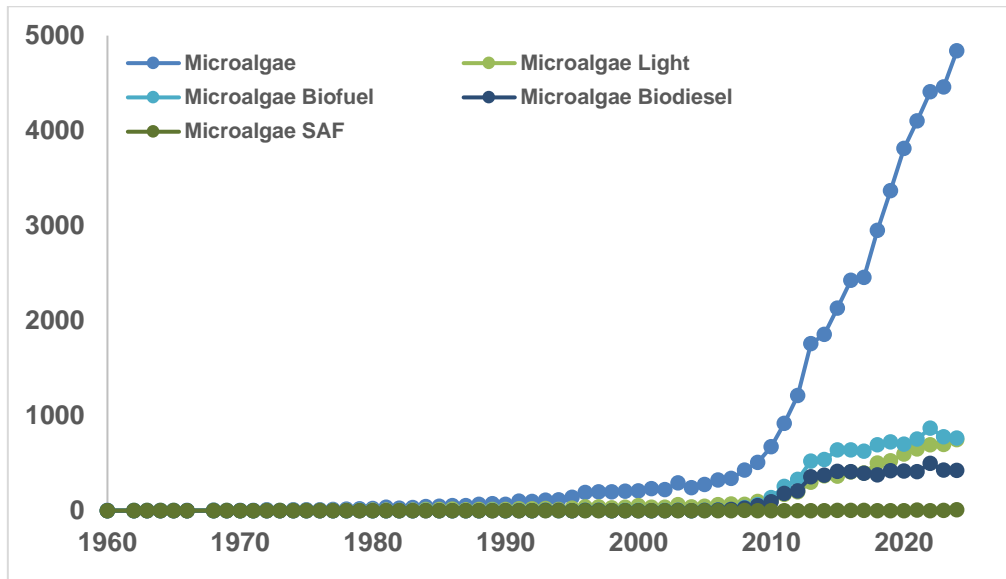
Para análises posteriores, com base nos resultados estatísticos apresentados, é possível avaliar a confiabilidade de cada parâmetro e compreender como os parâmetros influenciam os outros.

## **4.2. Análise da Literatura**

### **4.2.1. Publicações por Ano**

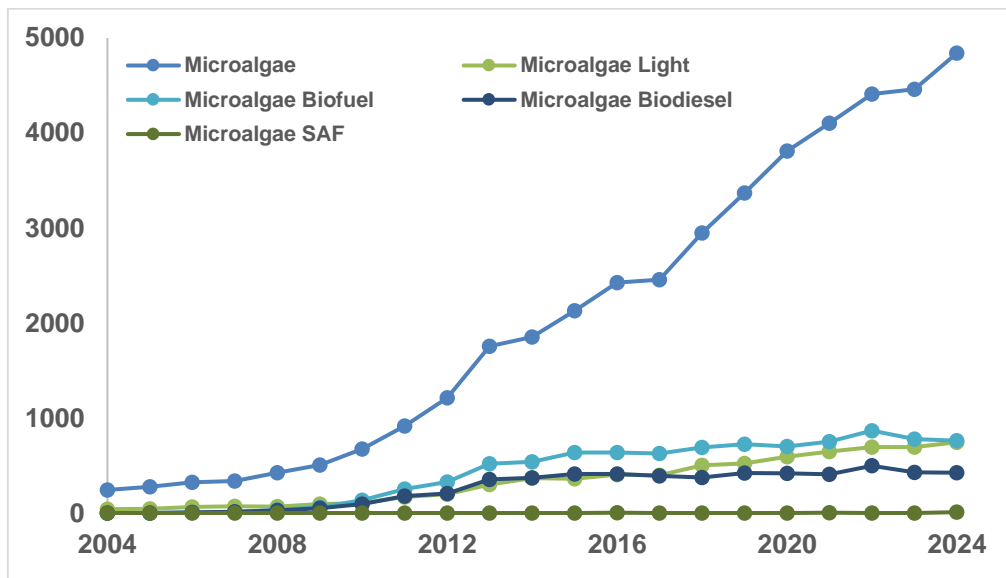
A evolução da literatura científica sobre biodiesel e combustíveis sustentáveis de aviação (SAF) derivados de microalgas apresenta tendências distintas ao longo do tempo. A análise dos dados revela que após a primeira publicação mapeada relacionada com microalgas, em 1960, até cerca de 1990, para todas as palavras-chave, observa-se um número insignificante de publicações, sugerindo um estágio incipiente da pesquisa na área. Também, observa-se um crescimento exponencial nas publicações relacionadas a microalgas a partir de 2004, conforme representado pela Figura 17, indicando um aumento significativo no interesse acadêmico e tecnológico pela utilização de microalgas em processos biotecnológicos devido ao aumento da preocupação ambiental e busca por alternativas energéticas.

**Figura 17.** Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chaves, com limite de duas palavras, entre 1960 e 2024.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

**Figura 18.** Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chaves, com limite de duas palavras, entre 2004 e 2024.



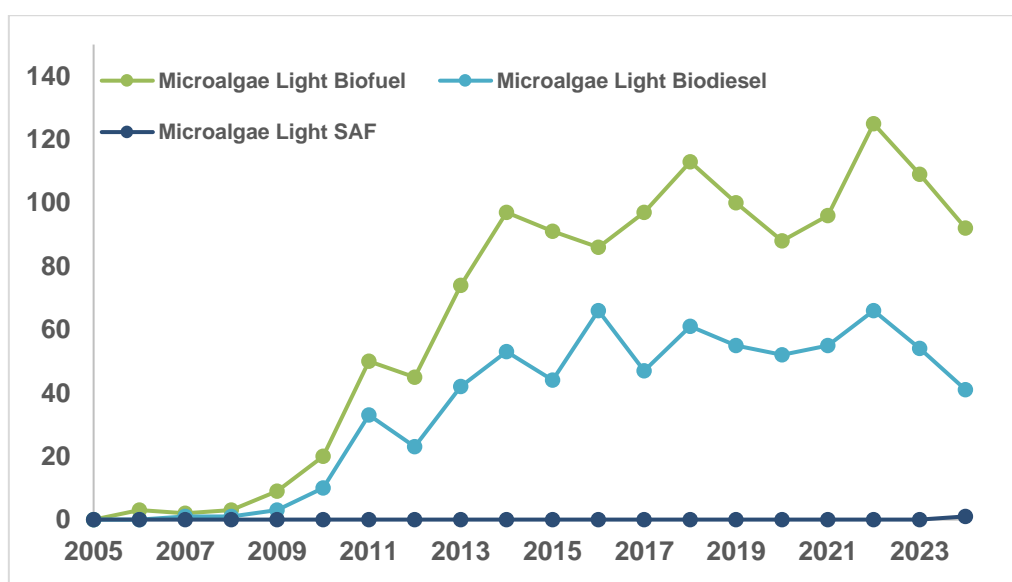
Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

As publicações relacionadas a microalgas e luz ("Microalgae" e "Light") permaneceram insignificantes até 2008 e, posteriormente, apresentaram um crescimento modesto, especialmente quando comparado ao aumento expressivo de estudos sobre microalgas de maneira geral.

O aumento nas publicações sobre biocombustíveis de microalgas, especialmente biodiesel ("Microalgae" e "Biodiesel"), tornou-se mais evidente após 2008. Esse crescimento coincide com eventos críticos, como a crise do petróleo e a intensificação de políticas ambientais voltadas para a redução da emissão de carbono. Além disso, o período pós-2010 revela uma estabilização relativa na quantidade de estudos sobre biodiesel de microalgas. Esse padrão sugere que a pesquisa sobre biodiesel pode ter atingido um nível alto de maturidade, enquanto o SAF de microalgas ("Microalgae" e "SAF") permanece um campo pouco explorado, evidenciado pelo número reduzido de publicações ao longo do período analisado.

Ademais, foram analisadas as publicações relacionadas a microalgas e luz associadas a biocombustíveis ("Microalgae Light Biofuel"), biodiesel ("Microalgae Light Biodiesel") e SAF ("Microalgae Light SAF"). Conforme apresentado na Figura 19, os padrões dos números de publicações sobre biocombustíveis e biodiesel apresentam oscilações, com períodos de crescimento e redução, mas, no geral, mantêm uma tendência de aumento. Já as publicações relacionadas a microalgas, luz e SAF, novamente, foram insignificantes, sendo registrada apenas uma publicação em 2024, indicando um campo ainda pouco explorado. É importante destacar que as primeiras publicações sobre microalgas e luz associadas a biocombustíveis ("Microalgae Light Biofuel") e biodiesel ("Microalgae Light Biodiesel") ocorreram, respectivamente, em 1993 e 2007.

**Figura 19.** Quantidade de publicações por ano com diferentes combinações de palavras-chaves, com três palavras, entre 2005 e 2024.

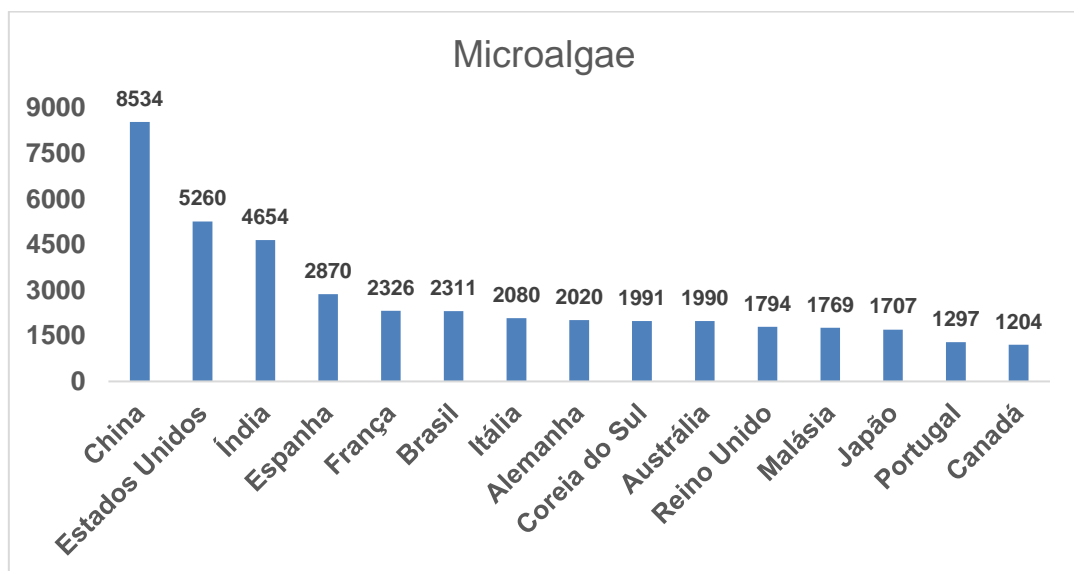


Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

#### 4.2.2. Publicações por Países

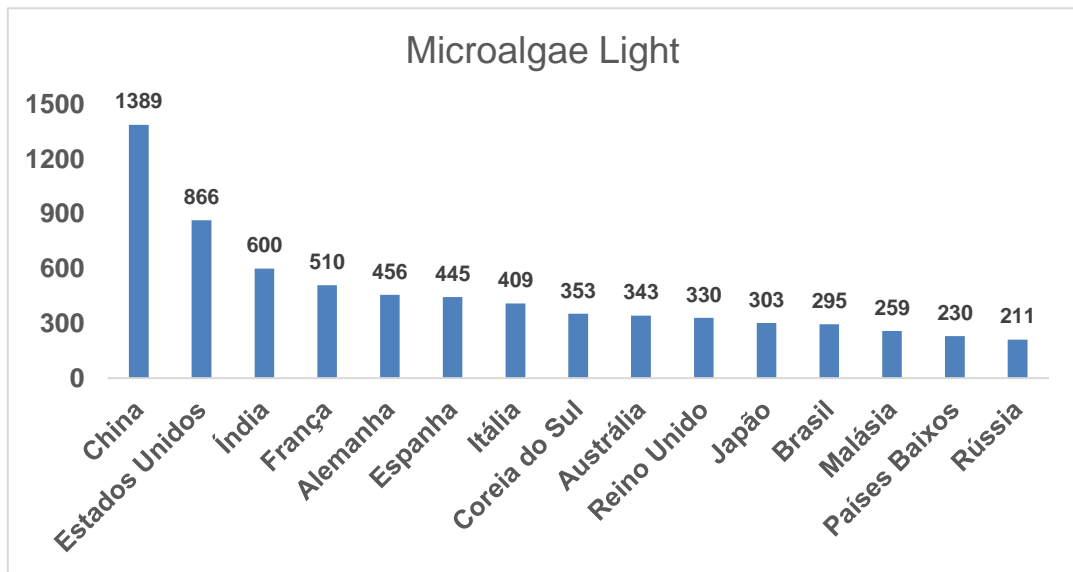
Através da Figura 20, observa-se que a China lidera a pesquisa sobre microalgas, com 8.534 publicações, refletindo seu forte investimento em biotecnologia e sustentabilidade. Os Estados Unidos (5.260) e a Índia (4.654) também são centros de pesquisa, impulsionados por políticas de inovação energética. A Europa, por sua vez, representada por Espanha (2.870), França (2.326), Itália (2.080) e Alemanha (2.020), tem se destacado no desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. Por fim, entre os países mais relevantes em publicações relacionadas a microalgas, destaca-se o Brasil, com 2.311 publicações. Para publicações relacionadas com microalga e luz (Figura 21), há um comportamento parecido, com exceção do Brasil, que perde um pouco de relevância.

**Figura 20.** Quantidade de publicações por país com a palavra-chave “Microalgae”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

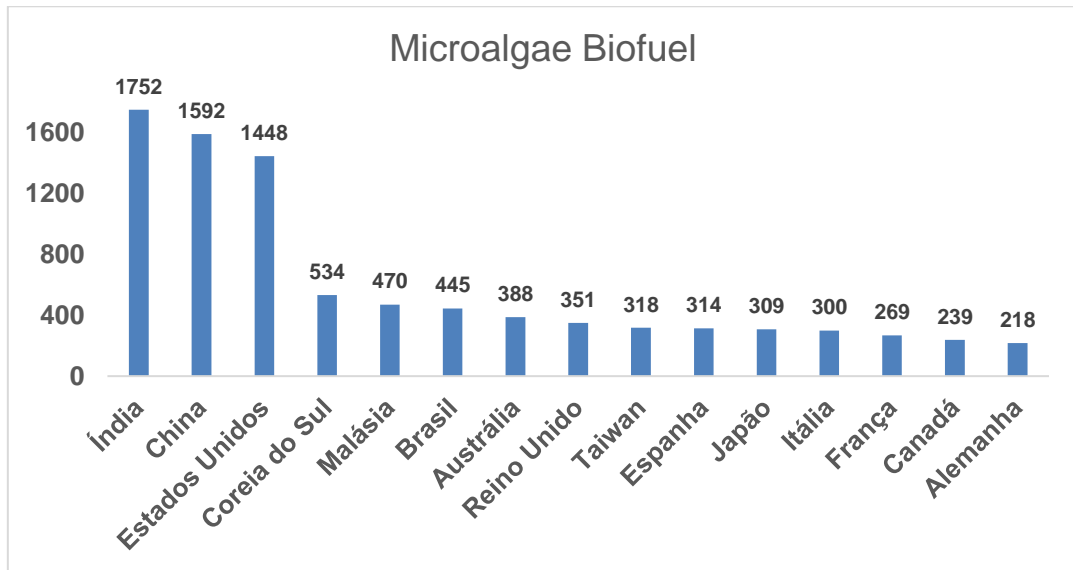
**Figura 21.** Quantidade de publicações por país com as palavras-chaves “Microalgae” e “Light”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

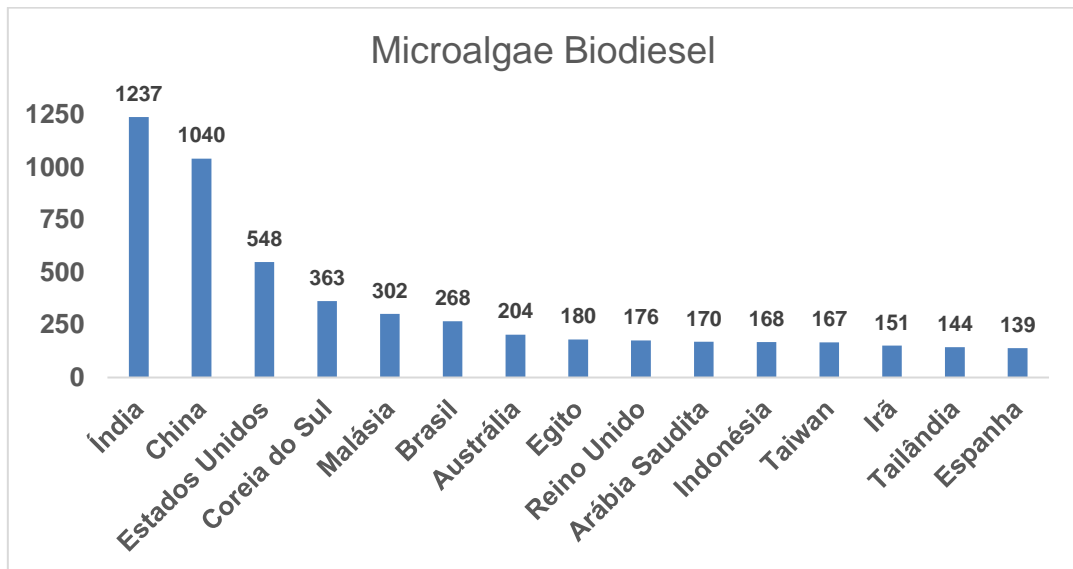
Diferente do padrão geral da pesquisa sobre microalgas e microalgas com luz, onde a China lidera, para biocombustíveis e biodiesel a Índia assume a posição de maior destaque, com 1.752 e 1.237 publicações, respectivamente, superando a China (1.592 e 1.040), conforme Figuras 22 e 23. Isso sugere um foco maior da Índia em aplicações energéticas de microalgas, alinhado à sua demanda por alternativas sustentáveis. Os Estados Unidos (1.448 para biocombustíveis, 548 para biodiesel) continuam sendo um polo relevante devido aos investimentos em energia renovável. Coreia do Sul (534 e 363) e Malásia (470 e 302) mostram crescimento contínuo, impulsionados por incentivos governamentais e transição energética. O interesse crescente do Sudeste Asiático indica também esforços e investimentos nesse setor.

**Figura 22.** Quantidade de publicações por país com as palavras-chaves “Microalgae” e “Biofuel”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

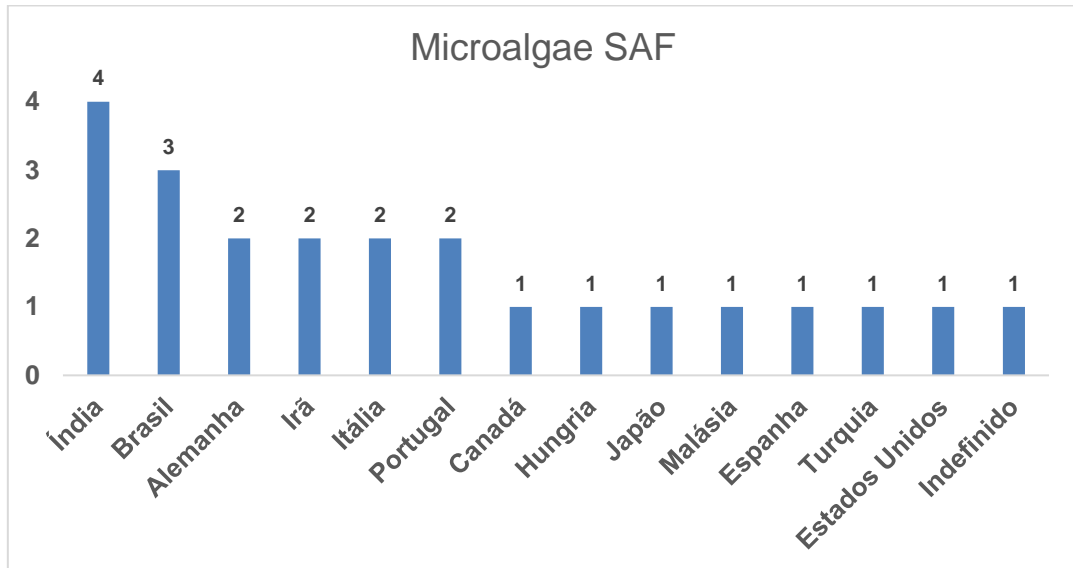
**Figura 23.** Quantidade de publicações por país com as palavras-chaves “Microalgae” e “Biodiesel”



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

A pesquisa sobre "Microalgae SAF" ainda é incipiente, com a Índia (4) liderando, seguida pelo Brasil (3) e Alemanha (2), conforme a Figura 24. O baixo número de publicações reflete desafios na viabilidade comercial e tecnológica. No entanto, a crescente pressão para reduzir emissões no setor de aviação pode impulsionar estudos futuros.

**Figura 24.** Quantidade de publicações por país com as palavras-chaves “Microalgae” e “SAF”.

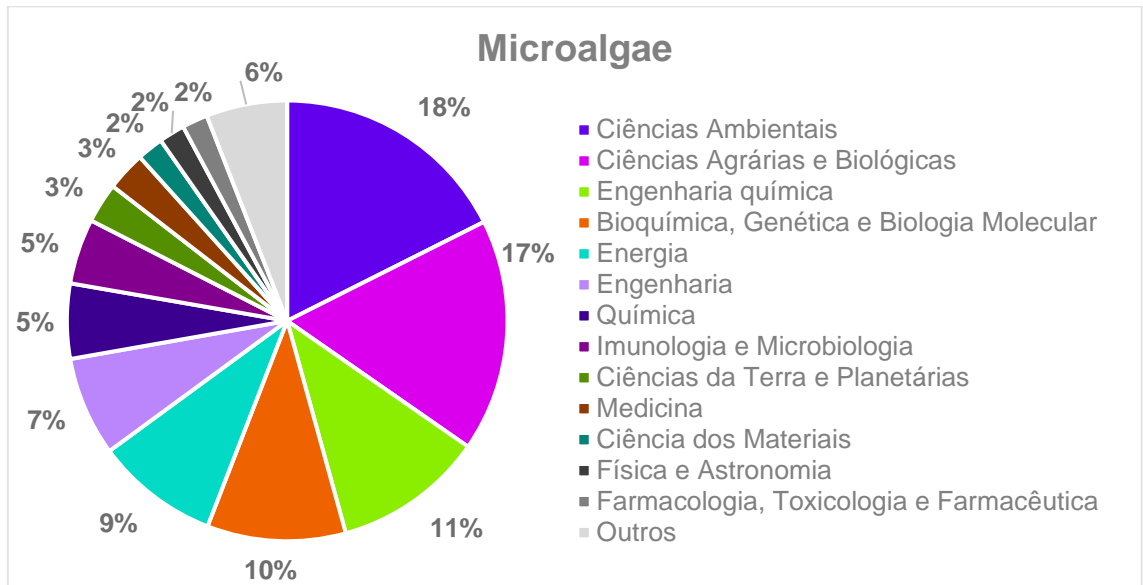


Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

#### 4.2.3. Publicações por Áreas de Pesquisa

A Figura 25 mostra a distribuição das publicações para a palavra-chave "Microalgae". Observa-se que as áreas de Ciências Ambientais (18%) e Ciências Agrárias e Biológicas (17%) dominam a produção científica, seguidas pela Engenharia Química (11%) e Bioquímica, Genética e Biologia Molecular (10%). Essas distribuições indicam que a pesquisa com microalgas ainda está fortemente voltada para estudos de bioprocessos e ambientais.

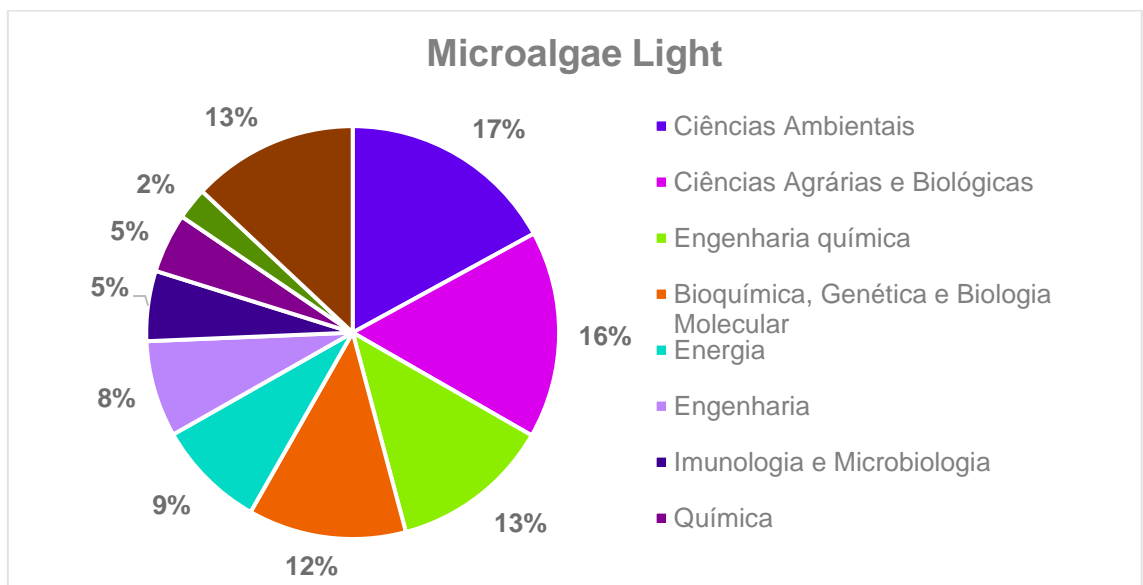
**Figura 25.** Quantidade de publicações por área de pesquisa com a palavra-chave “Microalgae”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

A Figura 26, que analisa as palavras-chave "Microalgae" e "Light" combinadas, mostra uma tendência similar, mas com um aumento na participação das áreas de Engenharia Química e Bioquímica, Genética e Biologia Molecular (13% e 12%, respectivamente).

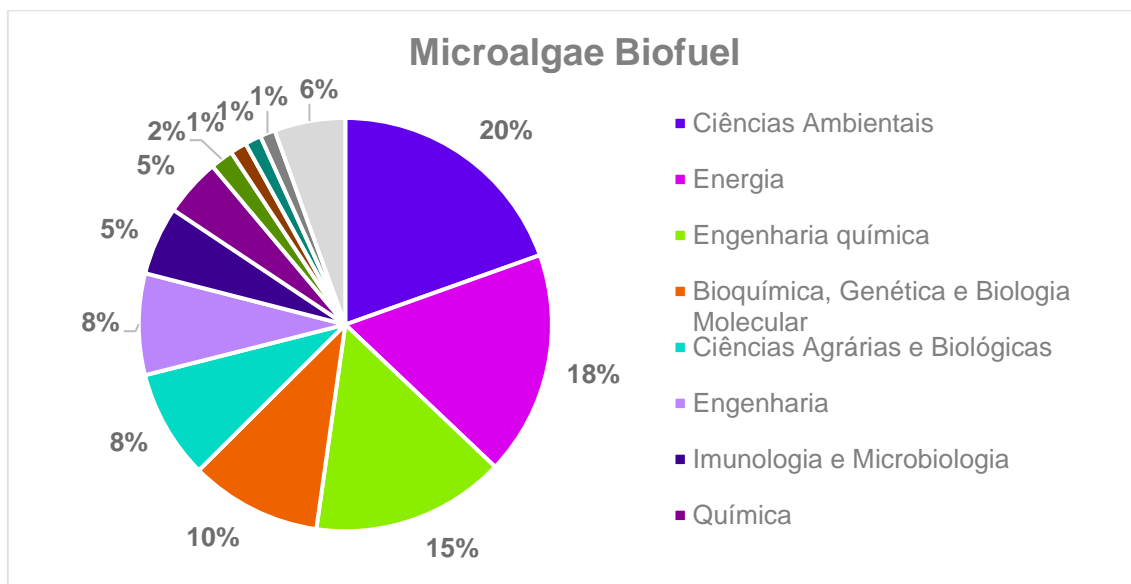
**Figura 26.** Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “Light”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

Quando a busca inclui as palavras-chave "Microalgae" e "Biofuel" (Figura 27), há um aumento significativo na área de Energia (18%) e Engenharia Química (15%), enquanto as Ciências Ambientais continuam a ter um papel de destaque (20%). Essa tendência reflete o crescente interesse em otimizar a conversão de microalgas em fontes de energia renovável.

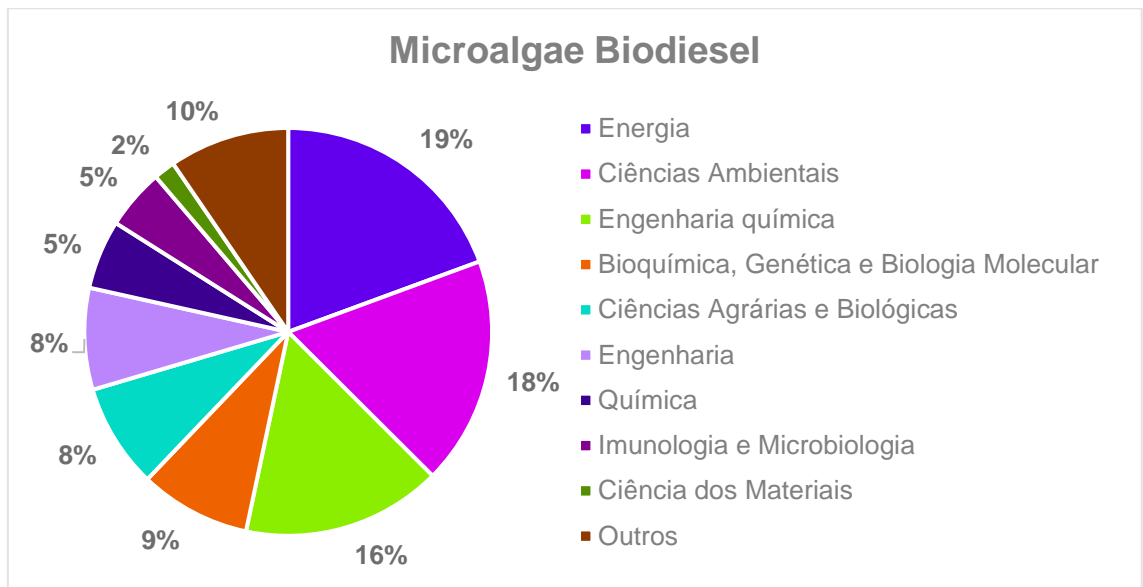
**Figura 27.** Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave "Microalgae" e "Biofuel".



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

No caso das palavras-chave "Microalgae" e "Biodiesel" (Figura 28), observa-se uma distribuição equilibrada entre Energia (19%), Ciências Ambientais (18%) e Engenharia Química (16%).

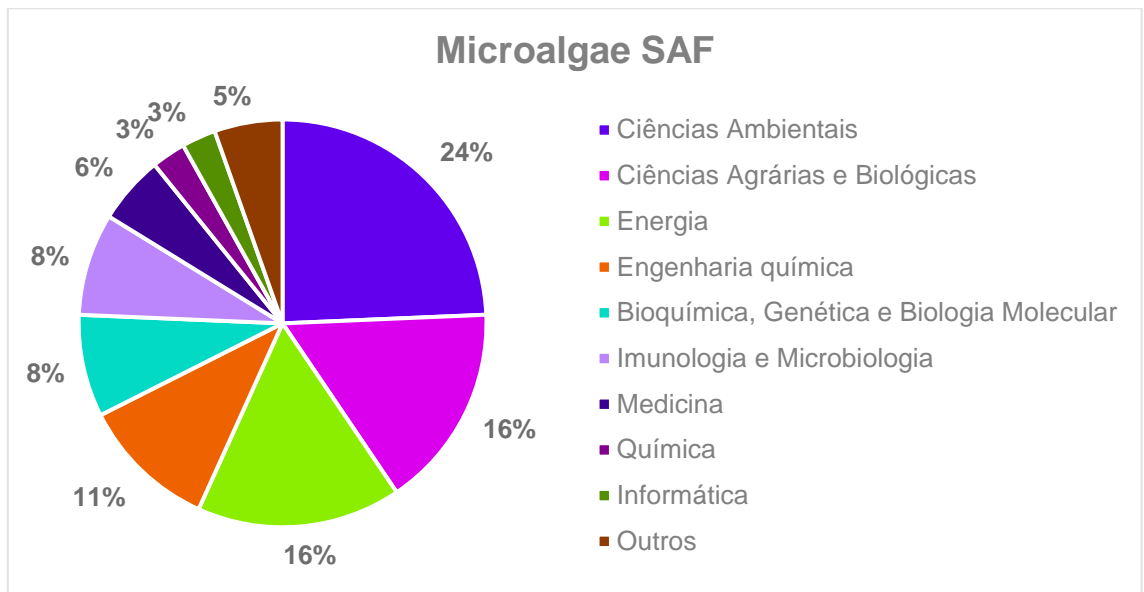
**Figura 28.** Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “Biodiesel”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

Por fim, a análise das palavras-chave "Microalgae" e "SAF" (Figura 29), com significativa diminuição na quantidade de produção científica, conforme destacado nos itens anteriores, revela uma predominância ainda maior das Ciências Ambientais (24%), seguidas por Ciências Agrárias e Biológicas (16%) e Energia (16%). Isso sugere que a pesquisa sobre combustíveis sustentáveis de aviação ainda está em estágios iniciais, com forte foco na produção de biomassa e sustentabilidade.

**Figura 29.** Quantidade de publicações por área de pesquisa com as palavras-chave “Microalgae” e “SAF”.



Fonte: Adaptado de SCOPUS, 2025.

De forma geral, os resultados indicam que a pesquisa sobre microalgas é diversificada, mas com maior concentração de estudos na área de Ciências Ambientais. Espera-se, também, que nos próximos anos haja um aumento nas publicações em Engenharia Química e Energia, refletindo avanços em processos industriais e técnicas de otimização da produção de combustíveis.

Além disso, a interseção entre Bioquímica, Engenharia e Ciências Ambientais sugere que futuros desenvolvimentos envolverão engenharia genética de microalgas para aumentar a produtividade de biomassa desejável para melhorar a eficiência da conversão em combustíveis.

## 5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Em conclusão, a partir dos resultados experimentais apresentados, pode-se concluir que o modelo matemático apresentou boa capacidade preditiva para a intensidade média de luz, para a concentração celular e para a concentração de produtos, principalmente devido à proximidades nos valores simulados com os experimentais.

Ademais, em relação aos comprimentos de onda, pode-se observar pelos parâmetros ajustados que a luz azul é a que apresentou um  $\mu_{\max}$  consideravelmente maior que as luzes verde e vermelha, o que sugere, em um primeiro momento, que a microalga cresceu mais rapidamente sob influência da luz azul em comparação às outras faixas de luz. Portanto, em trabalhos futuros, deve-se se atentar para essa hipótese de modo a investigá-la com mais profundidade.

Também se destaca o alto desvio padrão encontrado para os parâmetros, possivelmente decorrente da quantidade limitada de dados experimentais, especialmente para a luz azul, que apresentou um  $\mu_{\max}$  com desvio padrão de 0,7405. Para refinar os parâmetros ajustados, trabalhos futuros podem explorar comprimentos de onda específicos, realizando cultivos isolados com luz vermelha, verde e azul. Ainda em relação aos comprimentos de onda, foi observada uma alta correlação entre os parâmetros  $\mu_{\max R}$ ,  $\mu_{\max G}$ ,  $\mu_{\max B}$ .

Em relação à intensidade de luz, não foram testadas experimentalmente diferentes intensidades, não sendo possível, portanto, analisar criteriosamente o seu efeito na produtividade de óleos da microalga cultivada. Porém, em geral, grande quantidade dos estudos da literatura analisados no presente trabalho expõe intensidades ótimas de luz na faixa entre 150 e 200  $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , a depender da espécie e demais condições de cultivo. Adicionalmente, os parâmetros de intensidade ótima para verde e azul encontrados no ajuste estão próximos a essa faixa - sendo o da luz verde (183,6  $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) ligeiramente maior em comparação à azul (133,8  $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) - com exceção do parâmetro para luz vermelha, que apresentou um valor significativamente menor (81,0  $\mu\text{mol fóton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Essa observação sugere que, no contexto específico destas condições experimentais, a luz vermelha pode ter uma importância menor ou diferente em comparação com as outras faixas de luz.

Entretanto, para a literatura analisada, verifica-se uma predominância da luz azul e vermelha, isoladamente ou em combinação, como os espectros mais eficientes para o crescimento das microalgas e a produção de biomassa. Em contrapartida, a luz verde apresenta menor impacto nesses processos.

Ao comparar os resultados experimentais com os dados da literatura, observa-se uma concordância na relevância da luz azul. No entanto, experimentalmente, o efeito da luz

vermelha foi menos significativo. Essa discrepância pode estar relacionada a diferenças nas condições de cultivo, na espécie de microalga utilizada ou a limitações da modelagem aplicada.

Por fim, experimentalmente, concluiu-se que, em relação ao objetivo principal da pesquisa, obteve-se êxito em modelar matematicamente o fenômeno de forma aceitável, obter parâmetros ajustados coerentes e possíveis por meio do *Simulated Annealing*, e analisar o efeito das faixas de luz RGB.

A análise da literatura evidenciou um crescimento exponencial nas publicações relacionadas a microalgas a partir de 2004, refletindo um aumento no interesse por suas aplicações biotecnológicas. No entanto, o volume de estudos sobre microalgas em associação com luz ou biocombustíveis não acompanhou essa tendência, apresentando uma estabilização desde 2013. Essa constatação sugere que as pesquisas sobre esses temas atingiram um certo grau de maturidade científica, enquanto os estudos gerais sobre microalgas continuam em expansão, explorando novas abordagens e aplicações.

Em relação aos países, observou-se uma maior concentração da produção científica na China, Índia e Estados Unidos, com destaque para a Índia, que apresenta uma expressiva quantidade de estudos específicos voltados aos biocombustíveis. O Brasil também demonstrou relevância na área, consolidando-se como um polo emergente de pesquisa em bioenergia, especialmente na produção de biocombustíveis.

Por fim, no que se refere às áreas de estudo, verificou-se uma predominância das ciências ambientais, evidenciando o potencial das microalgas não apenas na produção de biodiesel e SAF, mas também em aplicações voltadas para a mitigação de impactos ambientais, como o sequestro de carbono, a remediação de águas contaminadas e o aproveitamento de resíduos industriais.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 2023, L. G. A produção de biocombustíveis ameaça a segurança alimentar? - Agro in Data - Insper. Disponível em: <<https://agro.insper.edu.br/agro-in-data/artigos/a-producao-de-biocombustiveis-ameaca-a-seguranca-alimentar>>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- A. LEDUY; THERIEN, N. An improved method for optical density measurement of the semimicroscopic blue green alga *Spirulina maxima*. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 19, n. 8, p. 1219–1224, 1 ago. 1977.
- ABIUSI, F. et al. Growth, photosynthetic efficiency, and biochemical composition of *Tetraselmis suecica* F&M-M33 grown with LEDs of different colors. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 111, n. 5, p. 956–964, 27 ago. 2013.
- ABOU KHEIRA, A. A.; ATTA, N. M. M. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficits: Yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 10, p. 1343–1350, out. 2009.
- ANANTHI, V. et al. A realistic scenario on microalgae based biodiesel production: Third generation biofuel. *Fuel*, v. 284, p. 118965, 15 jan. 2021.
- ANTONIO, F. et al. CONDIÇÕES DE PRÉ-TRATAMENTO DO GLICEROL PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL UTILIZANDO PLANEJAMENTO... Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/271020517\\_CONDICAOES\\_DE\\_PRE-TRATAMENTO\\_DO\\_GLICEROL\\_PROVENIENTE\\_DA\\_PRODUCAO\\_DE\\_BIODIESEL\\_UTILIZANDO\\_PLANEJAMENTO\\_EXPERIMENTAL\\_PLACKETT\\_BURMAN](https://www.researchgate.net/publication/271020517_CONDICAOES_DE_PRE-TRATAMENTO_DO_GLICEROL_PROVENIENTE_DA_PRODUCAO_DE_BIODIESEL_UTILIZANDO_PLANEJAMENTO_EXPERIMENTAL_PLACKETT_BURMAN)>. Acesso em: 7 jan. 2025.
- ANYANWU, R. C. et al. Evaluation of Growth Rate and Biomass Productivity of *Scenedesmus quadricauda* and *Chlorella vulgaris* under Different LED Wavelengths and Photoperiods. *Sustainability*, v. 14, n. 10, p. 6108, 17 maio 2022.
- BAIDYA, A. et al. Effect of different wavelengths of LED light on the growth, chlorophyll,  $\beta$ -carotene content and proximate composition of *Chlorella ellipsoidea*. *Heliyon*, v. 7, n. 12, 1 dez. 2021.
- BENMOUSSA-DAHMEN, I. et al. Salinity stress increases lipid, secondary metabolites and enzyme activity in *Amphora subtropica* and *Dunaliella* sp. for biodiesel production. *Bioresource Technology*, v. 218, p. 816–825, out. 2016.

BORAH, D. et al. An Integrated Approach for Simultaneous Monitoring and Data Acquisition on the Culture of Green Microalga *Chlorella homosphaera* Using Different LED Illumination. *BioEnergy Research*, v. 16, n. 1, p. 1–10, 27 abr. 2022.

CALIXTO, C. D. et al. Biochemical compositions and fatty acid profiles in four species of microalgae cultivated on household sewage and agro-industrial residues. *Bioresource technology*, v. 221, p. 438–446, dez. 2016.

CETESB. Ficha de Informação de Produto Químico.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, v. 25, n. 3, p. 294–306, maio 2007.

CHU, B. et al. Performance of led with mixed wavelengths or two-phase culture on the growth and lipid accumulation of *Chlorella pyrenoidosa*. *International journal of agricultural and biological engineering*, v. 14, n. 1, p. 90–96, 10 fev. 2021.

DE ALMEIDA MOREIRA, B. R. et al. Meta-Analytic Review on Third-Generation Biodiesel. *BioEnergy Research*, v. 15, n. 1, p. 27–45, 12 jan. 2021.

DOMINGOS ZAPAROLLI. O desafio do setor aéreo para anular sua pegada de carbono. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-desafio-do-setor-aereo-para-anular-sua-pegada-de-carbono/>>. Acesso em: 10 jan. 2025.

FAN, J. et al. Sequential heterotrophy–dilution–photoinduction cultivation for efficient microalgal biomass and lipid production. *Bioresource Technology*, v. 112, p. 206–211, maio 2012.

FRANCO, A. L. C. et al. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. *Química Nova*, v. 36, n. 3, p. 437–448, 2013.

GOSWAM, R. C. D. *Scenedesmus dimorphus* and *Scenedesmus quadricauda* : two potent indigenous microalgae strains for biomass production and CO<sub>2</sub> mitigation -A study on their growth behavior and lipid productivity under different concentration of urea as nitrogen source. v. 2, n. 4, p. 42–49, 2011.

GOUVEIA, L.; OLIVEIRA, A. C. Microalgae as a raw material for biofuels production. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, v. 36, n. 2, p. 269–274, 4 nov. 2008.

GRIS, B. et al. Cultivation of *Scenedesmus obliquus* in Photobioreactors: Effects of Light Intensities and Light–Dark Cycles on Growth, Productivity, and Biochemical Composition. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 172, n. 5, p. 2377–2389, 28 dez. 2013.

GUEDES, V. C.; PALMA, G. M.; HORTA, A. C. L. An evaluation of light wavelengths, intensity and control for the production of microalgae in photobioreactors: a review. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. N/A, p. 14, 2024.

GUMBI, S. T. et al. Isolation, Identification and High-Throughput Screening of Neutral Lipid Producing Indigenous Microalgae from South African Aquatic Habitats. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 182, n. 1, p. 382–399, 18 nov. 2016.

HILL, A. M.; A, F. D. Fuel from microalgae lipid products. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/6772769>>. Acesso em: 7 dez. 2024.

IASIMONE, F. et al. Effect of light intensity and nutrients supply on microalgae cultivated in urban wastewater: Biomass production, lipids accumulation and settleability characteristics. *Journal of Environmental Management*, v. 223, p. 1078–1085, out. 2018.

ILLMAN, A. M.; SCRAGG, A. H.; SHALES, S. W. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 27, n. 8, p. 631–635, nov. 2000.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistemico-da-producao-agricola.html>>.

JUNG, J.-H. et al. Effects of green LED light and three stresses on biomass and lipid accumulation with two-phase culture of microalgae. *Process Biochemistry*, v. 77, p. 93–99, fev. 2019.

KAUR, S. et al. Fatty acid profiling and molecular characterization of some freshwater microalgae from India with potential for biodiesel production. *New Biotechnology*, v. 29, n. 3, p. 332–344, fev. 2012.

KIM, S. H. et al. Lipid and unsaturated fatty acid productions from three microalgae using nitrate and light-emitting diodes with complementary LED wavelength in a two-phase culture system. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 42, n. 9, p. 1517–1526, 20 maio 2019.

KIM, S. H. et al. Improvement of unsaturated fatty acid production from *Porphyridium cruentum* using a two-phase culture system in a photobioreactor with light-emitting diodes (LEDs). *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 7 dez. 2020.

KOC, C.; KOMMAREDDY, A.; ANDERSON, G. A. Use of Red and Blue Light-Emitting Diodes (LED) and Fluorescent Lamps to Grow Microalgae in a Photobioreactor. *Israeli Journal of Aquaculture - Bamidgeh*, 1 jan. 2013.

KULA, M. et al. Metabolic activity, the chemical composition of biomass and photosynthetic activity of *Chlorella vulgaris* under different light spectra in photobioreactors. *Engineering in Life Sciences*, v. 14, n. 1, p. 57–67, jan. 2014.

KUMAR, A.; GURIA, C.; PATHAK, A. K. Potential CO<sub>2</sub> fixation and optimal *Dunaliella tertiolecta* cultivation: Influence of fertilizer, wavelength of light-emitting diodes, salinity and carbon supply strategy. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, v. 22, p. 164–177, dez. 2017.

KWON, H. K. et al. Laboratory Study for the Phytoremediation of Eutrophic Coastal Sediment Using Benthic Microalgae and Light Emitting Diode (LED). v. 58, n. 2, p. 417–425, set. 2013.

LIU, J. et al. Effects of Light Intensity on the Growth and Lipid Accumulation of Microalga *Scenedesmus* sp. 11-1 Under Nitrogen Limitation. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 166, n. 8, p. 2127–2137, 14 mar. 2012.

LOHMAN, E. J. et al. An efficient and scalable extraction and quantification method for algal derived biofuel. *Journal of Microbiological Methods*, v. 94, n. 3, p. 235–244, set. 2013.

LV, B. et al. Effect of Different Colored LED Lighting on the Growth and Pigment Content of *Isochrysis zhanjiangensis* under Laboratory Conditions. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, n. 11, p. 1752, 1 nov. 2022.

MALTSEV, Y. et al. Influence of Light Conditions on Microalgae Growth and Content of Lipids, Carotenoids, and Fatty Acid Composition. *Biology*, v. 10, n. 10, p. 1060, 18 out. 2021.

MAO, R.; GUO, S. Performance of the mixed LED light quality on the growth and energy efficiency of *Arthrospira platensis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 102, n. 12, p. 5245–5254, 24 abr. 2018.

MARKOU, G. Effect of Various Colors of Light-Emitting Diodes (LEDs) on the Biomass Composition of *Arthrospira platensis* Cultivated in Semi-continuous Mode. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 172, n. 5, p. 2758–2768, 17 jan. 2014.

MARQUES, B. F. T. Efeito de diferentes tipos de luz LED e meios de cultura na concentração de pigmentos em microalgas.

MARTARELLI, NÁDIA JUNQUEIRA; NAGANO, M. S. How have high-impact scientific studies designing their experiments on mixed data clustering? A systematic map to guide better choices. *Machine Learning with Applications*, v. 5, p. Se 2021, 2021.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, NIDIA. S. Microalgae for Biodiesel Production and Other applications: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 1, p. 217–232, jan. 2010.

NATRAH, F. M. I. et al. Screening of Malaysian indigenous microalgae for antioxidant properties and nutritional value. *Journal of Applied Phycology*, v. 19, n. 6, p. 711–718, 12 jul. 2007.

NIELSEN, D. C. OILSEED PRODUCTIVITY UNDER VARYING WATER AVAILABILITY. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/242244321\\_OILSEED\\_PRODUCTIVITY\\_UNDE R\\_VARYING\\_WATER\\_AVAILABILITY](https://www.researchgate.net/publication/242244321_OILSEED_PRODUCTIVITY_UNDE R_VARYING_WATER_AVAILABILITY)>.

OKUMURA, C. et al. Economic efficiency of different light wavelengths and intensities using LEDs for the cultivation of green microalga *Botryococcus braunii* (NIES-836) for biofuel production. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, v. 34, n. 1, p. 269–275, 3 fev. 2014.

ONAY, M. et al. Thermo-resistant green microalgae for effective biodiesel production: Isolation and characterization of unialgal species from geothermal flora of Central Anatolia. *Bioresource Technology*, v. 169, p. 62–71, out. 2014.

PALMA, G. M.; HORTA, A. C. L. Avaliação da viabilidade do uso de redes neurais artificiais para o desenvolvimento de um softsensor de biomassa de microalgas em fotobiorreator. Disponível em: <[https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/SCAR\\_4438545e3dba0093c2c8dd1a9f4dd03a](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/SCAR_4438545e3dba0093c2c8dd1a9f4dd03a)>. Acesso em: 17 jan. 2025.

PARK, J.; DINH, T. B. Contrasting effects of monochromatic LED lighting on growth, pigments and photosynthesis in the commercially important cyanobacterium *Arthrospira maxima*. *Bioresource Technology*, v. 291, p. 121846, nov. 2019.

PETERSON, C. L.; HUSTRULID, T. CARBON CYCLE FOR RAPESEED OIL BIODIESEL FUELS. *Biomass and Bioenergy*, v. 14, n. 2, p. 91–101, 23 mar. 1998.

PRUVOST, J. et al. Systematic investigation of biomass and lipid productivity by microalgae in photobioreactors for biodiesel application. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 1, p. 150–158, 1 jan. 2011.

RA, C. H. et al. Effects of light-emitting diode (LED) with a mixture of wavelengths on the growth and lipid content of microalgae. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 41, n. 4, p. 457–465, 19 dez. 2017.

RATHBAUER, J.; PRANKL, H.; KRAMMER, K. Energetic use of natural vegetable oil in Austria. [s.l: s.n.]. Acesso em: 6 jan. 2025.

REIJNDERS, L.; HUIJBREGTS, M. A. J. Biogenic greenhouse gas emissions linked to the life cycles of biodiesel derived from European rapeseed and Brazilian soybeans. *Journal of Cleaner Production*, v. 16, n. 18, p. 1943–1948, dez. 2008.

SALADINI, F. et al. Guidelines for energy evaluation of first, second and third generation biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 221–227, dez. 2016.

SIRISUK, P. et al. Effects of wavelength mixing ratio and photoperiod on microalgal biomass and lipid production in a two-phase culture system using LED illumination. *Bioresource Technology*, v. 253, p. 175–181, abr. 2018.

STEELE, J. H. ENVIRONMENTAL CONTROL OF PHOTOSYNTHESIS IN THE SEA. *Limnology and Oceanography*, v. 7, n. 2, p. 137–150, abr. 1962.

SUAREZ, P. A. Z. et al. Biocombustíveis a partir de óleos e gorduras: desafios tecnológicos para viabilizá-los. *Química Nova*, v. 32, n. 3, p. 768–775, 2009.

Sustentabilidade na aviação comercial: desafios e oportunidades. Disponível em: <<https://www.mine-too.com/blog/sustentabilidade-na-aviacao-comercial-desafios-e-oportunidades>>. Acesso em: 5 jan. 2025.

TALEB, A. et al. Screening of freshwater and seawater microalgae strains in fully controlled photobioreactors for biodiesel production. *Bioresource Technology*, v. 218, p. 480–490, 1 out. 2016.

TALEBI, A. F. et al. Genetic manipulation, a feasible tool to enhance unique characteristic of *Chlorella vulgaris* as a feedstock for biodiesel production. *Molecular Biology Reports*, v. 40, n. 7, p. 4421–4428, 8 maio 2013.

TAMIYA, E.; HASE, E. KINETICS OF GROWTH OF CHLQRELLA, WITH SPECIAL REFERENCE TO ITS DEPENDENCE ON QUANTITY OF AVAILABLE LIGHT AND ON TEMPERATURE. [s.l: s.n.]. Acesso em: 7 nov. 2024.

TEO, C. L. et al. Enhancing growth and lipid production of marine microalgae for biodiesel production via the use of different LED wavelengths. *Bioresource Technology*, v. 162, p. 38–44, 1 jun. 2014.

THOMAS, N. Parâmetros cinéticos de reações de transesterificação metanólica de óleos vegetais determinados por análise termogravimétrica. *Utfpr.edu.br*, 2017.

THOMAZ, P. G.; ASSAD, R. S.; MOREIRA, L. F. P. Uso do Fator de impacto e do índice H para avaliar pesquisadores e publicações. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, v. 96, n. 2, p. 90–93, fev. 2011.

TIRONE, J. Biocombustíveis: como funciona o mercado e a importância do gerenciamento de riscos na cadeia – Hedgepoint Global Markets. Disponível em: <<https://hedgepointglobal.com/pt-br/blog/biocombustiveis-vantagens-e-desafios-para-a-sustentabilidade-energetica/>>. Acesso em: 7 jan. 2025.

TOMEI, J.; HELLIWELL, R. Food versus fuel? Going beyond biofuels. *Land Use Policy*, v. 56, p. 320–326, nov. 2016.

VADIVELLOO, A. et al. Effect of different light spectra on the growth and productivity of acclimated *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae). *Algal Research*, v. 8, p. 121–127, mar. 2015.

VEJRAZKA, C. et al. Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in flashing light. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 108, n. 12, p. 2905–2913, 23 ago. 2011.

VOLLMANN, J. et al. Agronomic evaluation of camelina genotypes selected for seed quality characteristics. *Industrial Crops and Products*, v. 26, n. 3, p. 270–277, out. 2007.

XIONG, W. et al. High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 78, n. 1, p. 29–36, fev. 2008.

ZAPPI, M. et al. A review of the engineering aspects of the biodiesel industry. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/228371677\\_A\\_review\\_of\\_the\\_engineering\\_aspects\\_of\\_the\\_biodiesel\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/228371677_A_review_of_the_engineering_aspects_of_the_biodiesel_industry)>.