

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MURILO GASPARIN RAMPI

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FOTOBIORREATORES A FLUXO DE AR
DE ELEVAÇÃO COM TUBOS SERIADOS PARA CULTIVO DE MICROALGAS

CURITIBA

2021

MURILO GASPARIN RAMPI

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FOTOBIORREATORES A FLUXO DE AR
DE ELEVAÇÃO COM TUBOS SERIADOS PARA CULTIVO DE MICROALGAS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. José Viriato Coelho Vargas

Coorientador: Dr. Wellington Balmant

Coorientador: Prof. Dr. Vanessa Merlo Kava

CURITIBA

2021

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

R177m	<p>Rampi, Murilo Gasparin Modelagem e simulação de fotobiorreatores a fluxo de ar de elevação com tubos seriados para cultivo de microalgas [recurso eletrônico] / Murilo Gasparin Rampi. – Curitiba, 2021.</p> <p>Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2021.</p> <p>Orientador: José Viriato Coelho Vargas – Coorientador: Wellington Balmant - Coorientador: Vanessa Merlo Kava</p> <p>1. Algas. 2. Microalgas - Cultivo. 3. Fotobiorreator. 3. Modelagem matemática. I. Universidade Federal do Paraná. II. Vargas, José Viriato Coelho. III. Balmant, Wellington. IV. Kava, Vanessa Merlo. V. Título.</p> <p>CDD: 579.8</p>
-------	--

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894




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


TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **MURILO GASPARIN RAMPI** intitulada: **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FOTOBIOREATOR A FLUXO DE AR DE ELEVAÇÃO COM TUBOS SERIADOS PARA CULTIVO DE MICROALGAS**, sob orientação do Prof. Dr. JOSE VIRIATO COELHO VARGAS, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.


CURITIBA, 01 de Outubro de 2021.



JOSE VIRIATO COELHO VARGAS
Presidente da Banca Examinadora



LUIZ ALBERTO DE OLIVEIRA ROCHA
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS)



ANDRE BELLIN MARIANO
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RESUMO

Os impactos ambientais causados pelas emissões de gases do efeito estufa são uma preocupação mundial, por essa razão a pesquisa de meios capazes de reduzir essas emissões se tornou fator crítico em nossa sociedade. As fontes de energia renováveis representam 14% da matriz energética mundial, enquanto no Brasil este percentual é de 45,3%, sendo que os biocombustíveis ocupam 6,9% desse total. A produção de biocombustíveis como o biodiesel e o etanol a partir de microalgas surge como uma alternativa a produção convencional que depende da soja e de outros produtos agrícolas. As microalgas podem ser cultivadas em fotobiorreatores compactos que possuem uma alta taxa de produção ocupando pequenas áreas. As microalgas podem ser usadas no tratamento de gases de combustão, já que esses gases podem acelerar o crescimento desses microrganismos. No entanto, processos de produção de microalgas em larga escala enfrentam problemas como a baixa concentração celular quando produzidas em lagoas ou o alto custo energético do processo como no caso de fotobiorreatores compactos. Para que a produção de microalgas se torne atrativa, é necessário desenvolver processos economicamente competitivos e por esse motivo o objetivo dessa pesquisa é desenvolver um fotobiorreator *airlift* de alta eficiência que possua volume grande o bastante para tratar gases de emissões em larga escala e ainda produzir biocombustíveis de qualidade. Será proposto um modelo matemático para o fotobiorreator projetado bem como a sua validação através de dados experimentais de outros estudos. O modelo descreve a cinética de crescimento da microalga levando em conta os seguintes parâmetros: concentração de oxigênio, concentração de gás carbônico, concentração de nitrato, concentração de fosfato, temperatura e luminosidade. O balanço de massa será feito para cada um dos componentes que participam da reação de acordo com a cinética de crescimento e as leis de transferência de massa entre o gás de entrada e o cultivo de microalgas. O modelo apresentado foi capaz de simular o crescimento do cultivo e o consumo de nitrato nas duas validações testadas com dados de outros estudos. As análises paramétricas conduzidas indicam uma forte dependência da constante de transferência de massa de CO_2 na velocidade de crescimento do cultivo, quanto mais eficiente for a adição de CO_2 dissolvido no cultivo, mais rápido ele se desenvolverá. Outra análise paramétrica realizada indica que a adição de uma quantidade maior de nitrato no meio de cultivo utilizado significa uma maior quantidade de biomassa final produzida. Ainda que não tenha sido possível coletar dados experimentais do sistema proposto, o presente estudo já mostrou que o modelo matemático sugerido funciona. Uma vez que estes dados possam ser coletados, será possível aplicar as ferramentas de modelagem e simulação para produzir microalgas no fotobiorreator proposto com alta eficiência, minimizando os custos de operação.

Palavras-chave: Microalgas; Fotobiorreator; Modelagem matemática.

ABSTRACT

Environmental impacts caused by greenhouse gas emissions are a global concern, for this reason, the search for ways to reduce these emissions has become a critical point in our society. While renewable energy sources represent 14% of the global energy matrix, in Brazil, this percentage is 46.1%, with emphasis on biofuels, which represent 6.9%. The production of biodiesel through microalgae appears as an alternative to conventional production that depends on soy or other agricultural products. Microalgae can be grown in compact photobioreactors that have a high production rate in a small area. Microalgae can also be used in the treatment of combustion gases, since those gases accelerate microalgae growth. Even so, large scale production processes face problems such as low productivity in the case of ponds and high energy cost in the case of compact tubular photobioreactors. In order for microalgae production to become attractive, it is necessary to develop an economically competitive process and for this purpose, the objective of this research is to develop a high efficiency airlift reactor with a volume large enough to treat emission gases on a large scale and still produce quality biofuels. A mathematical model of the airlift reactor will be presented and validated using experimental data from other studies. The model will take into account the kinetics of microalgae growth according to the following parameters: oxygen concentration, carbon dioxide concentration, nitrate concentration, phosphate concentration, temperature and luminosity. Mass balance will be applied at each component participating in the reaction following the kinetic growth and the mass transfer laws between the feeding gas and the microalgae culture. The parametric analyzes conducted indicate a strong dependence of the CO₂ mass transfer constant on the growth rate of the microalgae, the more efficient the addition of dissolved CO₂ to the cultivate, the faster it will grow. Another parametric analysis conducted indicates that the addition of greater amount of nitrate in the culture medium used means greater amount of final biomass produced. Although it was not possible to collect experimental data from the proposed system, the present study has already shown that the suggested mathematical model works. Once these data can be collected, it will be possible to apply modeling and simulation tools to produce microalgae in the proposed photobioreactor with high efficiency, minimizing operating costs.

Keywords: Microalgae; Photobioreactor; Mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de produção de energia sustentável do NPDEAS.....	14
Figura 2 - Exemplo de curva de crescimento de microalgas.	17
Figura 3 - Fluxograma para a produção de microalgas	17
Figura 4 - Principais características dos reatores abertos e fechados.	18
Figura 5 - Esquema de reator tipo corrida.....	19
Figura 6 - Esquema simplificado funcionamento de um airlift.....	20
Figura 7 - Fotobiorreatores airlift utilizados no NPDEAS.....	21
Figura 8 - Fotobiorreatores de tubos horizontais utilizados no NPDEAS.....	22
Figura 9 - Modelo de fotobiorreator de placa plana.....	23
Figura 10 – Fluxograma para construção de modelo matemático	30
Figura 11 - Fotobiorreator airlift seriado.	35
Figura 12 - Inóculo produzido em escala laboratorial.....	36
Figura 13 - pHmetro digital de bancada.	37
Figura 14 - Espectrofotômetro UV-VIS.	38
Figura 15 - Esquema de funcionamento do sistema de airlift seriado.....	39
Figura 16 - Dados experimentais de biomassa com 0,4 vvm de CO ₂ em comparação com modelo teórico.....	44
Figura 17 - Dados experimentais de biomassa com 0,8 vvm de CO ₂ em comparação com modelo teórico.....	44
Figura 18 - Dados experimentais de produção de biomassa em comparação com modelo teórico.	46
Figura 19 - Dados experimentais de nitrato total em comparação com modelo teórico.	46
Figura 20 - Dado experimental de biomassa em comparação com modelo teórico.	48
Figura 21 - Variação da produção de biomassa para diferentes hmCO ₂	49
Figura 22 - Variação da produção de biomassa para diferentes concentrações de NO ₃	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela de referências de diferentes tipos de reatores e a biomassa final produzida.	24
Tabela 2 - Estudos de modelagem e simulação aplicados a produção de microalgas.	31
Tabela 3 - Composição do Meio CHU.	34
Tabela 4 - Termos da equação de cinética de crescimento	41
Tabela 5 - Parâmetros de entrada de Cervantes et al. (2012).....	43
Tabela 6 - Parâmetros de entrada de Ho et al. (2012).....	45
Tabela 7 - Dados experimentais.	46
Tabela 8 - Parâmetros de entrada dados experimentais.	47

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante de ajuste A para o O ₂	-
B	Constante de ajuste B para o O ₂	-
C	Constante de ajuste C para o O ₂	-
CO ₂	Dióxido de carbono	-
[CO ₂]	Concentração de CO ₂ dissolvido	mg.L ⁻¹
[CO ₂]*	Concentração de CO ₂ na interface	mg.L ⁻¹
hm _{CO₂}	Coeficiente de transferência de massa do CO ₂	dia ⁻¹
hm _{O₂}	Coeficiente de transferência de massa do O ₂	dia ⁻¹
K _{CO₂}	Constante de saturação de CO ₂	-
K _{NO₃}	Constante de saturação de NO ₃	-
K _{PO₄}	Constante de saturação de PO ₄	-
N ₂	Gás nitrogênio	-
NO ₃	Nitrato	-
[NO ₃]	Concentração de nitrato	mg.L ⁻¹
nr	Número de reatores	-
O ₂	Oxigênio	-
[O ₂]	Concentração de O ₂ dissolvido	mg.L ⁻¹
[O ₂]*	Concentração de O ₂ na interface	mg.L ⁻¹
P _{CO₂}	Pressão parcial de CO ₂	bar
P _{O₂}	Pressão parcial de O ₂	bar
PO ₄	Fosfato	-
[PO ₄]	Concentração de fosfato	mg.L ⁻¹
Q/V	Inverso do tempo de retenção	dia ⁻¹
X	Concentração de biomassa	mg.L ⁻¹
Y _{CO₂}	Coeficiente estequiométrico do CO ₂	-
Y _{O₂}	Coeficiente estequiométrico do O ₂	-
Y _{PO₄}	Coeficiente estequiométrico do PO ₄	-
Y _{NO₃}	Coeficiente estequiométrico do NO ₃	-

SIMBOLOS GREGOS

μ	Taxa de conversão	dia ⁻¹
μ_{\max}	Taxa de conversão máxima	dia ⁻¹

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1.	MICROALGAS	16
2.1.1.	Condições do cultivo	17
2.1.2.	Tipos de cultivo	18
2.1.2.1.	Fotobiorreatores abertos	18
2.1.2.2.	Fotobiorreator de coluna de bolhas	19
2.1.2.3.	Fotobiorreator <i>airlift</i>	20
2.1.2.4.	Fotobiorreatores de tubos horizontais	21
2.1.2.5.	Fotobiorreator de tanque agitado	22
2.1.2.6.	Fotobiorreator de placa plana	22
2.1.3.	Cinética de crescimento	25
2.1.3.1.	Influência da temperatura	25
2.1.3.2.	Influência da intensidade luminosa	26
2.1.3.3.	Influência do CO ₂	26
2.1.3.4.	Influência do O ₂	27
2.1.3.5.	Influência do nitrogênio	28
2.1.3.6.	Influência do fósforo	29
2.2.	MODELAGEM MATEMÁTICA	30
2.2.1.	Método do Elemento de Volume	31
3.	JUSTIFICATIVA	32
4.	OBJETIVOS	33
4.1.	OBJETIVO GERAL	33
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
5.1.	MATERIAIS	34
5.2.	MÉTODOS	35
5.2.1.	Cultivo de microalgas	35
5.2.2.	Contagem de células	36
5.2.3.	pH do cultivo	37
5.2.4.	Absorbância	37
5.2.5.	Biomassa seca	38
5.2.6.	Modelagem matemática	38
5.2.6.1.	Balanço de Massa	39

5.2.6.2. Cinética de Crescimento.....	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
6.1. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA LITERATURA.....	43
6.2. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS EXPERIMENTAIS.....	46
6.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA.....	48
7. CONCLUSÕES	51
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

No mundo todo existe uma preocupação crescente com os impactos ambientais gerados pela emissão de CO₂, por isso existe um esforço global em busca de meios capazes de reduzir essas emissões. A produção de microalgas surge como um meio biológico e ecologicamente viável de capturar CO₂. As microalgas são seres aquáticos unicelulares capazes de realizar fotossíntese e que possuem uma taxa de crescimento maior do que qualquer planta terrestre (CHEN, et al. 2011).

A biomassa de microalga tem alto teor de lipídios e carboidratos, portanto pode ser utilizada na produção de biocombustíveis como o biodiesel e o etanol. Além disso, a biomassa de microalga pode conter alto valor proteico, podendo ser utilizada em rações animais e suplementos alimentares. As microalgas também são utilizadas na produção de pigmentos, carotenoides e outros metabólitos de alto valor agregado. Todos esses produtos podem ser obtidos de processos que têm como objetivo principal o tratamento de gases de emissão e redução das taxas de CO₂ (HO, et al., 2011).

A produção de biocombustíveis através de microalgas surge como uma alternativa à produção convencional que depende da soja ou de outros produtos agrícolas. Enquanto as fontes renováveis de energia representam 14% da matriz energética mundial, no Brasil este percentual é de 45,3%, com destaque aos biocombustíveis que representam 6,9%. Soma-se a isso as políticas nacionais de incentivo à produção de biodiesel, fazendo com que o diesel que chega ao consumidor na bomba de combustível tenha obrigatoriamente 13% de biodiesel (B13) (MME, 2019). Diferente dos produtos agrícolas utilizados na produção de biocombustíveis, as microalgas não participam da cadeia alimentícia e também não possuem limitações produtivas quanto a sazonalidade, podendo ser produzidas o ano todo (Siaut et al., 2011).

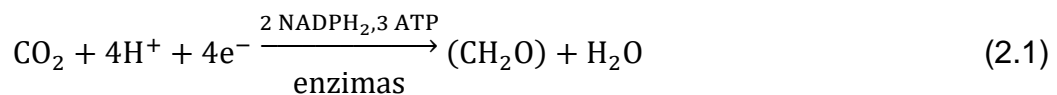
As microalgas podem ser cultivadas em fotobiorreatores compactos que possuem uma alta taxa de produção ocupando uma pequena área, além disso podem ser utilizadas para o tratamento de gases de combustão acelerando seu crescimento (BALMANT, 2016). Ainda assim, os processos de produção em larga escala enfrentam problemas como o baixo rendimento no caso de lagoas, de alto custo energético no caso de fotobiorreatores tubulares compactos e de

Para que a produção de microalgas se torne atrativa é necessário o desenvolvimento de processos economicamente competitivos e que possam ser associados a outras plantas energéticas, como as termoelétricas por exemplo. O projeto de fotobiorreatores que sejam mais eficientes e que possam ser escalonados para projetos de engenharia é um dos grandes desafios para a produção de microalgas. Nesse contexto as ferramentas de modelagem e simulação se mostram muito importantes para analisar um processo e verificar quais variáveis podem ser controladas para que se produza microalgas com um bom rendimento e de forma mais eficiente.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. MICROALGAS

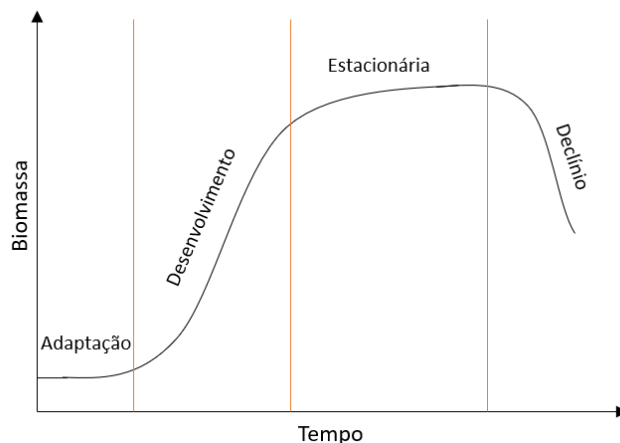
Microalgas são seres unicelulares que podem ser encontrados em ambientes aquáticos como rios, lagoas, lagos, mares e oceanos. São organismos fotossintéticos, ou seja, na presença de luz convertem gás carbônico (CO₂) em oxigênio (O₂), dessa forma obtendo o carbono necessário para suas atividades metabólicas, como mostrado de forma simplificada na equação 2.1 (MASOJÍDEK, et al. 2003). Estima-se que em média 2kg de CO₂ são consumidos para gerar 1kg de biomassa de microalga. A capacidade fotossintética das algas é vital para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (SAJJADI et al., 2018).



Muitas são as espécies de microalgas existentes na natureza, estimativas indicam entre 200 mil a 1 milhão de espécies, contudo apenas as espécies que apresentam alta produção de metabólitos valiosos para o mercado são estudadas, esses metabólitos podem ser proteínas, ácidos graxos, carotenoides, pigmentos, entre outros. Algumas das principais espécies de microalgas utilizadas para a produção desses metabólitos são: *Arthrospira platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis*, *Tetrademus obliquus* (COELHO et al., 2019).

O cultivo de microalgas pode ser dividido em 4 etapas diferentes: adaptação, desenvolvimento, fase estacionária e declínio, como exemplificado na Figura 2. Em cada uma dessas etapas os microrganismos tendem a produzir e acumular diferentes metabólitos. É possível maximizar a produção de algum metabólito desejado induzindo ou interrompendo o crescimento do cultivo no momento correto (LIAO et al., 2018). Atualmente, a produção industrial de microalgas só é vantajosa quando integrada a outros sistemas, como por exemplo no tratamento de efluentes, ou em biorrefinarias para a produção de biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol (COELHO et al., 2019).

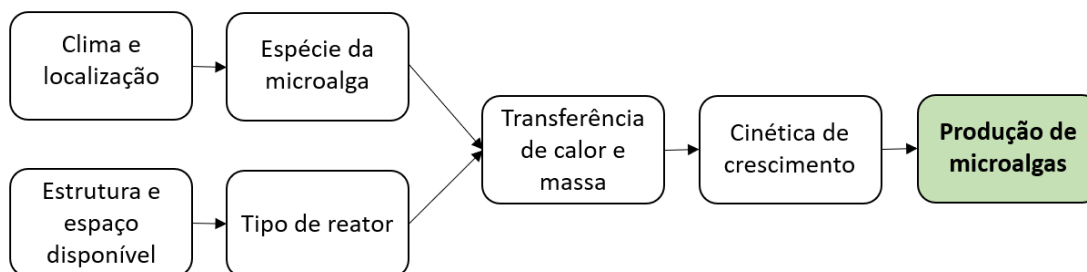
Figura 2 - Exemplo de curva de crescimento de microalgas.



Fonte: O autor, 2021.

Para se produzir microalgas de qualidade deve-se levar em conta uma série de fatores como a quantidade de biomassa que se deseja produzir, o espaço físico disponível, a insolação e a temperatura média da região (para cultivos externos), entre outros fatores que podem afetar a cinética de crescimento das microalgas (SINGH, 2012). A Figura 3 mostra um fluxograma dos passos a serem estudados antes de se iniciar a produção de microalgas.

Figura 3 - Fluxograma para a produção de microalgas



Fonte: O autor, 2021.

2.1.1. Condições do cultivo

Dependendo das condições do meio, o cultivo de microalgas pode se desenvolver de três maneiras diferentes: autotrófico, heterotrófico e mixotrófico. No cultivo autotrófico as algas produzem sua energia através da fotossíntese, o rendimento está diretamente ligado a disponibilidade de CO₂ do meio, sua principal vantagem é o menor risco de contaminação já que não há carbono orgânico no meio. No sistema heterotrófico utiliza-se apenas o carbono orgânico disponível no meio como fonte de energia, esse tipo de cultivo apresenta maior custo de produção devido a necessidade da adição de uma fonte de carbono,

esse sistema possui maior chance de contaminação afetando diretamente o rendimento, contudo possui a vantagem de exigir menor espaço para a produção. O cultivo mixotrófico utiliza tanto a fotossíntese quanto o carbono orgânico disponível para o desenvolvimento celular, é possível cultivar microalgas utilizando dejetos suínos ou águas residuais de processos industriais como meio de cultivo em sistemas mixotróficos (LOURENÇO, 2006; ZHAN; RONG; WANG, 2017).

2.1.2. Tipos de cultivo

Fotobiorreator é o nome dado a um recipiente iluminado (artificialmente ou naturalmente) onde há o crescimento de microrganismos. Pode-se produzir microalgas em fotobiorreatores abertos ou fechados. Os tanques abertos são as lagoas de microalgas, apresentam baixo rendimento e baixa concentração celular, precisam de pouca manutenção e utilizam grandes áreas. Os tanques fechados podem ser dos mais variados tipos: de cilindros agitados a sistemas de feixes de tubos com injeção de ar (SINGH, et al. 2012). A Figura 4 mostra uma comparação entre os reatores abertos e fechados.

Figura 4 - Principais características dos reatores abertos e fechados.

ABERTOS	FECHADOS
<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidade de projeto e operação; • Pouca manutenção; • Grandes áreas; • Alto risco contaminação; • Baixo Rendimento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Projetos mais complexos; • Maior número de variáveis controladas; • Incidência de luz otimizada; • Baixo risco de contaminação; • Alta produtividade.

FONTE: O autor, 2021.

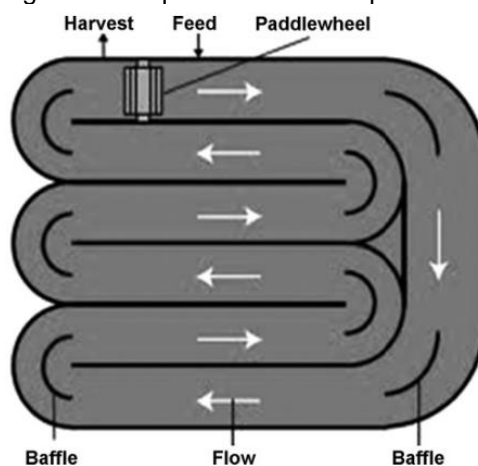
2.1.2.1. Fotobiorreatores abertos

Os reatores abertos são as lagoas de microalgas, são utilizadas principalmente no tratamento de efluente líquidos. A principal vantagem das lagoas é a sua simplicidade, tanto de projeto quanto de operação, o que torna esse método de produção muito barato. A desvantagem está na necessidade de

grandes áreas de produção devido à baixa concentração celular que esse tipo de cultivo apresenta (CHIARAMONTI, et al. 2013).

O design de lagoa mais utilizado é o tipo corrida, que consiste em um circuito que o cultivo percorre utilizando diferença de nível como força motriz. Os reatores tipo corrida utilizam rodas d'água ou bombas no fim do percurso a fim de reiniciar seu trajeto. Assim como todo reator aberto, uma de suas limitações é a profundidade do cultivo, pois a luz do sol só consegue penetrar até certa profundidade, necessitando de grandes áreas para competir com a produção dos demais tipos de reatores (BANERJEE, RAMASWAMY, 2017). A Figura 5 mostra um esquema de reator tipo corrida.

Figura 5 - Esquema de reator tipo corrida.



Fonte: Singh, et al. 2012.

2.1.2.2. Fotobiorreator de coluna de bolhas

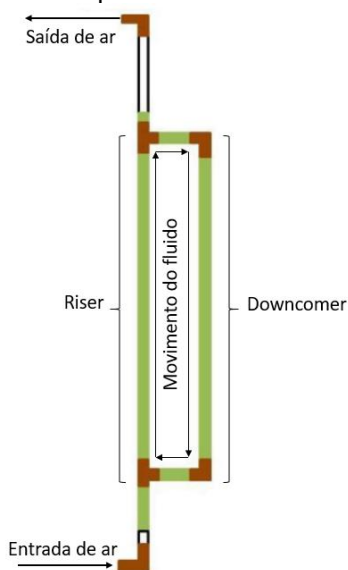
Os reatores de coluna de bolhas consistem em um tubo vertical com uma entrada de gás na parte inferior e uma saída na parte superior. O gás alimentado tem função de agitar e promover a transferência de massa necessária para o crescimento da microalga. Esse tipo de reator possui boa mistura e taxas de transferência de calor e massa satisfatórias. O seu desempenho está diretamente ligado com a vazão e a composição do gás de alimentação (VALDÉS, et al. 2012).

Para reatores desse tipo em larga escala, se faz necessário placas de redistribuição em alturas intermediárias para evitar a formação de aglomerados de bolhas de ar, a fim de maximizar a transferência de massa aproveitando toda a altura do reator (HULATT; THOMAS, 2011).

2.1.2.3. Fotobiorreator *airlift*

Esse tipo de fotobiorreator é muito similar ao de coluna de bolhas, ele também consiste em tubos verticais com alimentação de gás na parte inferior. Esse design de reator consiste em dois tubos conectados em loop, um deles recebe a alimentação de ar, o *riser*, enquanto o outro não, o *downcomer*. A alimentação de ar no *riser* diminui a densidade do fluido fazendo com que ele suba, ao chegar no topo ele encontra uma saída de gases enquanto o fluido segue para o *downcomer*, lá ele flui de forma laminar até a parte de baixo onde chega ao *riser* e recebe a alimentação de ar novamente. Esse design de reator faz com que o fluido se misture de forma circular, possui uma excelente taxa de transferência de massa e está entre os mais eficientes na produção de biomassa, porém devido a sua complexidade é difícil escalonar para tamanhos industriais (KUMAR, et al. 2011). A Figura 6 mostra um esquema simplificado de funcionamento de um reator *airlift*.

Figura 6 - Esquema simplificado funcionamento de um *airlift*.



Fonte: Adaptado de Balmant, et al. 2011.

É comum a presença de ar preso no *downcomer* em forma de microbolhas, já que o movimento do fluido para baixo é contracorrente com a tendência do ar de subir devido a sua baixa densidade, essas microbolhas têm papel fundamental na transferência de massa nesse tipo de reator (LOUBIÈRE, et al. 2009). Os reatores *airlift* utilizados e patenteados pelo NPDEAS podem ser observados na Figura 7 (MIYAWAKI, et al 2013).

Figura 7 - Fotobiorreatores *airlift* utilizados no NPDEAS.



Fonte: Taher, 2019.

2.1.2.4. Fotobiorreatores de tubos horizontais

Fotobiorreatores de tubos horizontais são compostos por tubos alocados paralelamente uns aos outros, os tubos podem estar posicionados paralelos ao chão ou inclinados, nesse tipo de reator existe uma região específica para a troca gasosa chamado de degasser. Devido ao ângulo e as posições que podem estar posicionados esse tipo de reator possui área de insolação maximizada. Outra vantagem desse reator é que ele pode produzir um grande volume de cultivo ao mesmo tempo pois o jogo de tubos pode ser disposto um acima do outro sem prejudicar a insolação (SINGH, et al. 2012).

Nesse design, a microalga que sai do degasser precisa percorrer um grande trajeto até retornar ao ponto inicial, isso significa um acúmulo de O_2 e escassez de CO_2 em algumas regiões do reator, que podem ser prejudiciais ao cultivo. Outro problema dos fotobiorreatores de tubos horizontais de grande porte está na aplicação de bombas, que são utilizadas para atingir um regime turbulento de escoamento que é necessário para que se faça uma boa mistura do meio e para que não ocorram incrustações. O bombeamento acaba causando

danos na estrutura celular das microalgas comprometendo a velocidade de crescimento da biomassa (GUDIN, 1991). A Figura 8 mostra os fotobiorreatores de tubos horizontais compactos utilizados no NPDEAS, esses reatores possuem 10m^3 de volume.

Figura 8 - Fotobiorreatores de tubos horizontais utilizados no NPDEAS.



Fonte: Taher, 2019.

2.1.2.5. Fotobiorreator de tanque agitado

Como o nome sugere os fotobiorreatores de tanque agitado são vasos onde a agitação é feita de forma mecânica por pás de diferentes formatos e tamanhos, garantindo que o conteúdo do reator se mantenha homogêneo. É comum a presença de chicanas ou defletores nas paredes para evitar a formação de vórtex. A iluminação nesse tipo de reator pode ser externa ou interna, a alimentação de gás é feita na parte inferior. Mesmo com essa iluminação, a sua grande desvantagem é a baixa área iluminada em relação ao seu volume, o que pode prejudicar a fotossíntese (KUMAR, et al. 2011).

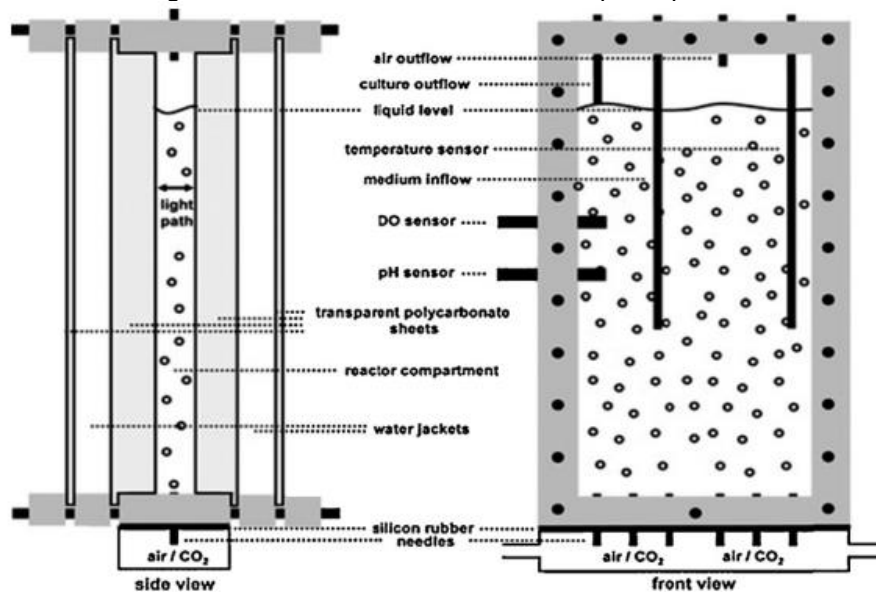
2.1.2.6. Fotobiorreator de placa plana

Esse tipo de reator é formado por duas placas retangulares de material transparente onde o cultivo fica preso dentro, a distância das placas é pequena o suficiente para que a luz consiga atravessar todo o cultivo com facilidade, por esse motivo ele possui uma grande área iluminada em relação a seu volume. A

agitação é feita injetando ar na parte inferior ou pela rotação mecânica das placas (Zhang, et al. 2002).

Para que haja maior volume de produção, é comum que se posicionem vários módulos desse reator lado a lado aproveitando a luz que pode ser posicionada entre as placas. Quando utilizado para cultivos externos, é recomendado que o reator fique inclinado de forma a não receber todo o sol de pico, a intensidade luminosa nesses momentos pode causar fotoinibição (KUMAR, et al. 2011). Um modelo de fotobiorreator de placa plana está exemplificado na Figura 9.

Figura 9 - Modelo de fotobiorreator de placa plana.



Fonte: Singh, et al. 2012.

A Tabela 1 mostra alguns estudos de produção de microalgas de várias espécies usando diferentes tipos de reatores e gases de alimentação.

Tabela 1 - Tabela de referências de diferentes tipos de reatores e a biomassa final produzida.

Referência	Reator	Volume do reator	Espécie	Tempo de cultivo	Gás de alimentação	Biomassa final
Chiaramonti, et al. (2013)	Raceway	4.000 L	<i>Tetraselmis suecica</i>	6 dias	-	8,37 g.m ⁻² .d ⁻¹
			<i>Nannochloropsis sp.</i>			14,1 g.m ⁻² .d ⁻¹
Valdés, et al. (2012)	Coluna de bolhas	26 L	<i>Nannochloropsis oculata</i>	7 dias	Atmosférico	0,14 g.L ⁻¹
Hulatt; Thomas (2011)	Coluna de bolhas	0,64 L	<i>Dunaliella tertiolecta</i>	7 dias	12% CO ₂	3,19 g.L ⁻¹
				7 dias	4% CO ₂	3,60 g.L ⁻¹
				6 dias	0,04% CO ₂	0,72 g.L ⁻¹
			<i>Chlorella vulgaris</i>	10 dias	12% CO ₂	3,79 g.L ⁻¹
				9 dias	4% CO ₂	3,62 g.L ⁻¹
				10 dias	0,04% CO ₂	0,58 g.L ⁻¹
Corrêa (2015)	Airlift	12 L	<i>Tetradesmus obliquus</i>	5 dias	Atmosférico	0,73 g.L ⁻¹
					1,9% CO ₂	1,60 g.L ⁻¹
					2,6% CO ₂	2,04 g.L ⁻¹
					2,8% CO ₂	1,78 g.L ⁻¹
Fernández, et al. (2000)	Airlift	200 L	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Produção contínua	Atmosférico	2,38 g.L ⁻¹
Zimmerman, et al. (2011)	Airlift	2.200 L	<i>Dunaliella salina</i>	14 dias	14% CO ₂	0,35 g.L ⁻¹
Converti, et al. (2006)	Airlift	5,5 L	<i>Spirulina platensis</i>	15 dias	Atmosférico Com controle de pH via adição de CO ₂ 99%	10,6 g.L ⁻¹
Cheng, et al. (2019)	Tubos horizontais	-	<i>Chlorella mutant</i> PY-ZU1	4 dias	15% CO ₂	5,5 g.L ⁻¹
Taher (2019)	Tubos horizontais	10.000 L	<i>Tetradesmus obliquus</i>	10 dias	~1,8%	0,7 g.L ⁻¹
Zhang, et al. (2002)	Placa plana	3 L	<i>Synechocystis aquatilis</i> SI-2	5 dias	5%	7,9 g.L ⁻¹
He, et al. (2016).	Placa plana	25 L	<i>Isochrysis galbana</i>	10 dias	Atmosférico	0,835 g.L ⁻¹

Fonte: O autor, 2021.

2.1.3. Cinética de crescimento

A velocidade de crescimento de microalgas em cultivos autotróficos é uma função que depende da temperatura, intensidade luminosa, concentração de dióxido de carbono, oxigênio, nitrogênio total e fósforo total (BALMANT, 2011). Se forem utilizados melhoramentos genéticos na espécie a ser cultivada é possível acrescentar um fator genético a essa função.

2.1.3.1. Influência da temperatura

Quando a produção de microalgas se faz em ambientes externos, a temperatura se torna fator determinante na produtividade. Nota-se que em média a temperatura ótima para a produção de biomassa varia entre 20°C a 25°C, importante lembrar que algumas algas são naturalmente adaptadas a ambientes mais frios e outras a ambientes mais quentes. O que a maioria das espécies apresenta em comum é o perfil da curva de produtividade em função da temperatura, a produtividade tende a subir com o aumento da temperatura até atingir a temperatura ótima de produção, após esse valor nota-se uma queda abrupta de produtividade até atingir a temperatura letal, onde as microalgas não conseguem mais se desenvolver. Espécies que apresentam a curva mais suave, tendem a produzir menos biomassa, pois seu pico de produção não é tão alto, mas são tolerantes a um range maior de temperatura (RAS, et al. 2013).

As variações de temperatura que os cultivos de microalgas em ambientes externos estão expostos estão diretamente associadas as estações ou meses do ano e também a incidência de radiação solar ou incidência luminosa, ambos esses fatores afetam diretamente a produtividade das microalgas. Nota-se que os meses de maior calor são os meses que também possuem maior incidência de radiação solar e geralmente são os períodos de maior produtividade para reatores externos (RODRÍGUEZ-MIRANDA, et al. 2021).

O efeito de temperaturas mais baixas que a ótima em microalgas é menos agressivo para a produtividade do que o efeito de temperaturas mais altas que a ótima para a maioria das espécies comerciais de microalgas. Dados experimentais e modelos matemáticos mostram uma forte queda na produtividade em temperaturas maiores que 35°C. O controle de temperatura

para reatores externos só é viável se for realizado como reaproveitamento energético, visto que o gasto energético para isso superaria a produção energética do biodiesel produzido por essa microalga (BERNARD; RÉMOND, 2012).

2.1.3.2. Influência da intensidade luminosa

A luz necessária para o crescimento de microalgas pode vir diretamente do Sol, como também de fontes artificiais. Além da intensidade luminosa, o período iluminado também pode afetar a velocidade de crescimento das microalgas. Experimentos realizados com a microalga marinha *Nannochloropsis sp.* mostram que com uma intensidade luminosa de $100 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ o crescimento foi maior quando o período iluminado foi de 18 horas e o período escuro foi de 6 horas, quando comparado ao crescimento realizado com 24 horas de período iluminado e a um terceiro experimento com 12 horas de luz e 12 horas sem luz. Os mesmos períodos de iluminação foram testados para uma intensidade luminosa de $200 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, nas 3 condições houve uma diminuição na taxa de crescimento indicando um efeito de fotoinibição de crescimento (WAHIDIN; IDRIS; SHALEH; 2013).

Outro fator a ser analisado quando se trata de luz artificial é a comprimento de onda da fonte luminosa. Experimentos laboratoriais com a microalga *Chlorella vulgaris* exposta a diferentes tipos de luz LED mostram que os melhores resultados foram das microalgas expostas a luz branca quente, quando comparada a luz branca convencional, luz azul e luz vermelha. O mesmo estudo ainda mostra que a intensidade ótima para todos os comprimentos de onda foi em torno de $80 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e que para intensidades luminosas maiores que $100 \text{ mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ nota-se o efeito de fotoinibição (KHALILI, et al. 2015).

2.1.3.3. Influência do CO₂

O gás carbônico tem papel fundamental no crescimento de microalgas principalmente em cultivo autotróficos, onde o CO₂ é a única fonte de carbono disponível. A transferência de massa entre o meio gasoso e o meio líquido e a capacidade da microalga de capturar o CO₂ estão diretamente ligadas a concentração desse gás na fase gasosa.

Teste com a microalga *Spirulina platensis* em fotobiorreator fechado apontam que o dióxido de carbono em concentrações baixas (menores que 5% v/v do gás de alimentação) além de não apresentar resultados satisfatórios de crescimento de biomassa, também não apresentou bons resultados de captura de CO₂. Já em concentrações próximas a 10% v/v, a microalga se desenvolveu de forma rápida e a captura de CO₂ apresentou bons resultados. A captura de CO₂ foi maior em concentrações de 15% v/v, porém comprometendo a taxa de crescimento. Concentrações maiores que 15% v/v já se mostravam tóxicas demais para o crescimento de biomassa, visto que o CO₂ se dissolve em água na forma de HCO₃⁻, alterando o pH do meio e tornando-o desfavorável para o crescimento da microalga (ALMOMANI, et al. 2019).

Em cultivo em lagoa aberta de *Chlorella vulgaris* que recebeu CO₂ em proporções de 8%, 16% e 24% v/v, o maior crescimento de biomassa se deu com 16% de gás carbônico. O experimento com 24% v/v, demonstrou um bom crescimento e uma boa taxa de captura de CO₂, mostrando que essa alga nessa condição de lagoa aberta é capaz aceitar bem gases de emissão ainda produzindo biomassa (MOLAZADEH, et al. 2019).

A alga marinha *Nannochloropsis salina*, em experimento realizado em erlenmeyer, apresentou crescimento ótimo quando a concentração de CO₂ no gás de entrada era de 6%, pouco crescimento celular foi observado com concentrações próximas a 20% e houve total inibição do crescimento quando 100% de CO₂ era utilizado. O problema da inibição foi contornado adicionando ar atmosférico em alternância com o gás carbônico puro, ainda que o crescimento não tenha se dado de forma adequada. Foi notado que mesmo em concentrações altas de CO₂ (próximas a 20%), a remoção de O₂ do gás de entrada é uma forma de otimizar esse tipo de processo, aumentando a produção de biomassa e a remoção de CO₂ (CHEN; XU; VAIDYANATHAN, 2020).

2.1.3.4. Influência do O₂

O gás oxigênio é um dos produtos da fotossíntese realizada pelas microalgas, muitas vezes o gás que alimenta fotobiorreatores possui concentrações consideráveis de O₂, a presença desse gás dissolvido no meio pode prejudicar as reações fotossintéticas, inibindo o crescimento dos

microrganismos. O crescimento da microalga *Chlorella sorokiniana* foi analisado em laboratório para diferentes concentrações de oxigênio dissolvido, que foi mantido constante durante o experimento. Em todos os testes, quanto menor a concentração de oxigênio dissolvido maior foi a produção de biomassa. É importante notar que a redução do oxigênio dissolvido pode se dar de duas formas diferentes que podem e devem ser usadas simultaneamente de modo a maximizar a produção de biomassa: reduzir a concentração de O₂ no gás de entrada e remover o O₂ produzido pela fotossíntese. A segunda medida é particularmente mais difícil de ser controlada em reatores tubulares de grande porte, visto que devido ao seu grande tempo de residência, esses reatores são pouco homogêneos (UGWU, AOYAGI, UCHIYAMA, 2007).

O efeito de inibição causado pelo oxigênio dissolvido foi analisado com a microalga *Chlorella vulgaris* em fotobiorreator em forma de toroide. O efeito foi observado com baixa intensidade até a concentração de 31 g·m⁻³, a partir desse valor começou a afetar drasticamente o crescimento do cultivo. Um modelo matemático foi produzido a partir desses dados, esse modelo foi capaz de prever de forma adequada a influência do oxigênio dissolvido em fotobiorreatores com geometrias diferentes. Os fotobiorreatores *airlift* praticamente não apresentaram efeito do oxigênio dissolvido, pois a transferência de massa nesse tipo de reator é muito eficiente. Em reatores tubulares de grande porte é de muita importância a presença de sistemas degasser para maximizar a remoção de oxigênio dissolvido, visto que nesses reatores a concentração de O₂ pode ser mais elevada (KAZBAR, et al. 2019).

2.1.3.5. Influência do nitrogênio

O nitrogênio é um dos principais nutrientes a serem controlados durante o cultivo de microalgas. Ele pode ser adicionado em meios de cultivo sintéticos através de sais de nitrato, como o nitrato de sódio ou nitrato de potássio, através de outros componentes químicos ricos em nitrogênio como a ureia e está presente em águas residuais de indústrias químicas, alimentícias e também da pecuária que podem ser utilizadas para a produção de microalgas. Seis diferentes fontes de nitrogênio foram testadas na microalga *Scenedesmus bijugatus* em laboratório, foram testados: nitrato de potássio, nitrato de sódio,

ureia, nitrato de cálcio, nitrato de amônio e cloreto de amônio. Os nitratos de sódio e potássio tiveram os melhores resultados de produção de biomassa, também foi notado que a ureia apresentou bom resultado, o que pode justificar seu uso em processos de larga escala tendo em visto sua alta disponibilidade no mercado (ARUMUGAM, et al. 2013).

A concentração de nitrato no meio de cultivo é muitas vezes fator limitante de crescimento e a sua disponibilidade está diretamente ligada a proporção da produção dos metabólitos. A produção de biomassa e a produção de óleo foi analisado para 4 espécies de microalgas (*Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata*, *Tetraselmis chui* e *Tetraselmis tetrahele*) em laboratório variando a concentração inicial de nitrato de sódio no meio de cultivo. Todos os experimentos apontaram para uma maior produção de biomassa quando havia maiores concentrações de nitrato. A proporção óleo:biomassa foi maior para a *Nannochloropsis oculata* e para a *Tetraselmis chui* quando a concentração de nitrato foi menor (25 mg/L), contudo, quando a concentração de nitrato foi maior (75 mg/L) houve uma maior produção de biomassa e maior produtividade de óleo. A *Tetraselmis chui* produziu mais óleo para a menor concentração de nitrato (25 mg/L) (ARAUJO, et al. 2019).

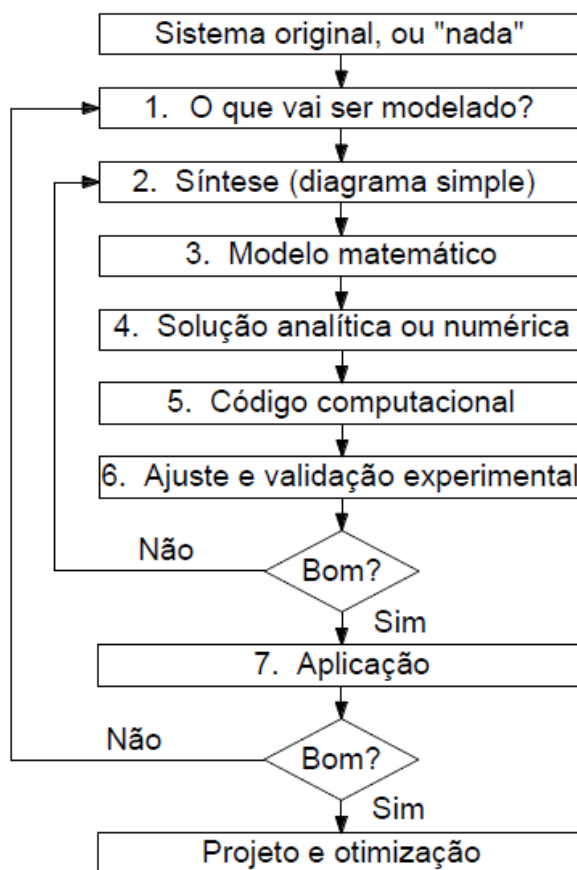
2.1.3.6. Influência do fósforo

Assim como o nitrogênio, o fósforo é um nutriente essencial para o cultivo de microalgas. Nos meios de cultivo sintéticos o fósforo é adicionado na forma de sais de fosfato, nota-se que sua concentração é menor que a dos sais de nitrato e em muitas das vezes essa quantidade é adicionada em excesso, pois a quantidade de fósforo necessária para o crescimento de um cultivo é muito menor que a de nitrogênio. A microalga *Porphyridium purpureum* foi cultivada em meio com limitação de fósforo com o objetivo de aumentar a produção de ácidos graxos. A relação ácidos graxos:biomassa aumentou com a redução da concentração de fósforo, contudo quando o fósforo estava mais disponível houve maior crescimento de biomassa e maior quantidade de ácidos graxos (SU, et al. 2016).

2.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para prever comportamentos de sistemas reais utilizando uma base de dados experimentais, primeiro precisa-se fazer uma descrição matemática do sistema, a isso dá-se o nome de modelagem matemática. A Engenharia de Sistemas estuda como trabalhar matematicamente com uma combinação de vários sistemas, tornando possível sua simulação e otimização (VARGAS; ARAKI, 2017). A Figura 10 apresenta um fluxograma com os passos a serem seguidos para a construção de um modelo matemático.

Figura 10 – Fluxograma para construção de modelo matemático



Fonte: Vargas; Araki, 2017.

A aplicação de ferramentas de modelagem e simulação de sistemas é muito importante nos estudos de produção de microalgas pois permite prever o comportamento do cultivo em diferentes situações, procurando valores ótimos para aplicação em sistemas reais, sem a necessidade de realização de tantos testes experimentais. Além disso, é possível prever se o escalonamento de unidades produtivas valeria a pena para tamanhos industriais, entre outras

aplicações possíveis. A Tabela 2 apresenta estudos de modelagem matemática aplicados a sistemas de produção de microalgas.

Tabela 2 - Estudos de modelagem e simulação aplicados a produção de microalgas.

Autores	Espécie	Variáveis analisadas	Validação
Ryu et al. (2018)	<i>Nannochloropsis oceanica</i>	Efeito da concentração de CO ₂ e NO ₃ na produção de metabólitos.	Jia et al. (2015)
Valiorgue et al. (2014)	<i>Neochloris oleoabundans</i>	Efeito da transferência de massa de CO ₂ na formação de biomassa.	Experimental
Yoo, Kim e Lee (2014)	<i>Chlorella protothecoides</i>	Efeito da intensidade luminosa, NO ₃ e CO ₂ na produção de biomassa e metabólitos.	Experimental
García-Cubero et al. (2017)	<i>Scenedesmus vacuolatus</i>	Fixação de CO ₂ e produção de biomassa.	Experimental
Ras, Steyer e Bernard (2013).	15 espécies diferentes	Influência da temperatura na cinética de crescimento	Butterwick et al. (2005) Baek et al. (2008) Xin et al. (2011)
Pradhan et al. (2015)	<i>Rhizoclonium hieroglyphicum</i>	Influência da intensidade luminosa e da concentração de CO ₂ no crescimento de microalgas.	Experimental
Tong et al. (2020)	<i>Chlorella protothecoides</i>	Influência da velocidade da agitação e da pressão da aeração no crescimento de microalgas.	Experimental
Li et al. (2019)	<i>Chlorella vulgaris</i>	Influência do tamanho das bolhas de ar e da intensidade luminosa no crescimento de microalgas	Experimental
Almomani, F. (2020)	<i>Chlorella vulgaris</i>	Modelo estatístico para prever o crescimento de microalgas com o objetivo de se obter valores ótimos de temperatura e concentração inicial de cultivo	Estatístico

Fonte: O autor, 2021.

2.2.1. Método do Elemento de Volume

O Método do Elemento de Volume (MEV) divide um sistema em várias partes ou elementos de volume descritos tridimensionalmente com equações diferenciais ordinárias, cada um deles tem suas propriedades consideradas homogêneas. Quanto menor forem os elementos de volume mais precisa será a simulação (VARGAS; ARAKI, 2017).

3. JUSTIFICATIVA

O grande desafio das pesquisas com microalgas está na dificuldade de se obter um sistema que consiga produzir biomassa em grande quantidade, que seja energeticamente viável. Na literatura são apresentados diversos sistemas para produção de microalgas com limitações técnicas, sejam relacionadas a um baixo rendimento ou a dificuldade em escalonar para escalas industriais.

São citados vários problemas derivados da utilização de bombas ou de baixos rendimentos quando usados tubos muito longos. Este projeto tem como desafio propor um sistema que combine uma série de reatores *airlift* formando um fotobiorreator de alta eficiência que consiga gerar quantidades satisfatórias de biomassa quando comparado com outros fotobiorreatores e que possa integrar outras plantas energéticas para tratamento de gases de combustão. A proposta desse trabalho é modelar e simular um fotobiorreator *airlift* com tubos seriados em escala piloto para produzir microalgas de forma mais eficiente em um sistema que possa ser escalonado para projetos de engenharia.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GERAL

Modelar e simular fotobiorreatores a fluxo de ar de elevação com tubos seriados para cultivo de microalgas, propondo um arranjo de *airlifts* combinados acrescentando ganho de volume a um sistema de alta eficiência.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

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

- a. Desenvolver experimentalmente o sistema de fotobiorreatores a fluxo de ar de elevação com tubos seriados para cultivo de microalgas;
- b. Elaborar modelo matemático para o sistema;
- c. Realizar a instrumentação e caracterização do sistema;
- d. Realizar o ajuste do modelo matemático para um conjunto de dados experimentais;
- e. Realizar validação experimental do modelo matemático para um segundo conjunto de dados experimentais;
- f. Realizar uma análise paramétrica determinando os impactos na resposta do sistema, identificando oportunidades de otimização termodinâmica.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1. MATERIAIS

O desenvolvimento do sistema de fotobiorreator *airlift* seriado será realizado no NPDEAS (Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento de Energia Autossustentável) localizado no campus Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba. A estrutura do núcleo de pesquisa conta com 5 fotobiorreatores tubulares compactos de 12 m³ de capacidade, 6 fotobiorreatores do tipo *airlift*, sendo 5 deles de 11 L e um de 30 L, e uma sala de cultivo de microalgas para escala laboratorial.

O sistema foi construído com tubos de PVC transparentes com 50 mm de diâmetro, cada módulo de *airlift* é formado por 2 tubos verticais de 2,6 m de altura, sendo que um deles (*riser*) recebe alimentação de ar e o outro (*downcomer*) não recebe. No topo do *riser* existe uma saída de gases que se estende por mais 0,5 m na vertical. O reator é formado por 10 módulos de *airlift* alocados em duas fileiras com um volume total de aproximadamente 100 L. No *downcomer* de uma das extremidades existe um coletor de amostras, o fotobiorreator pode ser observado na Figura 11. O ar comprimido que alimenta o reator será fornecido por um compressor do tipo parafuso ligado continuamente, o sistema de alimentação de ar possui um barômetro e válvulas para controle de pressão, a dispersão de ar é feita com uma tela de metal colocada na parte inferior do reator.

Todos os cultivos utilizarão microalgas da espécie *Tetradismus obliquus* em meio sintético desenvolvido por Chu (1942), este meio fornece todos os macro e micronutrientes necessários para o desenvolvimento da microalga. A concentração dos sais orgânicos e inorgânicos do meio Chu estão listados na Tabela 3.

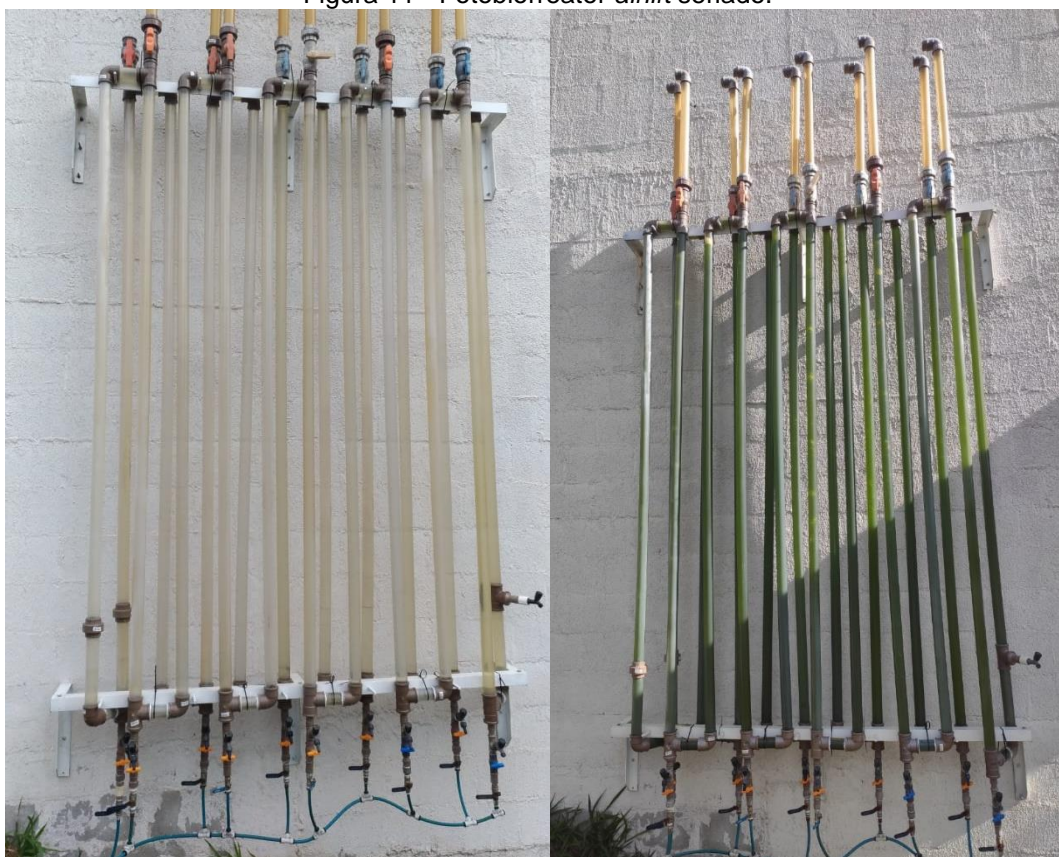
Tabela 3 - Composição do Meio CHU.

Componente	Fórmula	Concentração final (g.L ⁻¹)
Nitrato de sódio	NaNO ₃	0,25
Cloreto de cálcio di-hidratado	CaCl ₂ .2H ₂ O	0,025
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	MgSO ₄ .7H ₂ O	0,075
Fosfato de potássio dibásico	KH ₂ PO ₄	0,075
Fosfato de potássio monobásico	K ₂ HPO ₄	0,175
Cloreto de sódio	NaCl	0,025

EDTA (Ácido etilenodiamino tetra-acético)	$C_{10}H_{16}N_2O_8$	0,05
Hidróxido de sódio	KOH	0,031
Sulfato ferroso hepta-hidratado	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0,005
Ácido bórico	H_3BO_3	0,01142
Sulfato de zinco hepta-hidratado	$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	$8,82 \times 10^{-5}$
Cloreto de manganês tetra-hidratado	$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	$1,44 \times 10^{-5}$
Molibdato de sódio di-hidratado	$NaMoO_4 \cdot 2H_2O$	$7,1 \times 10^{-6}$
Sulfato de cobre penta-hidratado	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	$1,57 \times 10^{-5}$
Nitrato de cobalto hexa-hidratado	$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$4,9 \times 10^{-6}$

Fonte: SANTOS, 2016.

Figura 11 - Fotobiorreator *airlift* seriado.



Fonte: O autor, 2021.

5.2. MÉTODOS

5.2.1. Cultivo de microalgas

Para a coleta de dados experimentais, os cultivos serão desenvolvidos no fotobiorreator proposto a partir de 20 L de cultivo de microalgas provenientes do reator da sala de cultivo do NPDEAS, de forma autotrófica em meio CHU, a produção de inóculo na sala de cultivo é mostrada na Figura 12. Serão feitas

coletas diárias de amostras para as análises de contagem de células em microscópio, análise de pH, absorvância, biomassa seca e nitrato total por um período de 15 dias.

Figura 12 - Inóculo produzido em escala laboratorial.



Fonte: O autor, 2021.

Para validação do modelo matemático, o experimento será repetido utilizando dejetos de suinocultura como meio de cultivo. Para estes experimentos utiliza-se 20 L de inóculo, 10 L de dejetos e o restante em água. O dejetos suíno deve ser submetido a testes para determinação da quantidade de nitratos e fosfatos disponíveis.

5.2.2. Contagem de células

A contagem de células será realizada em microscópio óptico com uma Câmara de Neubauer e um contador manual, o resultado coletado representa a quantidade de células por mL de cultivo. Além do valor quantitativo, a observação do cultivo em microscópio também serve para acompanhar o estágio de desenvolvimento das células e para analisar a possível presença de microrganismo indesejáveis que podem aparecer em cultivos externos.

5.2.3. pH do cultivo

Utilizando um pHmetro digital de bancada será feita a medição do pH do cultivo. É importante que esta análise seja feita logo que se faz a coleta pois a amostra sofre alterações metabólicas que podem alterar o pH poucos minutos após sua coleta. A medida do pH é indicativo da qualidade do cultivo, alterações bruscas de pH podem ser causadas por contaminações ou por mudanças drásticas de temperatura. O pHmetro utilizado nos experimentos pode ser observado na Figura 13.

Figura 13 - pHmetro digital de bancada.



Fonte: O autor, 2021

5.2.4. Absorbância

Será utilizado um espectrofotômetro para medir a capacidade da amostra absorver luz, a leitura será feita em comprimento de onda de 420 nm, capturando indiretamente a quantidade de clorofila presente no meio. A lei de Lambert-Beer demonstra que quanto maior for a absorbância da amostra, maior será sua concentração, neste caso concentração celular. Esta medida pode ser comparada com a contagem de células. O espectrofotômetro utilizado nos experimentos pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 - Espectrofotômetro UV-VIS.



Fonte: O autor, 2021.

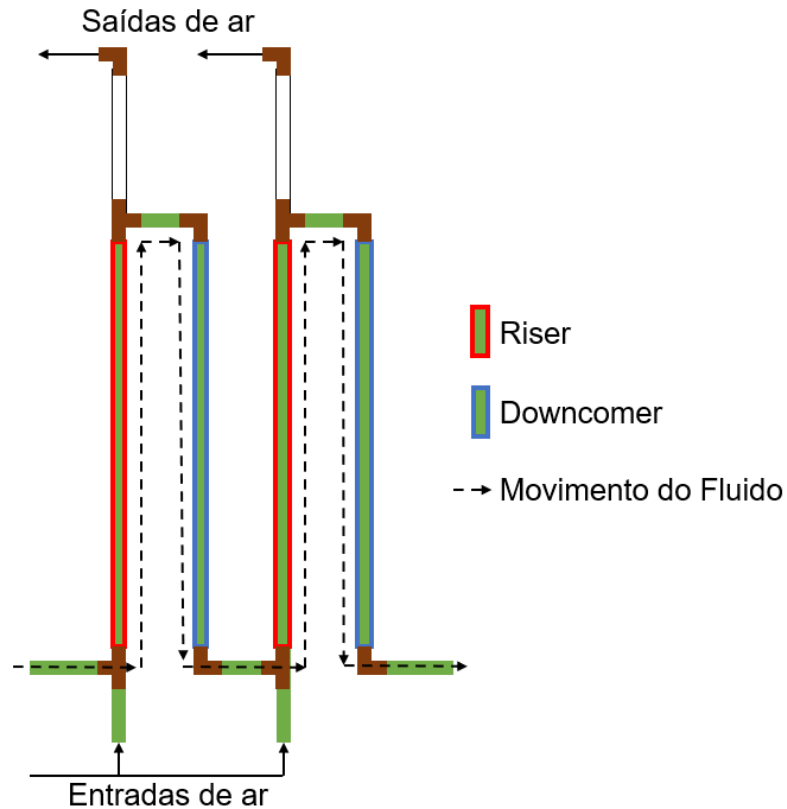
5.2.5. Biomassa seca

A biomassa seca quantifica a concentração da amostra em gramas de biomassa por volume de cultivo. Para isso, são utilizadas membranas de fibra de vidro secas em estufa por 24 horas a 60 °C, que devem ter sua massa aferida em balança de precisão. Na sequência filtra-se 10 mL de amostra com um funil de buchner com bomba de vácuo. A membrana com a biomassa retida deve ficar por mais 24h na estufa a 60°C para retirar toda umidade, em seguida deve ser aferida a massa da membrana novamente em balança de precisão. A diferença da massa do filtro antes e depois da filtração determina a quantidade de biomassa em gramas por 10 mL de cultivo.

5.2.6. Modelagem matemática

O sistema proposto consiste em uma série de 10 reatores *airlifts* onde a entrada de um reator é a saída de outro formando um *loop*. O reator possui 10 entradas de gás na parte inferior, o gás pode ser ar comprimido, gases de exaustão ou até mesmo CO₂. O sistema fica alocado em ambiente externo. Um esquema de funcionamento do sistema de funcionamento do *airlift* seriado pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema de funcionamento do sistema de *airlift* seriado.



Fonte: O autor, 2021.

As hipóteses levantadas para a modelagem matemática foram:

- Reator homogêneo;
- Cada módulo de *airlift* se comporta como um reator perfeitamente agitado;
- Sistema adiabático;
- Temperatura média do ambiente é a mesma do reator;
- A composição do ar atmosférico: 78,98% N₂, 21% O₂ e 0,02% CO₂.

Para o desenvolvimento do modelo matemático serão apresentadas as equações utilizadas no Balanço de Massa e na Cinética de crescimento separadamente.

5.2.6.1. Balanço de Massa

O balanço de massa foi realizado levando em conta a biomassa, o nitrato total, o fosfato total, o gás carbônico e o oxigênio. O reator foi dividido em 10 volumes de controle, cada um deles representa um reator *airlift*. A corrente contendo o cultivo que entra no reator i é igual a corrente que sai do reator $i-1$, a

corrente de cultivo que sai do reator i é igual corrente que entra no reator $i+1$, além disso em cada um dos volumes de controle há entrada de ar atmosférico e uma saída de gases.

O balanço de massa para a biomassa está descrito na equação 5.1.

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot (X_{i-1} - X_i) + \mu \cdot X_i \quad (5.1)$$

Onde Q é a vazão da corrente, V o volume de cada *airlift*, X_i é a concentração de biomassa e μ é a taxa de conversão da reação de formação de biomassa.

O balanço de massa para o nitrato está descrito na equação 5.2.

$$\frac{d[NO_3]_i}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot ([NO_3]_{i-1} - [NO_3]_i) - Y_{\frac{NO_3}{X}} \cdot \mu \cdot X_i \quad (5.2)$$

Onde $[NO_3]$ é a concentração de nitrato e $Y_{\frac{NO_3}{X}}$ é a razão estequiométrica da reação de formação de biomassa entre o nitrato e a biomassa.

O balanço de massa para o fosfato está descrito na equação 5.3.

$$\frac{d[PO_4]_i}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot ([PO_4]_{i-1} - [PO_4]_i) - Y_{\frac{PO_4}{X}} \cdot \mu \cdot X_i \quad (5.3)$$

Onde $[PO_4]$ é a concentração de fosfato e $Y_{\frac{PO_4}{X}}$ é a razão estequiométrica da reação de formação de biomassa entre o fosfato e a biomassa.

O balanço de massa para o gás carbônico dissolvido na fase líquida está descrito na equação 5.4.

$$\frac{d[CO_2]_i}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot ([CO_2]_{i-1} - [CO_2]_i) - Y_{\frac{CO_2}{X}} \cdot \mu \cdot X_i + h_{mCO_2} \cdot ([CO_2]^* - [CO_2]_i) \quad (5.4)$$

Onde $[CO_2]$ é a concentração de gás carbônico dissolvido na fase líquida, e $Y_{\frac{CO_2}{X}}$ é a razão estequiométrica da reação de formação de biomassa entre o gás carbônico e a biomassa, h_{mCO_2} é o coeficiente de transferência de massa e $[CO_2]^*$ é a concentração de gás carbônico na interface, que pode ser determinada pela Lei de Henry descrita na equação 5.5.

$$[CO_2]^* = H_{CO_2} \cdot p_{CO_2} \quad (5.5)$$

Onde H_{CO_2} é a constante de Henry para o CO_2 e p_{CO_2} a pressão parcial do gás carbônico no gás que entra no reator.

O balanço de massa para o oxigênio dissolvido na fase líquida está descrito na equação 5.6.

$$\frac{d[O_2]_i}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot ([O_2]_{i-1} - [O_2]_i) + Y_{\frac{O_2}{X}} \cdot \mu \cdot X_i + h_{mO_2} \cdot ([O_2]^* - [O_2]_i) \quad (5.6)$$

Onde $[O_2]$ é a concentração de oxigênio dissolvido na fase líquida, e $\frac{Y_{O_2}}{X}$ é a razão estequiométrica da reação de formação de biomassa entre o oxigênio e a biomassa, h_{mO_2} é o coeficiente de transferência de massa e $[O_2]^*$ é a concentração de oxigênio na interface, que pode ser determinada de forma análoga a concentração de gás carbônico na interface.

5.2.6.2. Cinética de Crescimento

A cinética de crescimento leva em conta a temperatura, a intensidade luminosa, o gás carbônico dissolvido, o oxigênio dissolvido, o nitrato total e o fosfato total como demonstrado na equação 5.7 (Balmant, et al. 2011).

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \mu(T) \cdot \mu(I_0) \cdot \mu(CO_2) \cdot \mu(O_2) \cdot \mu(N_{Tot}) \cdot \mu(P_{Tot}) \quad (5.7)$$

Onde cada termo da equação representa a influência dessas variáveis na velocidade de reação. As equações para determinar cada um dos componentes da equação 5.7 podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Termos da equação de cinética de crescimento

Constante	Termo	Equação	Fonte
Temperatura	$\mu(T)$	$\mu(T) = a \cdot T^2 + b \cdot T + c$	Balmant et al., 2011.
Intensidade luminosa	$\mu(I_0)$	$\mu(I_0) = \frac{I_0}{\left(K_{I_0} + I_0 + \frac{I_0^2}{K_{I_0}}\right)}$	Aiba, 1982.
Gás carbônico	$\mu(CO_2)$	$\mu(CO_2) = \frac{CO_2}{\left(K_{CO_2} + CO_2 + \frac{CO_2^2}{K_{CO_2}}\right)}$	Andrews, 1986.
Oxigênio	$\mu(O_2)$	$\frac{A}{\left(1 + \left(\frac{O_2\%}{B}\right)^C\right)}$	Este trabalho.
Nitrato total	$\mu(N_{Tot})$	$\mu(N_{Tot}) = \frac{N_{Tot}}{\left(K_{N_{Tot}} + N_{Tot}\right)}$	Araújo et al., 2009.
Fosfato total	$\mu(P_{Tot})$	$\mu(P_{Tot}) = \frac{P_{Tot}}{\left(K_{P_{Tot}} + P_{Tot}\right)}$	Araújo et al., 2009.

Fonte: O autor, 2021.

A validação do modelo matemático será feita aplicando o modelo nos dados experimentais de Toledo-Cervantes et al. (2013), onde o crescimento da microalga *Scenedesmus obtusiusculus* é analisado com concentrações de CO_2 no gás de entrada de 0,4 vvm e 0,8 vvm e também dados experimentais de Ho et al. (2012) em que o crescimento da microalga *Scenedesmus obliquus* é analisado com uma quantidade de nitrato total de 120 mg/L. Todas as

simulações serão realizadas utilizando o software MATLAB®. Para resolução do sistema de equações diferenciais ordinárias foi utilizada a rotina ode23s da biblioteca do Matlab. Trata-se de uma rotina que utiliza um método implícito de 2°/3° ordem com passo adaptativo.

Em seguida é possível realizar uma análise paramétrica das variáveis do projeto determinando seu impacto e identificando possíveis oportunidades de otimização. Deverão ser feitas as análises de incertezas conforme metodologias de propagação de erro.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS DA LITERATURA

A validação do modelo matemático foi feita utilizando os dados experimentais de dois outros trabalhos: de Toledo-Cervantes et al. (2013) e de Ho et al. (2012).

Os resultados da validação do modelo com o estudo de Toledo-Cervantes et al. (2013) foram realizados com a entrada de ar contendo 0,4 vvm e de 0,8 vvm de CO₂ respectivamente. Os parâmetros de entrada para estas simulações podem ser observados na Tabela 5.

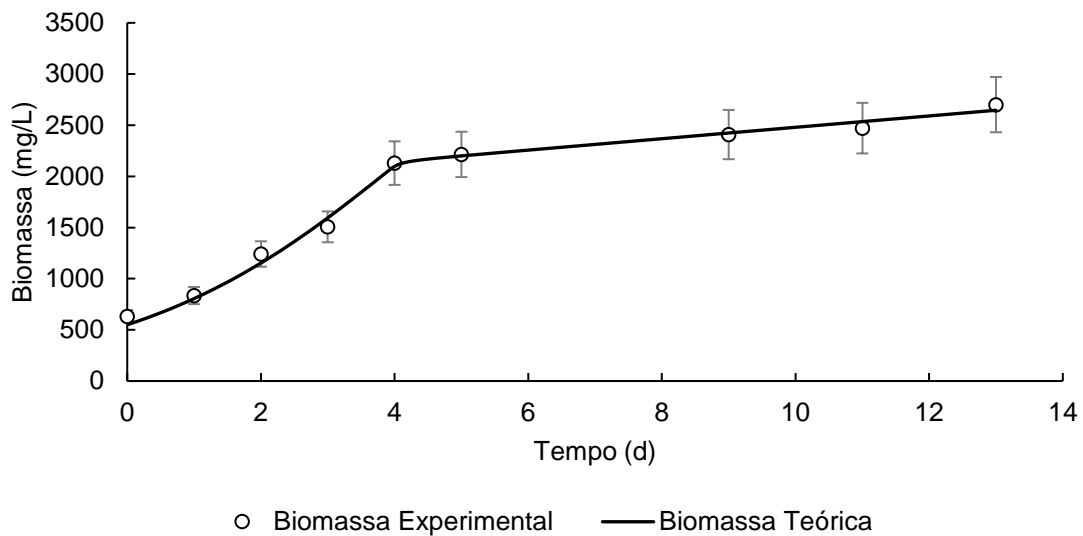
Tabela 5 - Parâmetros de entrada de Cervantes et al. (2012).

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
X _i	Concentração de biomassa inicial	550	mg.L ⁻¹
[NO ₃] _i	Concentração de nitrato inicial	1000	mg.L ⁻¹
[PO ₄] _i	Concentração de fosfato inicial	348	mg.L ⁻¹
[CO ₂] _i	Concentração de CO ₂ dissolvido inicial	0,6	mg.L ⁻¹
[O ₂] _i	Concentração de O ₂ dissolvido inicial	8,7	mg.L ⁻¹
P _{CO2}	Pressão parcial de CO ₂	0,02	bar
P _{O2}	Pressão parcial de O ₂	0,21	bar
h _{mCO2}	Coeficiente de transferência de massa do CO ₂	72,62 para 0,4 vvm e 200 para 0,8 vvm	dia ⁻¹
h _{mO2}	Coeficiente de transferência de massa do O ₂	0,037 para 0,4 vvm e 0,5 para 0,8 vvm	dia ⁻¹
K _{CO2}	Constante de saturação de CO ₂	1,05.10 ⁻⁶	-
K _{NO3}	Constante de saturação de NO ₃	922,39	-
K _{PO4}	Constante de saturação de PO ₄	85,07	-
A	Constante de ajuste A para o O ₂	1	-
B	Constante de ajuste B para o O ₂	33.182,42	-
C	Constante de ajuste C para o O ₂	99,32	-
μ _{max}	Taxa de conversão máxima	0,934	-
Y _{CO2}	Coeficiente estequiométrico do CO ₂	1,8	-
Y _{O2}	Coeficiente estequiométrico do O ₂	1,96	-
Y _{PO4}	Coeficiente estequiométrico do PO ₄	0,05	-
Y _{NO3}	Coeficiente estequiométrico do NO ₃	0,325	-
Q/V	Inverso do tempo de retenção	10	dia ⁻¹
nr	Número de reatores	1	-

FONTE: O autor, 2021.

A curva que representa o crescimento do cultivo para uma entrada de gás com 0,4 vvm de CO₂ apresentou resultados satisfatórios, como mostrado na Figura 16.

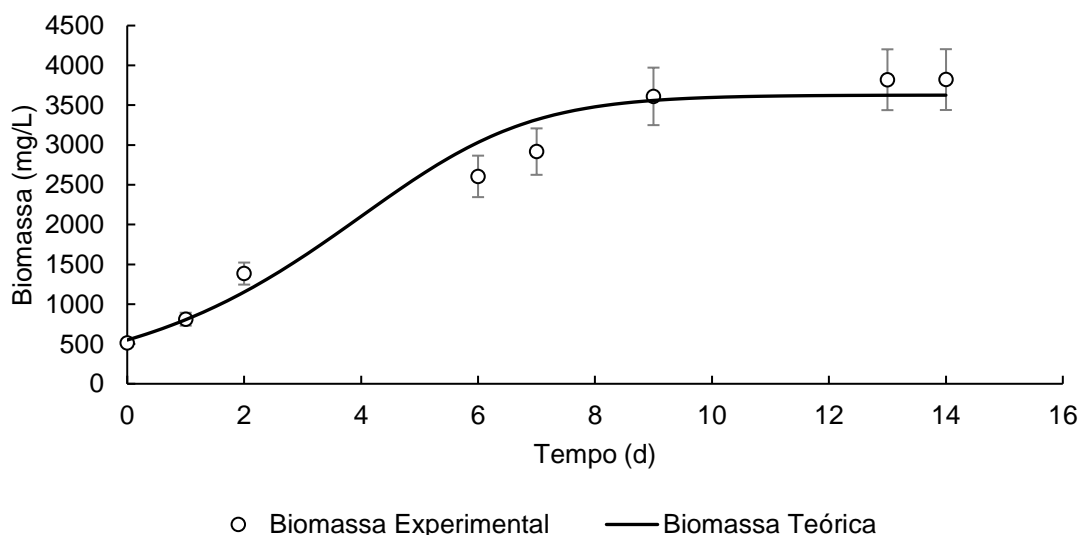
Figura 16 - Dados experimentais de biomassa com 0,4 vvm de CO₂ em comparação com modelo teórico.



FONTE: O autor, 2021.

Na mesma simulação foi obtida a curva de crescimento para a biomassa com 0,8 vvm de CO₂ no gás de entrada, que também apresentou bons resultados quando comparado aos dados experimentais como podem ser observados na Figura 17.

Figura 17 - Dados experimentais de biomassa com 0,8 vvm de CO₂ em comparação com modelo teórico.



FONTE: O autor, 2021.

Os resultados da validação do modelo utilizando os dados experimentais de Ho et al. (2012) foram realizados verificando a curva de produção de

biomassa e a curva de consumo de nitrato. Os parâmetros de entrada para estas simulações podem ser observados na Tabela 6.

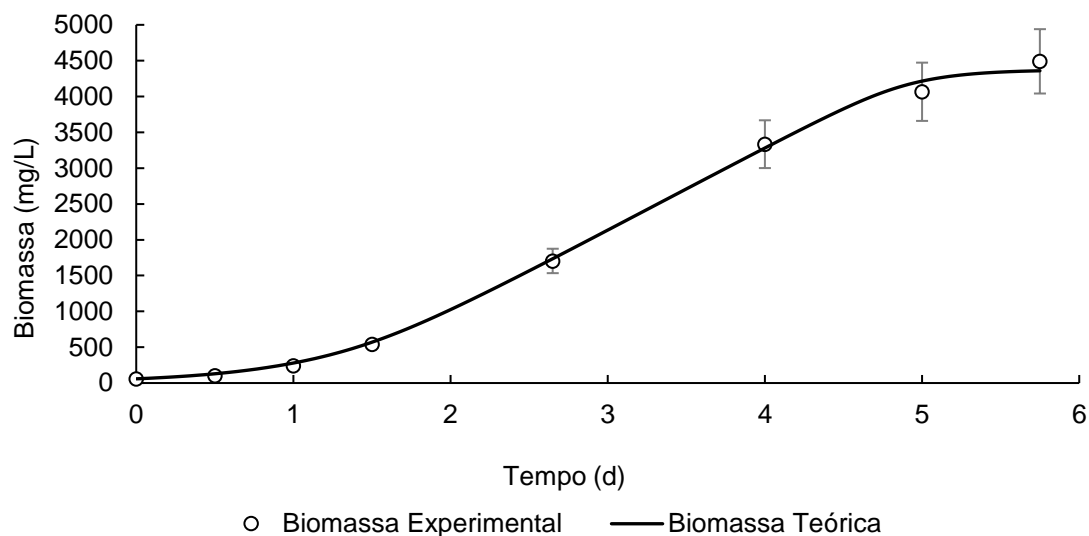
Tabela 6 - Parâmetros de entrada de Ho et al. (2012)

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
X_i	Concentração de biomassa inicial	59	mg.L ⁻¹
[NO ₃] _i	Concentração de nitrato inicial	117	mg.L ⁻¹
[PO ₄] _i	Concentração de fosfato inicial	348	mg.L ⁻¹
[CO ₂] _i	Concentração de CO ₂ dissolvido inicial	0,6	mg.L ⁻¹
[O ₂] _i	Concentração de O ₂ dissolvido inicial	8,7	mg.L ⁻¹
P _{CO2}	Pressão parcial de CO ₂	0,02	bar
P _{O2}	Pressão parcial de O ₂	0,21	bar
h _{mCO2}	Coeficiente de transferência de massa do CO ₂	74,8	dia ⁻¹
h _{mO2}	Coeficiente de transferência de massa do O ₂	5,8	dia ⁻¹
K _{CO2}	Constante de saturação de CO ₂	2,87	-
K _{NO3}	Constante de saturação de NO ₃	68,83	-
K _{PO4}	Constante de saturação de PO ₄	75,48	-
A	Constante de ajuste A para o O ₂	1	-
B	Constante de ajuste B para o O ₂	33.182,42	-
C	Constante de ajuste C para o O ₂	99,32	-
μ _{max}	Taxa de conversão máxima	3,395	-
Y _{CO2}	Coeficiente estequiométrico do CO ₂	1,8	-
Y _{O2}	Coeficiente estequiométrico do O ₂	1,96	-
Y _{PO4}	Coeficiente estequiométrico do PO ₄	0,05	-
Y _{NO3}	Coeficiente estequiométrico do NO ₃	0,027	-
Q/V	Inverso do tempo de retenção	10	dia ⁻¹
nr	Número de reatores	1	-

Fonte: O autor, 2021.

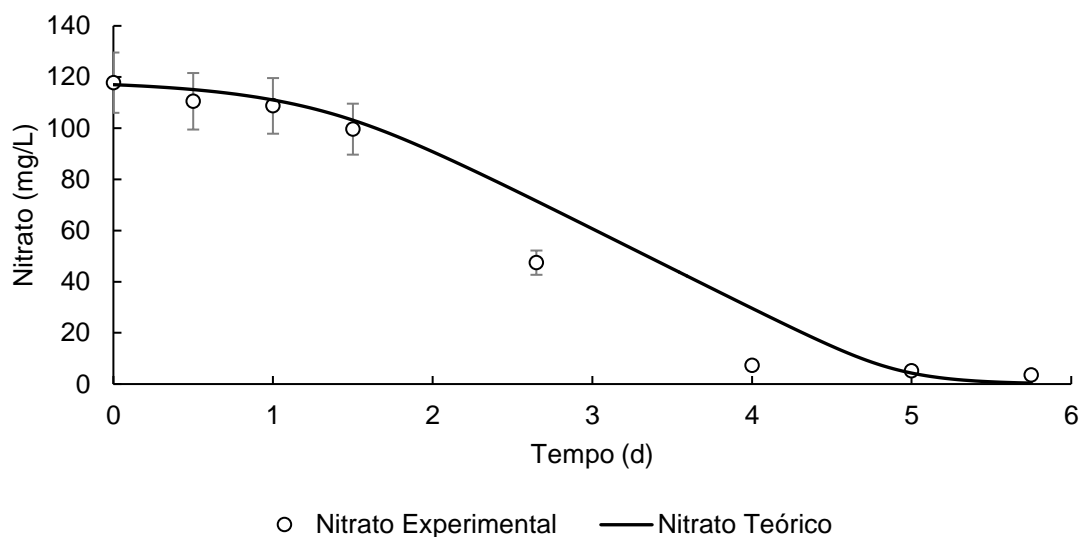
A curva de biomassa representada na Figura 18 apresentou bons resultados quando comparada aos dados experimentais, a curva de nitrato também apresentou bons resultados principalmente no início e no final do cultivo, como mostrado na Figura 19.

Figura 18 - Dados experimentais de produção de biomassa em comparação com modelo teórico.



FONTE: O autor, 2021.

Figura 19 - Dados experimentais de nitrato total em comparação com modelo teórico.



FONTE: O autor, 2021.

6.2. VALIDAÇÃO DO MODELO COM DADOS EXPERIMENTAIS

Os dados apresentados na Tabela 7 correspondem aos dados coletados do reator proposto. As amostras foram coletadas e os teste foram realizados entre as 14:00 e as 15:00 horas diariamente.

Tabela 7 - Dados experimentais.

Dia	pH	T (°C)	T _{ambiente} (°C)	Nº de células	Biomassa (g/L)	Absorbância
1	11,50	26,5	26	107	0,09833	0,231
2	11,30	23,9	23	347	0,11433	0,402
3	10,86	32,2	29	432	0,18633	0,588

4	10,85	29,2	29	348	0,24300	0,673
5	9,96	31,3	29	535	0,25533	0,822
6	9,89	26,8	26	530	0,31700	1,037
7	10,26	17,7	13	777	0,34000	1,360
8	10,96	18,7	14	1108	0,57700	2,409
9	11,01	18,1	14	823	0,42467	1,770
10	11,00	21,9	18	1193	0,48033	1,862
11	11,12	25,1	18	1400	0,51500	2,238
12	10,96	31,8	20	1593	0,47967	2,068
13	10,94	33,2	24	1650	0,70267	2,627

Fonte: O autor, 2021.

A validação do modelo matemático foi realizada utilizando os dados de biomassa seca presentes na Tabela 7. Os parâmetros de entrada da simulação estão apresentados na Tabela 8.

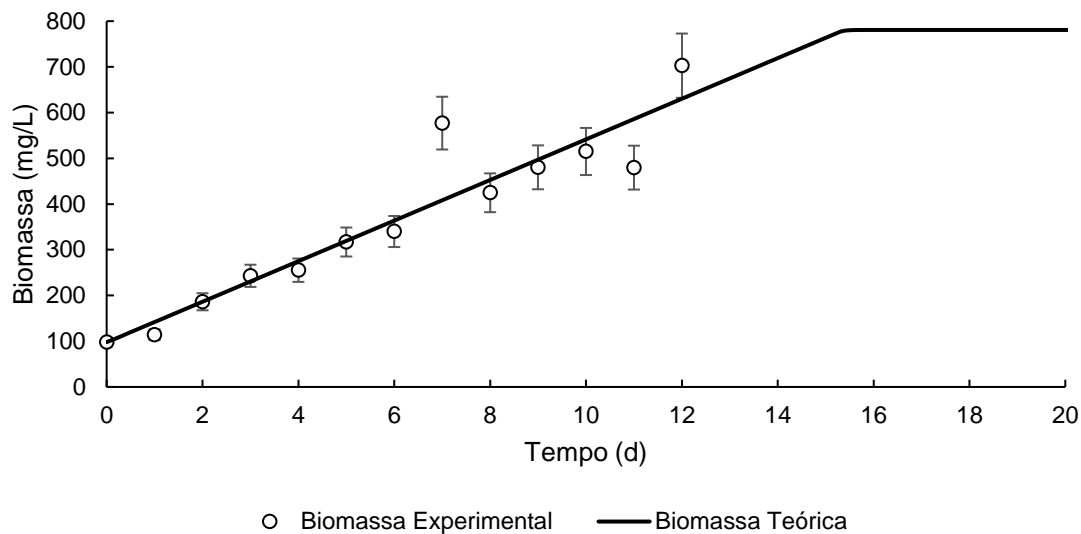
Tabela 8 - Parâmetros de entrada dados experimentais.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
X_i	Concentração de biomassa inicial	98,3	mg.L ⁻¹
$[NO_3]_i$	Concentração de nitrato inicial	182	mg.L ⁻¹
$[PO_4]_i$	Concentração de fosfato inicial	148	mg.L ⁻¹
$[CO_2]_i$	Concentração de CO ₂ dissolvido inicial	0,6	mg.L ⁻¹
$[O_2]_i$	Concentração de O ₂ dissolvido inicial	8,7	mg.L ⁻¹
P_{CO_2}	Pressão parcial de CO ₂	0,02	bar
P_{O_2}	Pressão parcial de O ₂	0,21	bar
h_{mCO_2}	Coeficiente de transferência de massa do CO ₂	45,29	dia ⁻¹
h_{mO_2}	Coeficiente de transferência de massa do O ₂	8,29	dia ⁻¹
K_{CO_2}	Constante de saturação de CO ₂	3,32	-
K_{NO_3}	Constante de saturação de NO ₃	3,57	-
K_{PO_4}	Constante de saturação de PO ₄	169,37	-
A	Constante de ajuste A para o O ₂	21,76	-
B	Constante de ajuste B para o O ₂	220,54	-
C	Constante de ajuste C para o O ₂	1804,73	-
μ_{max}	Taxa de conversão máxima	0,032	-
Y_{CO_2}	Coeficiente estequiométrico do CO ₂	1,8	-
Y_{O_2}	Coeficiente estequiométrico do O ₂	1,96	-
Y_{PO_4}	Coeficiente estequiométrico do PO ₄	0,05	-
Y_{NO_3}	Coeficiente estequiométrico do NO ₃	0,117	-
Q/V	Inverso do tempo de retenção	10	dia ⁻¹
nr	Número de reatores	10	-

Fonte: O autor, 2021.

A curva de biomassa apresentada na Figura 20 – Dado experimental de biomassa em comparação com modelo teórico. mostra a comparação entre os pontos obtidos experimentalmente e a curva obtida pela simulação. Nota-se que o modelo se adequou de forma satisfatória ao conjunto de dados experimentais.

Figura 20 – Dado experimental de biomassa em comparação com modelo teórico.



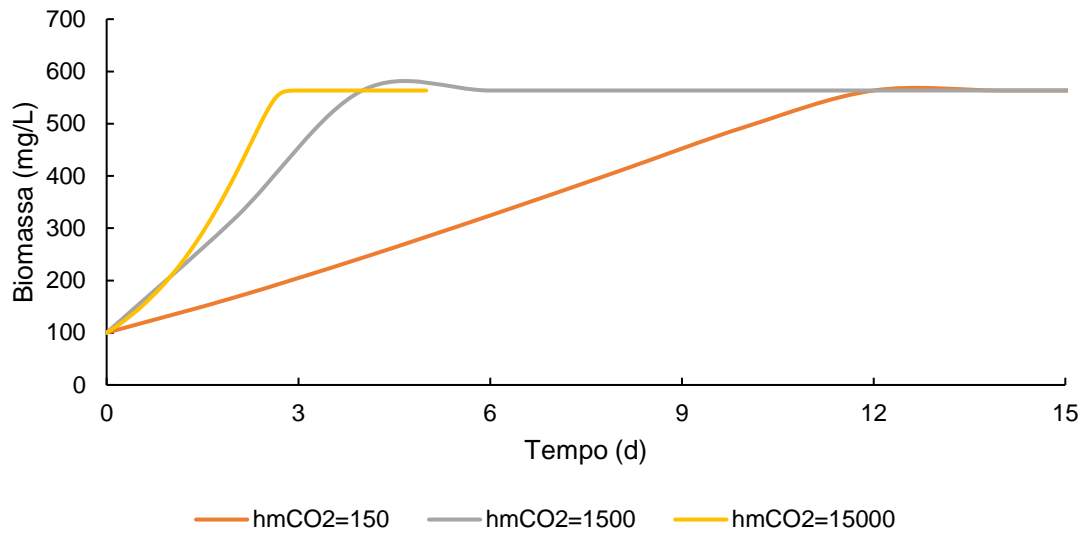
FONTE: O autor, 2021.

Pela curva da simulação é possível notar que pela velocidade de crescimento que o cultivo estava apresentando e pela quantidade de nutrientes que foram adicionados, seria possível obter um aumento de biomassa até o dia 15, sendo que o cultivo foi levado até o dia 12.

6.3. ANÁLISE PARAMÉTRICA

Com o modelo validado utilizando três dados experimentais diferentes, foi possível realizar uma análise paramétrica a fim de observar quais variáveis podem ser controladas para que haja maior produção de microalgas com o menor custo de processo.

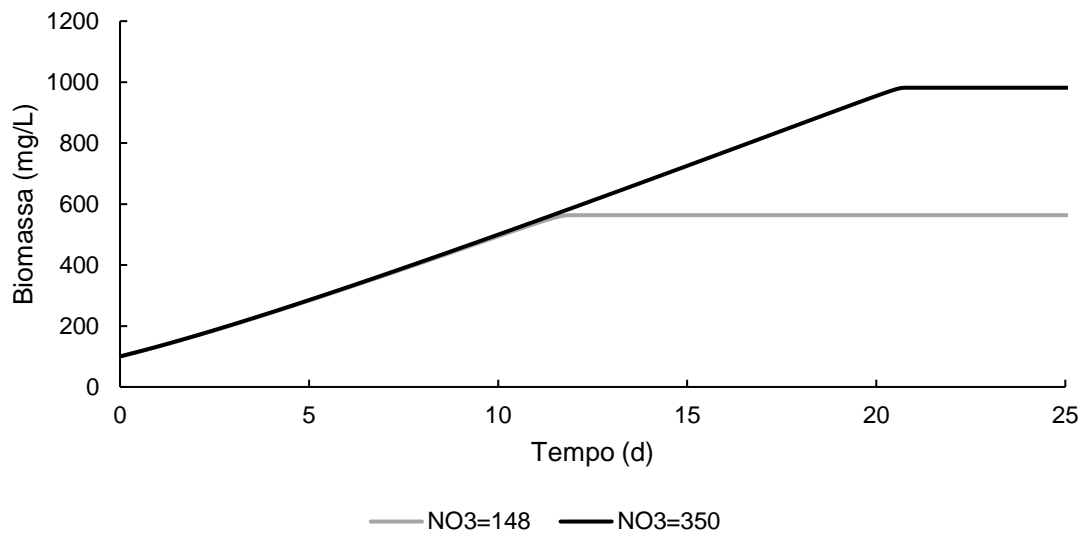
Fixando as demais variáveis, foi alterado o valor do coeficiente de transferência de massa do CO_2 (h_{mCO_2}) para verificar qual seria seu efeito na produção de biomassa. A Figura 21 mostra a produção de biomassa alterando a ordem de grandeza do coeficiente de transferência de massa. Os valores testados foram 150 dia^{-1} , 1500 dia^{-1} e 15000 dia^{-1} .

Figura 21 - Variação da produção de biomassa para diferentes hmCO₂

FONTE: O autor, 2021.

Nota-se que quanto melhor for a troca gasosa mais rápido se dará o crescimento da microalga. Apesar do valor de 15000 dia⁻¹, não representar um valor real, é possível observar que a partir de 1500 dia⁻¹ não há tanto ganho em produtividade, portanto forçar a troca gasosa aumentando a vazão do gás de entrada pode ser benéfico até certo limite, que se ultrapassado pode significar apenas maior gasto energético sem retorno em produtividade.

A segunda análise foi realizada variando a quantidade de nitrato disponível no meio no início do cultivo obtendo o perfil de crescimento da biomassa em função do tempo. As quantidades de nitrato inicial analisadas foram de 148 mg/L e 350 mg/L, as curvas de crescimento para esses dois valores podem ser observadas na Figura 22.

Figura 22 - Variação da produção de biomassa para diferentes concentrações de NO₃

FONTE: O autor, 2021.

É importante notar que o nitrato não possui influência na velocidade de crescimento da microalga, ele funciona como fator limitante de crescimento. Portanto, aumentar a quantidade de nitrato não aumentará a produtividade, mas sim a quantidade de biomassa produzida.

7. CONCLUSÕES

Levando em conta os objetivos específicos propostos, a presente pesquisa conseguiu realizar o desenvolvimento experimental do fotobiorreator a fluxo de ar de elevação com tubos seriados para produção de microalgas, também foi possível elaborar o modelo matemático bem como seu ajuste e validação usando dados experimentais de outros estudos e dados experimentais coletados do reator proposto. De acordo com as simulações e análises paramétricas realizadas no software MATLAB® foi possível concluir que:

- O modelo matemático proposto é válido pois simulou satisfatoriamente dois conjuntos de dados de dois experimentos da literatura e um conjunto de dados do reator proposto;
- A análise realizada variando os valores da constante de transferência de massa do CO₂ ressaltaram a importância desse gás para a produção de microalgas e salientaram a necessidade de maximizar a transferência de massa no reator, desde que não se dispenda muita energia nesse processo;
- A análise feita com as variações das concentrações iniciais de nitrato mostraram que a dosagem de nitrato no meio de cultivo deve ser adequada a quantidade de biomassa que se deseja produzir, visto que pouco nitrato pode acarretar em uma concentração final de biomassa baixa e muito nitrato pode significar um desperdício desse nutriente se a microalga entrar na fase de declínio antes de consumir todo o nitrato disponível.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante toda a etapa de planejamento e execução do projeto do reator *airlift* sequencial, muitas questões e oportunidades de pesquisa foram levantadas, porém devido ao tempo disponível para a execução desse trabalho foram colocadas para serem realizadas em etapas futuras por outros trabalhos de pesquisa. São algumas delas:

1) Realizar outros testes experimentais no reator, variando o tipo de meio de cultivo e seus impactos na produção de biomassa. Como sugestão, a utilização de dejetos suínos em diferentes quantidades para verificar como o sistema se adequa a esse tipo de meio de cultivo.

2) Produzir uma análise exérgica do sistema localizando e otimizando possíveis perdas existentes no sistema, principalmente no circuito de injeção de ar onde devem estar as maiores perdas.

3) Uma análise econômica do processo de produção de biomassa nesse tipo de reator juntamente com um possível escalonamento desse reator para volumes maiores.

REFERÊNCIAS

ALMOMANI, F., AL KETIFE, A. M. D., JUDD, S., SHURAIR, M., BHOSALE, R., ZNAD, H., & TAWALBEH, M. **Impact of CO₂ concentration and ambient conditions on microalgal growth and nutrient removal from wastewater by a photobioreactor.** *Science of The Total Environment*, Volume 662, 2019, Pages 662-671. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.144>.

ALMOMANI, F. (2020). **Kinetic modeling of microalgae growth and CO₂ bio-fixation using central composite design statistical approach.** *Science of The Total Environment*, 137594

ARAUJO, G. S., SILVA, J. W. A., VIANA, C. A. S., FERNANDES, F. A. N. **Effect of sodium nitrate concentration on biomass and oil production of four microalgae species.** *International Journal of Sustainable Energy*, 1–10, 2019. <https://doi.org/10.1080/14786451.2019.1634568>.

ARUMUGAM, M., AGARWAL, A., ARYA, M. C., & AHMED, Z. **Influence of nitrogen sources on biomass productivity of microalgae *Scenedesmus bijugatus*.** *Bioresource Technology*, Volume 131, Pages 246-249, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.159>.

BALMANT, W., CÔRREA, D.O., SANTOS, B., SELESU, N.F.H., MARIANO, A.B., VARGAS, J.V.C. **Modelagem matemática da produção de biomassa de microalgas cultivadas com emissões de um motor diesel.** Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Fortaleza, 2016.

BALMANT, W., et. al. **Stoichiometric model of the cultivation of microalgae in industrial systems.** COBEM 2011 - 21st international Congress of mechanical engineering, Natal, 2011.

BANERJEE, S., RAMASWAMY, S. **Dynamic process model and economic analysis of microalgae cultivation in open raceway ponds.** *Algal Research*, Volume 26, Pages 330-340, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.08.011>.

BERNARD, O., RÉMOND, B. **Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth.** *Bioresource Technology*, 123, 520–527. doi:10.1016/j.biortech.2012.07.022

CHEN, C.Y., YEH, K.L., AISYAH, R., LEE, D.J., CHANG, J.S. **Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review.** *Bioresource Technology* 102 (1), 71–81, 2011.

CHEN, Y., XU, C., VAIDYANATHAN, S. **Influence of gas management on biochemical conversion of CO₂ by microalgae for biofuel production.** *Applied Energy*, Volume 261, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114420>.

CHENG, J., XU, J., YE, Q., LAI, X., ZHANG, X., ZHOU, J. **Strengthening mass transfer of carbon dioxide microbubbles dissolver in a horizontal tubular**

photo-bioreactor for improving microalgae growth. Bioresource Technology, Volume 277, Pages 11-17, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.019>.

CHIARAMONTI, D., PRUSSI, M., CASINI, D., TREDICI, M. R., RODOLFI, L., BASSI, N., BONDIOLI, P. **Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible.** Applied Energy, Volume 102, Pages 101-111, 2013 <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.040>.

COÊLHO, Diego De Freitas, et al. **Microalgae: Cultivation Aspects and Bioactive Compounds.** Brazilian Archives of Biology and Technology [online]. 2019, v. 62 Acesso em: 7 June 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1678-4324-2019180343>>.

CONVERTI, A., LODI, A., DEL BORGHI, A., & SOLISIO, C. **Cultivation of Spirulina platensis in a combined airlift-tubular reactor system,** Biochemical Engineering Journal, Volume 32, Issue 1, 2006, Pages 13-18, <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.08.013>.

CORRÊA, D. O. **Desenvolvimento e caracterização do cultivo de microalgas em Fotobiorreator alimentado por emissões gasosas de motores.** 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

CHU, S.P. **The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae.** Journal of Ecology, v. 30, p. 284-325, 1942.

FERNÁNDEZ, F.G.A., SEVILLA, J.M.F., PÉREZ, J.A.S., GRIMA, E.M., CHISTI, Y. **Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance.** Chemical Engineering Science, Volume 56, Issue 8, Pages 2721-2732, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(00\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(00)00521-2).

GARCÍA-CUBERO, R.; MORENO-FERNÁNDEZ, J.; GARCÍA-GONZÁLEZ, M. **Modelling growth and CO₂ fixation by Scenedesmus vacuolatus in continuous culture.** Algal Research, v. 24, p. 333-339, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.04.018>.

GUDIN, C., CHAUMONT, D. **Cell fragility — The key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors.** Bioresource Technology, v. 38, n. 2-3, p. 145-151, 1991.

HO, S.H., CHEN, C.Y., CHANG, J.S. **Effect of light intensity and nitrogen starvation on CO₂ fixation and lipid/carbohydrate production of an indigenous microalga Scenedesmus obliquus CNW-N.** Bioresource Technology, Volume 113, Pages 244-252, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.133>.

HO, S.H., CHEN, C.Y., LEE, D.J., CHANG, J.S. **Perspectives on microalgal CO₂ emission mitigation systems – a review.** Biotechnology Advances 29 (2), 189–198, 2011.

HULATT, C. J., THOMAS, D. N. **Productivity, carbon dioxide uptake and net energy return of microalgal bubble column photobioreactors.** *Bioresource Technology*, Volume 102, Issue 10, Pages 5775-5787, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.025>.

JIA, J., HAN, D., GERKEN, H. G., LI, Y., SOMMERFELD, M., HU, Q., XU, J. **Molecular mechanisms for photosynthetic carbon partitioning into storage neutral lipids in *Nannochloropsis oceanica* under nitrogen-depletion conditions.** *Algal Research*, 7, 66-77, 2015.

KAZBAR, A., COGNE, G., URBAIN, G., MAREC, H., LE-GOUIC, H., TALLEC, J. TAKACHE, H., ISMAIL, A., PRUVOST, J. **Effect of dissolved oxygen concentration on microalgal culture in photobioreactors.** *Algal Research*, Volume 39, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101432>.

KHALILI, A., NAJAFPOUR, G.D., AMINI, G. et al. **Influence of nutrients and LED light intensities on biomass production of microalgae *Chlorella vulgaris*.** *Biotechnol Bioproc E* 20, 284–290, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12257-013-0845-8>.

KUMAR, K., DASGUPTA, C. N., NAYAK, B., LINDBLAD, P., DAS, D. **Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria.** *Bioresource Technology*, 102(8), 4945–4953, 2011. [doi:10.1016/j.biortech.2011.01.054](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.054)

LI, M.J., TONG, Z.X., ZHOU, Z.J., HUANG, D., & WANG, R.L. (2019). **A numerical model coupling bubble flow, light transfer, cell motion and growth kinetics for real timescale microalgae cultivation and its applications in flat plate photobioreactors.** *Algal Research*, 44, 101727.

LIAO, Qiang et al. **Physiological-phased kinetic characteristics of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and lipid synthesis considering synergistic effects of light, carbon and nutrients.** *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 250, p.583-590, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.086>.

LOUBIÈRE, K., OLIVO, E., BOUGARAN, G., PRUVOST, J., ROBERT, R. AND LEGRAND, J. **A new photobioreactor for continuous microalgal production in hatcheries based on external-loop airlift and swirling flow.** *Biotechnol. Bioeng.*, 102: 132-147, 2009. <https://doi.org/10.1002/bit.22035>.

LOURENÇO, S. O. **Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações.** São Carlos: RiMa. 2006.

MASOJÍDEK, J., KOBLÍŽEK, M. AND TORZILLO, G. **Photosynthesis in Microalgae.** In *Handbook of Microalgal Culture*, A. Richmond (Ed.), 2003. <https://doi.org/10.1002/9780470995280.ch2>

MINISTÉRIO DE MINAS (MME). **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2018.** Brasília, maio 2019. Disponível em:

<<http://www.mme.gov.br/documents/36208/948169/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+++edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v3.pdf/92ed2633-e412-d064-6ae1-eefac950168b>> Acesso em: 18 maio 2020.

MIYAWAKI, B.; COELHO, J. V.; MARIANO, A. B.; CORREA, D. O.; SANTOS, B. **'Fotobiorreator tubular para tratamento integrado de efluentes líquidos e emissões'**. 2013, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020130263958, título: "'Fotobiorreator tubular para tratamento integrado de efluentes líquidos e emissões'", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 14/10/2013.

MOLAZADEH, M., DANESH, S., AHMADZADEH, H., & POURIANFAR, H. R. **Influence of CO₂ concentration and N:P ratio on *Chlorella vulgaris*-assisted nutrient bioremediation, CO₂ biofixation and biomass production in a lagoon treatment plant**. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, Volume 96, Pages 114-120, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2019.01.005>.

PRADHAN, L.; BHATTACHARJEE, V.; MITRA, R.; BHATTACHARYA, I.; CHOWDHURY, R. **Biosequestration of CO₂ using power plant algae (*Rhizoclonium hieroglyphicum* JUCHE2) in a Flat Plate Photobio-Bubble-Reactor-Experimental and modeling**. Chemical Engineering Journal, v. 275, p. 381-390, 2015.

RODRÍGUEZ-MIRANDA, E, ACIÉN, FG, GUZMÁN, JL, BERENGUEL, M, VISIOLI, A. **A new model to analyze the temperature effect on the microalgae performance at large scale raceway reactors**. Biotechnology and Bioengineering. 2021; 118: 877– 889. <https://doi.org/10.1002/bit.27617>

SAJJADI, Baharak et al. **Microalgae lipid and biomass for biofuel production: A comprehensive review on lipid enhancement strategies and their effects on fatty acid composition**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [s.l.], v. 97, p.200-232, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.050>.

SANTOS, B. **Estratégias para aumentar a produtividade de biomassa de microalgas com carbono orgânico**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - UFPR, Curitiba, 2016.

SIAUT, M., CUINE, S., CAGNON, C., FESSLER, B., NGUYEN, M., CARRIER, P., BEYLY, A., BEISSON, F., TRIANTAPHYLIDES, C., LI-BEISSON, Y.H., PELTIER, G. **Oil accumulation in the model green alga *Chlamydomonas reinhardtii*: characterization, variability between common laboratory strains and relationship with starch reserves**. BMC Biotechnology, 11, 2011.

SINGH, R.N., SHARMA, S. **Development of suitable photobioreactor for algae production – A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 31, n. 4, p. 2347-2353, 2012.

SU, G., JIAO, K., LI, Z. et al. **Phosphate limitation promotes unsaturated fatty acids and arachidonic acid biosynthesis by microalgae *Porphyridium***

purpureum. *Bioprocess Biosyst Eng* 39, 1129–1136, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1589-6>

TAHER, D.M. **Validação experimental e otimização de um modelo matemático de sistema de fixação de emissões por cultivo de microalgas em Fotobiorreatores industriais.** 2019. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – UFPR, Curitiba, 2019.

TONG, Z.X., LI, M.J., YAN, J.J., GU, Z.L. (2020). **A theoretical analysis of the hydrodynamic influence on the growth of microalgae in the photobioreactors with simple growth kinetics.** *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 158, 119986.

UGWU, C.U., AOYAGI, H. & UCHIYAMA, H. **Influence of irradiance, dissolved oxygen concentration, and temperature on the growth of *Chlorella sorokiniana*.** *Photosynthetica* 45, 309–311, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11099-007-0052-y>.

VALDÉS, F. J., HERNÁNDEZ, M. R., CATALÁ, L., MARCILLA, A. **Estimation of CO₂ stripping/CO₂ microalgae consumption ratios in a bubble column photobioreactor using the analysis of the pH profiles. Application to *Nannochloropsis oculata* microalgae culture,** *Bioresource Technology*, Volume 119, Pages 1-6, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.120>.

VALIORGUE, P.; HADID, H. B.; HAJEM, M. E.; RIIMBAUD, L.; MULLER-FEUGA, A.; CHAMPAGNE, J. Y. **CO₂ mass transfer and conversion to biomass in a horizontal gas–liquid photobioreactor.** *Chemical Engineering Research and Design*, v. 92, n. 10, p. 1891-1897, 2014.

VARGAS, J. et al. **A numerical model to predict the thermal and psychrometric response of electronic packages.** *Journal of Electronic Packaging*, v. 123, n. 3, p. 200-210, 2001.

VARGAS, José Viriato Coelho; ARAKI, Luciano Kiyoshi. **Cálculo numérico aplicado.** Barueri - Sp: Manole, 2017.

WAHIDIN, S.; IDRIS, A.; SHALEH, S.R.M. **The influence of light intensity and photoperiod on the growth and lipid content of microalgae *Nannochloropsis sp.*** *Bioresource Technology*, Volume 129, 2013, Pages 7-11, ISSN 0960-8524. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.11.032>.

ZHAN, Jiao; RONG, Junfeng; WANG, Qiang. **Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect.** *International Journal Of Hydrogen Energy*, [s.l.], v. 42, n. 12, p.8505-8517, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.021>.

YOO, Sung Jin; KIM, Jung Hun; LEE, Jong Min. **Dynamic modelling of mixotrophic microalgal photobioreactor systems with time-varying yield coefficient for the lipid consumption.** *Bioresource Technology*, [s.l.], v. 162,

p.228-235, jun. 2014. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.03.128>.

ZHANG, K., KURANO, N., MIYACHI, S. **Optimized aeration by carbon dioxide gas for microalgal production and mass transfer characterization in a vertical flat-plate photobioreactor.** *Bioprocess Biosyst Eng* 25, 97–101, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00449-002-0284-y>

ZIMMERMAN, W. B., ZANDI, M., HEMAKA BANDULASENA, H. C., TESARŇ, V., JAMES GILMOUR, D., & YING, K. **Design of an airlift loop bioreactor and pilot scales studies with fluidic oscillator induced microbubbles for growth of a microalgae *Dunaliella salina*.** *Applied Energy*, Volume 88, Issue 10, Pages 3357-3369, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.013>.