

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Modelagem hidrodinâmica de lagoas de alta taxa: avaliação da dinâmica
Computacional de Fluidos e otimizações de projeto**

Bruno Silva Henriques
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

BRUNO SILVA HENRIQUES

**Modelagem hidrodinâmica de lagoas de alta taxa: avaliação da dinâmica
Computacional de Fluidos e otimizações de projeto**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Maria Lucia Calijuri

Coorientador: Eduardo de Aguiar do Couto

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

H519m
2025
Henriques, Bruno Silva, 1999-
Modelagem hidrodinâmica de lagoas de alta taxa: avaliação da dinâmica computacional de fluidos e otimizações de projeto / Bruno Silva Henriques. – Viçosa, MG, 2025.
1 dissertação eletrônica (83 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Maria Lúcia Calijuri.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.425>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Lagoas de estabilização. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Hidrodinâmica. 4. Águas residuais - Purificação - Tratamento biológico. I. Calijuri, Maria Lúcia, 1955-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 628.351

BRUNO SILVA HENRIQUES

Modelagem hidrodinâmica de lagoas de alta taxa: avaliação da dinâmica Computacional de Fluidos e otimizações de projeto

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

Bruno Silva Henriques
Autor

Maria Lucia Calijuri
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 25/06/2025 às 14:00:32 e pela orientadora em 25/06/2025 às 14:19:29. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **Q4MS.KABV.YC8R** e clique no botão 'Validar documento'.

À Deus.

Aos meus pais José Luiz e Rosângela.

Aos meus avós Hélio e Maria Rita.

In memoriam à Regina e José Henriques.

Aos meus tios Rodrigo, Paulo e Maria Lúcia.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tornar este trabalho possível, concedendo-me luz e tranquilidade.

Aos meus pais, José Luiz Henriques e Rosângela Hilário da Silva Henriques, pelo amor incondicional e por me ensinarem a perseverar em todos os desafios e obstáculos. Não existem minhas conquistas, mas sim nossas!

Aos meus avós, tias, tios, primos e primas pela compreensão pela distância e por todo o amor que me dedicam e que me fortalece.

À Universidade Federal de Viçosa pelas oportunidades de ensino e amadurecimento.

À professora Maria Lúcia Calijuri pela orientação e oportunidade de conduzir este trabalho. Agradeço pela paciência, gentileza, atenção e confiança ao longo desses meses de parceria. Obrigado pelo exemplo de dedicação à pesquisa e por todos os conselhos, que levo comigo na vida profissional e pessoal.

Ao professor Eduardo de Aguiar do Couto por ter aceitado me coorientar ao longo deste trabalho, por suportar os atrasos e paciência comigo. Sem você este trabalho não seria possível.

Ao professor Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá por ter aceitado me ajudar na hora que mais precisei. A modelagem CFD não teria saído sem as suas contribuições. À pós-doutoranda Nayara Vilela Avelar pela ajuda ao longo desta dissertação, ajudando desde a criação dos objetivos deste trabalho até a escrita do mesmo. À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do curso de Engenharia Ambiental.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Aos colegas do SIGEOnPA pelo convívio e aprendizado diário. Em especial aos amigos Arthur, Thiago, Matheus, Alexia, Lara, Nay, Ana Paula e Ju pela amizade, carinho e apoio ao longo desses anos.

À Ana Luiza por todo amor, cuidado e por estar ao meu lado em todos os momentos.

“Tudo posso naquele que me fortalece.
Amém”.
(Filipenses 4:13)

RESUMO

HENRIQUES, Bruno Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Modelagem hidrodinâmica de lagoas de alta taxa: avaliação da dinâmica Computacional de Fluidos e otimizações de projeto.** Orientadora: Maria Lucia Calijuri. Coorientador: Eduardo de Aguiar do Couto.

O uso de lagoas de alta taxa (LAT) para o tratamento de águas residuárias e a produção de biomassa microalgal apresenta grande potencial sustentável, mas ainda enfrenta desafios operacionais, especialmente relacionados à hidrodinâmica do sistema. Esta dissertação emprega a dinâmica computacional de fluidos (CFD) para investigar e otimizar a circulação do fluido dentro das LATs, visando reduzir zonas mortas (ZM) e melhorar, indiretamente, a eficiência do tratamento e a produtividade da biomassa. No primeiro capítulo é realizada uma análise detalhada sobre a aplicação da CFD em LATs, identificando as principais tendências científicas, desafios e inovações no campo. Os resultados apontam a crescente relevância da modelagem hidrodinâmica para aprimorar o desempenho desses sistemas. O segundo capítulo apresenta simulações CFD aplicadas a diferentes configurações geométricas de LATs, com o objetivo de avaliar os efeitos das variáveis operacionais, especialmente a velocidade do escoamento e a profundidade do fluido. Os resultados indicaram que a velocidade é o principal fator na mitigação das ZM, com efeito positivo observado até $0,38\text{ m/s}$, enquanto a profundidade não apresentou influência estatisticamente significativa. A configuração mais eficiente foi obtida com profundidade de $0,50\text{ m}$ e velocidade de entrada de $0,40\text{ m/s}$, resultando em apenas $9,02\%$ de ZM. O controle adequado da velocidade se mostrou determinante para melhorar o desempenho hidrodinâmico das LATs. Esses resultados reforçam a aplicação da CFD como uma ferramenta essencial para o projeto e a otimização de LATs, contribuindo significativamente para a melhoria dos processos de saneamento ambiental.

Palavras-chave: Lagoa de alta taxa; CFD; Hidrodinâmica; Otimização de projeto; Tratamento de águas residuárias

ABSTRACT

HENRIQUES, Bruno Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Hydrodynamic modeling of high-rate ponds: Computational Fluid Dynamics assessment and design optimizations.** Adviser: Maria Lucia Calijuri. Co-adviser: Eduardo de Aguiar do Couto.

The use of High-Rate Algal Ponds (HRAP) for wastewater treatment and microalgal biomass production presents significant sustainable potential but still faces operational challenges, particularly related to the system's hydrodynamics. This dissertation employs Computational Fluid Dynamics (CFD) to investigate and optimize fluid circulation within HRAPs, aiming to reduce dead zones (DZ) and indirectly improve both treatment efficiency and biomass productivity. The first chapter provides a detailed analysis of CFD applications in HRAPs, identifying key scientific trends, challenges, and innovations in the field. The results highlight the growing relevance of hydrodynamic modeling in enhancing the performance of these systems. The second chapter presents CFD simulations applied to different geometric configurations of HRAPs, aiming to evaluate the effects of operational variables, especially flow velocity and fluid depth. The results indicated that velocity is the primary factor in reducing DZ, with a positive effect observed up to 0.38 m/s, while depth showed no statistically significant influence. The most efficient configuration was achieved with a depth of 0.50 m and an inlet velocity of 0.40 m/s, resulting in only 9.02% of DZ. Proper velocity control proved to be crucial for improving the hydrodynamic performance of HRAPs. These findings reinforce CFD as an essential tool for the design and optimization of HRAPs, contributing significantly to advancements in environmental sanitation processes.

Keywords: High-Rate Pond; CFD; Hydrodynamics; Design optimization; Wastewater treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Lagoas de alta taxa da área experimental do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) – UFV	18
Figura 5.1 - Tendências anuais de publicações e citações sobre a aplicação de CFD em LATs (2010-2025)	26
Figura 5.2 - Mapa global de colaboração	27
Figura 5.3 - Rede de coocorrência de palavras-chave	28
Figura 5.4 - Diagrama de <i>Sankey</i>	30
Figura 5.5 - Diagrama estratégico das palavras-chave dos autores	31
Figura 6.1 - (A) Vista aérea das LATs na área experimental; (B) Vista esquemática da lagoa a ser utilizada	53
Figura 6.2 - (A) Modelo geométrico criado no <i>Ansys Design Modeler</i> ; (B) Regiões de <i>inlet</i> e <i>outlet</i>	54
Figura 6.3 - Malha criada no <i>Ansys Design Mesh</i>	54
Figura 6.4 - Seção 1, 2 e 3	56
Figura 6.5 - Seção 4 determinada para a validação do modelo CFD	58
Figura 6.6 - Linhas de corrente no plano XZ, a 0,30 m do fundo, coloridas de acordo com a magnitude da velocidade (m/s) na lagoa de alta taxa investigada	60
Figura 6.7 - Simulação do campo de velocidade na lagoa de alta taxa: T1 - profundidade de 0,20 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,10 m/s; T2 - profundidade de 0,20 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,25 m/s; T3 - profundidade de 0,20 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,40 m/s; T4 - profundidade de 0,35 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,10 m/s; T5 - profundidade de 0,35 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,25 m/s; T6 - profundidade de 0,35 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,40 m/s; T7 - profundidade de 0,50 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,10 m/s; T8 - profundidade de 0,50 m e velocidade de <i>inlet</i> de 0,25 m/s; e T9 - profundidade de 0,50 m e velocidade de <i>inlet</i> 0,40 m/s	62

Figura 6.8 - Efeito da profundidade e velocidade de escoamento nas zonas mortas 63

Figura 6.9 - Distribuição das zonas mortas na lagoa de alta taxa: T1 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T2 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T3 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T4 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T5 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T6 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T7 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T8 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; e T9 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* 0,40 m/s 64

Figura 6.10 - (A) Gráfico de contorno; (B) Gráfico de superfície de resposta ... 66

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Constantes das equações do modelo de turbulência <i>Shear Stress Transport</i>	56
Tabela 6.2 - Delineamento experimental	59
Tabela 6.3 - Condições operacionais das reações realizadas	59
Tabela 6.4 - Velocidade do fluxo na seção quatro da lagoa de alta taxa usando dinâmica de fluidos computacional e método do flutuador	60

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 5.1	40
Equação 6.1	55
Equação 6.2	56
Equação 6.3	56
Equação 6.4	67

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALSRWP	<i>Airlifting</i>
ANOVA	Análise de variância
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO ₂	Dióxido de carbono
C/L	Comprimento/largura
DE	Palavras-chave dos autores
DEC	Departamento de Engenharia Civil
DOI	<i>Digital Object Identifier</i>
EDE	Estruturas defletoras de eletrodos
EUA	Estados Unidos da América
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais
FBRs	Fotobiorreatores
H ₀	Hipótese nula
H ₁	Hipótese alternativa
ID	Palavras-chave utilizadas por revistas
IMV	Índice de mistura vertical
LAT	Lagoa de alta taxa
L/D	Claro/escuro
L/W	Comprimento/largura
O ₂	Oxigênio
pH	Potencial hidrogeniônico
R ²	Coefficiente de determinação

rpm	Rotações por minuto
SIGEOOnPA	Soluções em Informações Geoespaciais e Núcleo de Pesquisas Ambientais Avançadas
SO	Periódicos de publicação
S1	Seção 1
S2	Seção 2
S3	Seção 3
S4	Seção 4
T1	Tratamento 1
T2	Tratamento 2
T3	Tratamento 3
T4	Tratamento 4
T5	Tratamento 5
T6	Tratamento 6
T7	Tratamento 7
T8	Tratamento 8
T9	Tratamento 9
UFV	Universidade Federal de Viçosa
WoS	<i>Web of Science</i>
ZM	Zonas mortas

LISTA DE SÍMBOLOS

D	Coeficiente de mortalidade
u	Componentes de velocidade
X_0	Concentração de massa afluente de algas
X	Concentração de massa de efluente de algas
$C_{\varepsilon 1}$	Constante de produção de ε
y	Distância da superfície de não deslizamento
ρ	Massa específica
σ_{ε}	Número de <i>Prandtl</i> turbulento para ε
σ_k	Número de <i>Prandtl</i> turbulento para k
% Z_m	Percentual de zonas mortas
%	Porcentagem
Pk	Produção de energia cinética turbulenta
$C_{\varepsilon 2}$	Taxa de controle de dissipação de energia turbulenta
β	Taxa de crescimento específica das algas
F	Vazão volumétrica
μ	Viscosidade dinâmica
Ω	Viscosidade molecular
ν_t	Viscosidade turbulenta
V_m	Volume da zona de estagnação
v	Volume do elemento
V	Volume total de fluido na LAT

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO.....	17
2	INTRODUÇÃO GERAL.....	18
3	HIPÓTESE.....	21
4	OBJETIVOS.....	22
4.1	Objetivo Geral.....	22
4.2	Objetivos Específicos.....	22
5	CAPÍTULO I. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM PROJETOS DE LAGOAS DE ALTA TAXA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	23
5.1	Introdução.....	23
5.2	Tendências Emergentes na Modelagem CFD para LATs: uma Análise Bibliométrica.....	25
5.2.1	Tendências anuais de publicações e países mais produtivos.....	26
5.2.2	Principais tópicos de pesquisa e rede de cluster de palavras-chave ..	28
5.2.3	Tendências de pesquisa.....	30
5.3	Aplicações CFD em fotobiorreatores para tratamento de águas residuárias.....	32
5.4	Parâmetros hidrodinâmicos e operacionais que influenciam a eficiência das LATs.....	33
5.4.1	Alterações de design nas LATs.....	35
5.4.2	Estratégias operacionais para otimização das LATs.....	39
5.4.3	Modelagem CFD combinada com modelos matemáticos para análise de LATs.....	41
5.5	Desafios existentes na aplicação de CFD em LATs.....	42
5.6	Perspectivas futuras.....	44
5.7	Conclusões.....	45
5.8	Referências.....	46

6	CAPÍTULO 2. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM PROJETOS DE LAGOAS DE ALTA TAXA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	51
6.1	Introdução	51
6.2	Materiais e Métodos	53
6.2.1	Configuração da LAT	53
6.2.2	Simulação do modelo.....	54
6.2.3	Condições de contorno	55
6.2.4	Avaliação da mistura - percentual de zonas mortas.....	57
6.2.5	Validação experimental	58
6.2.6	Alterações geométricas e operacionais na LAT investigada	59
6.2.6.1	Análise de sensibilidade	59
6.2.7	Procedimento de simulação computacional	60
6.3	Resultados e discussão	60
6.3.1	Validação do modelo CFD	60
6.3.2	Simulação de fluxo em lagoa unitária.....	61
6.3.3	Percentual de zonas mortas.....	63
6.3.3.1	Localização das zonas mortas	65
6.3.4	Variações na velocidade de fluido, profundidade do canal e impacto na zonas mortas.....	66
6.4	Conclusões	69
6.5	Referências	70
7	Conclusão geral	75
8	Sugestões para pesquisas futuras	76
	REFERÊNCIAS.....	77
	APÊNDICE A.....	80
	APÊNDICE B.....	83

1 APRESENTAÇÃO

A origem desta dissertação remonta aos projetos de pesquisa “Tecnologia Inovadora Aplicada ao Tratamento de Efluentes, Produção de Biomassa Algal e Valorização Energética” (FAPEMIG TEC APQ 02527-18 – Edital 001/2018) e “Bioprodutos a partir de biomassa de microalgas: viabilidade energética, econômica e ambiental” (Chamada CNPq Nº 09/2020 - PQ 2020), ambos coordenados pela professora Maria Lúcia Calijuri junto à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), respectivamente. Esses projetos contemplam a produção de biomassa de microalgas e tratamento de águas residuárias em Lagoas de Alta Taxa (LATs), reatores que vem sendo estudados desde 2009 pelo grupo Soluções em Informações Geoespaciais e Núcleo de Pesquisas Ambientais Avançadas (SIGEOOnPA), vinculado ao Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

As pesquisas realizadas pelo grupo têm englobado estratégias de operação para aumentar a produtividade da biomassa microalgal, averiguar a tratabilidade da água residuária, reduzir os impactos ambientais atrelados aos reatores e avaliar diversas rotas de aproveitamento dessa biomassa. Os resultados alcançados têm mostrado a necessidade de aperfeiçoamento dos parâmetros operacionais das LATs para se conseguir a melhoria do desempenho na produtividade de biomassa e atingir a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental.

Neste contexto, o principal objetivo desta proposta é avaliar a hidrodinâmica das LATs, utilizando a Dinâmica Computacional dos Fluidos (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), visando a redução de zonas mortas (ZM). Essa estratégia representa uma fronteira do conhecimento no campo do tratamento de águas residuárias em LATs e busca contribuir para a sua aplicação no contexto do saneamento ambiental, bem como em sistemas de biorrefinaria de microalgas e estações de tratamento sustentáveis.

2 INTRODUÇÃO GERAL

A biotecnologia de microalgas no tratamento de águas residuárias, visando a produção de biomassa de baixo custo, conta com uma série de tecnologias sustentáveis e econômicas (SU, 2021), alinhadas ao modelo de economia circular (PATEL; CHOI; SIM, 2020). O cultivo de microalgas em águas residuárias apresenta diversas vantagens, destacando-se o sequestro de dióxido de carbono atmosférico (CO₂), a recuperação de nutrientes como nitrogênio e fósforo, que são responsáveis pela eutrofização de corpos d'água (HONDA et al., 2012; LEONG et al., 2022), a capacidade de eliminar micropoluentes (LIU et al., 2021) e a produção de biomassa. Esta biomassa, por sua vez, pode ser convertida em produtos de valor agregado como biohidrogênio e biometano (BENEDETTI et al., 2018; CAPPELLETTI et al., 2020; ROSLI et al., 2020; ROSMAHADI et al., 2021). Entretanto, instalações em escala real ainda são incipientes e necessitam de evolução para a sua maior aplicabilidade prática e aptidão para os diversos tipos de águas residuárias (AHMAD et al., 2022). Os sistemas abertos, como as LATs, são frequentemente os mais empregados, devido à sua versatilidade, facilidade de operação e custos de operação e manutenção reduzidos (LI et al., 2019).

As LATs (Figura 2.1) foram idealizadas e trabalhadas por Oswald, Gotaas e colaboradores em meados da década de 1950 (SUTHERLAND et al., 2014), a partir da modificação de uma lagoa de estabilização visando promover o crescimento, desenvolvimento e reprodução de microrganismos, em uma relação simbiótica entre algas e bactérias (CRAGGS et al., 2014). Logo, as LATs constituem um sistema de tratamento de águas residuárias que, por meio da luz solar como fonte de energia, proporciona a remoção de nutrientes e matéria orgânica (LI et al., 2023).

Essas lagoas são projetadas no formato de canais abertos em forma de pista de corrida (*raceways*), onde a água residuária circula por meio de pás com velocidades entre 0,15 e 0,3 m/s e profundidade entre 0,2 e 0,7 m (SUTHERLAND; RALPH, 2020). Nessa configuração, a biomassa de microalgas desenvolve-se assimilando os nutrientes (majoritariamente nitrogênio e fósforo) presentes e fixando CO₂ da atmosfera (ASSEMANY et al., 2015; SANTIAGO, 2013). Por meio do processo fotossintético, as microalgas produzem o oxigênio

necessário às bactérias heterotróficas aeróbias para degradarem a matéria orgânica (PARK; CRAGGS, 2010). Logo, comparados aos sistemas convencionais de tratamento de águas residuárias como lodos ativados, os sistemas baseados em microalgas têm baixo requisito de energia, uma vez que não requerem aeração externa devido à fotossíntese (ACIÉN et al., 2016).

Figura 2.1 - Lagoas de alta taxa da área experimental do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) – UFV.



Apesar da eficácia dos sistemas baseados em microalgas ter sido comprovada em várias pesquisas em escala piloto, há poucos esforços dedicados à avaliação dos critérios de projeto das LATs. Essa análise é especialmente relevante ao considerar a inclusão das LATs como uma alternativa no tratamento de água residuária (SANTIAGO, 2013). Ademais, para esses sistemas se tornarem competitivos, o consumo de energia deve ser menor que $0,5 \text{ kWh.m}^{-3}$ e o sistema deve alcançar maior robustez em diferentes condições climáticas (ACIÉN et al., 2016).

Embora a literatura apresente informações sobre o dimensionamento de LATs, é fundamental agrupar as informações sobre o dimensionamento hidráulico (SANTIAGO, 2013) que, normalmente, se fundamenta em parâmetros como o tempo de detenção hidráulica e a taxa de aplicação superficial relacionada à carga orgânica. Contudo, as LATs são reatores onde ocorrem

processos biológicos, químicos e físicos complexos, influenciados por diversos fatores ambientais, como a temperatura e a disponibilidade de luz solar. Como resultado, o desempenho das LATs pode variar significativamente em relação às expectativas. A hidrodinâmica frequentemente não é considerada no dimensionamento tradicional das LATs, assumindo-se um fluxo ideal de mistura completa nos reatores (HADIYANTO et al., 2013). No entanto, o comportamento hidrodinâmico real não segue essas condições de fluxo ideal (HADIYANTO et al., 2013), impactando o desempenho, a eficiência do tratamento e o consumo de energia nos reatores. A modelagem hidrodinâmica consegue simular alternativas e adiantar a resolução de problemas, podendo tornar o projeto de LATs mais econômico e eficaz.

Com isso, a CFD tem sido gradualmente utilizada para projetos de otimização e operação de LATs (HUANG et al., 2015). Os estudos englobam avaliações detalhadas das condições hidrodinâmicas, como a análise dos campos de velocidade ao longo da lagoa e da rotação das pás (CHEN et al., 2016; PIRASACI et al., 2017), análise dos padrões de fluxo e desempenho de mistura das pistas para diminuir a utilização de energia (HADIYANTO et al., 2013), identificação e minimização da extensão de ZM, onde a biomassa pode assentar, reduzindo sua exposição à luz e dificultando a colheita adequada. Pesquisas recentes avaliaram as condições hidrodinâmicas em diferentes projetos de LATs por CFD (HADIYANTO et al., 2013; LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021; ORTIZ et al., 2022; SAWANT et al., 2019; SOMPECH; CHISTI; SRINOPHAKUN, 2012). Esses estudos analisaram estratégias para melhorar o comportamento hidrodinâmico, como o aumento da largura e implementação de rasgos nas extremidades das chicanas, além da instalação de defletores nas zonas de reversões (HADIYANTO et al., 2013; SAWANT et al., 2019).

Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é avaliar a hidrodinâmica de LATs utilizando CFD, a fim de otimizar esses reatores por meio da redução de ZM no tratamento de águas residuárias.

3 HIPÓTESE

O aumento da velocidade e profundidade de fluido favorecem o comportamento hidrodinâmico da LAT, proporcionando redução de ZM na LAT.

4 OBJETIVOS

4.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar a hidrodinâmica de LATs utilizando simulações CFD, com o intuito de otimizar o projeto geométrico desses reatores, visando a redução de ZM e, conseqüentemente, aprimorar sua eficiência.

4.2 Objetivos Específicos

- Elaboração de análise bibliométrica referente à hidrodinâmica em LATs por CFD, a partir de diferentes plataformas de publicação;
- Identificação das principais tecnologias testadas em LATs por CFD, desafios encontrados nos estudos e perspectivas para futuros trabalhos;
- Modelagem hidrodinâmica por CFD e cálculo de ZM da LAT a ser estudada;
- Proposição de otimização de projeto geométrico da LAT estudada pelo aumento da velocidade e profundidade do fluido.

5 CAPÍTULO I. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM PROJETOS DE LAGOAS DE ALTA TAXA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Resumo

As LATs têm ganhado destaque como sistemas sustentáveis para o tratamento de águas residuais e o cultivo de microalgas. A definição e a otimização dos parâmetros de projeto desses biorreatores são fundamentais para o avanço de tecnologias de cultivo de algas que sejam economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis. Este estudo apresenta uma análise bibliométrica abrangente da pesquisa global sobre a aplicação da CFD no projeto e otimização de LATs, abrangendo o período de 2010 a 2025. Uma revisão detalhada de 48 publicações selecionadas revela um campo de pesquisa emergente, caracterizado por uma produção científica limitada, porém impactante, com destaque para China, Estados Unidos e Espanha. A análise identifica as principais tendências de pesquisa, incluindo modelagem hidrodinâmica, otimização geométrica das lagoas e a influência dos mecanismos de mistura na produtividade da biomassa e na eficiência energética. Avanços tecnológicos como rodas de pás modificadas, sistemas de vibração induzida por vórtices, defletores e modelos integrados CFD-biocinéticos são destacados como estratégias para reduzir zonas mortas e aprimorar os ciclos claro/escuro. Apesar dos resultados promissores, permanecem desafios importantes relacionados à ampliação de escala, consumo de energia e padronização de metodologias. Este estudo ressalta o potencial da CFD como ferramenta de apoio na tomada de decisão para o avanço das LATs em aplicações em escala real e oferece perspectivas sobre direções futuras para pesquisa e inovação na área.

Palavras-chave: Análise Bibliométrica; Dinâmica dos Fluidos Computacional; Lagoas de Alta Taxa; Hidrodinâmica; Microalgas; Tratamento de Águas Residuárias.

5.1 Introdução

A crescente demanda por soluções sustentáveis para o tratamento de águas residuárias e produção de biomassa tem impulsionado o desenvolvimento

de tecnologias inovadoras na área de saneamento ambiental e bioenergia (SAWANT et al., 2019). Entre essas tecnologias, as LATs têm se destacado como uma solução promissora. As LATs combinam a simplicidade de operação das lagoas convencionais com a eficiência na remoção de nutrientes e produção de biomassa algal, o que as tornam atrativas para aplicação em grande escala.

Esses sistemas são projetados para maximizar a produtividade de microalgas e a eficiência do tratamento de águas residuárias, por meio de controle otimizado das condições operacionais, como mistura, e tempo de residência hidráulica. A configuração típica de uma LAT consiste em uma lagoa rasa equipada com um mecanismo de mistura, como uma pá rotativa, para manter as microalgas em suspensão e garantir uma distribuição uniforme de luz e nutrientes (SHAO et al., 2024). Contudo, apesar de suas vantagens, o comportamento hidrodinâmico e a transferência de massa dentro das LATs são fenômenos complexos, que afetam diretamente a eficiência do processo.

Nesse contexto, a CFD emerge como uma ferramenta essencial para a modelagem e simulação desses fenômenos (RANGANATHAN et al., 2017). A CFD permite a análise detalhada do fluxo de fluidos, distribuição de nutrientes, transporte de partículas e outras variáveis críticas dentro de LATs (ORTIZ et al., 2022). Com o auxílio da CFD, é possível prever o desempenho de diferentes designs de lagoas e estratégias operacionais antes da implementação prática, economizando tempo e recursos (SHAO et al., 2024).

Embora o uso da CFD em estudos de LATs seja promissor, a literatura científica sobre o tema ainda é limitada e dispersa. Algumas pesquisas concentram-se apenas na modelagem do fluxo hidrodinâmico com base em alterações geométricas do sistema (HADIYANTO et al., 2013; HREIZ et al., 2014; HUANG et al., 2015; LIFFMAN et al., 2013), enquanto outras integram variáveis que influenciam e indicam o desempenho geral do sistema, como a produtividade de biomassa, mistura e remoção de nutrientes, e penetração da luz solar ao longo da profundidade de fluido (ALI et al., 2018; FATNASSI; ERRAIS; PONCET, 2025; ORTIZ et al., 2022; SHAO et al., 2024). Além disso, a aplicação da CFD em LATs ainda é relativamente nova, o que resulta em uma crescente necessidade de consolidar o conhecimento existente e identificar lacunas na pesquisa.

Neste cenário, uma análise bibliométrica detalhada emerge como uma ferramenta valiosa para mapear o desenvolvimento da pesquisa sobre a aplicação da CFD em LATs. A análise bibliométrica não apenas quantifica o número de publicações e citações ao longo do tempo, mas também permite identificar os principais desafios para o avanço do tema proposto, assim como as tendências de pesquisa atuais, redes de colaboração entre autores, e as principais revistas e países que impulsionam o avanço desse campo. Além disso, a análise de palavras-chave oferece insights sobre tópicos emergentes e áreas com maior potencial para futuras investigações (FOX et al., 2023).

Este estudo apresenta uma análise abrangente das tendências de pesquisa relacionadas à aplicação da modelagem CFD em LATs. São investigadas diferentes estratégias para otimização do design e das condições operacionais desses sistemas, com foco na melhoria da eficiência do cultivo de microalgas. Além disso, são discutidos os principais desafios técnicos e operacionais que ainda limitam a viabilidade comercial da tecnologia. Ao oferecer uma visão crítica sobre tendências globais, inovações emergentes e lacunas existentes, a pesquisa busca contribuir para o desenvolvimento de LATs mais eficientes.

5.2 Tendências Emergentes na Modelagem CFD para LATs: uma Análise Bibliométrica

Os dados para este trabalho de pesquisa foram coletados na base de dados *Web of Science (WoS) Core Collection* em abril de 2025, conforme a seguinte estratégia de busca: *All Fields = ((high rate pond) OR (raceway pond) OR (microalgae)) AND ((Computational Fluid Dynamics) OR (CFD)); Timeframe = "All time"*. Apenas publicações de pesquisa em inglês foram selecionadas, uma vez que esse é o idioma predominante na maioria das pesquisas acadêmicas (LI et al., 2023b), resultando em 303 artigos científicos. Em seguida, o conjunto de dados foi processado no *Microsoft® Excel* para a remoção de documentos sem *Digital Object Identifier (DOI)*. Como resultado, 297 artigos foram selecionados.

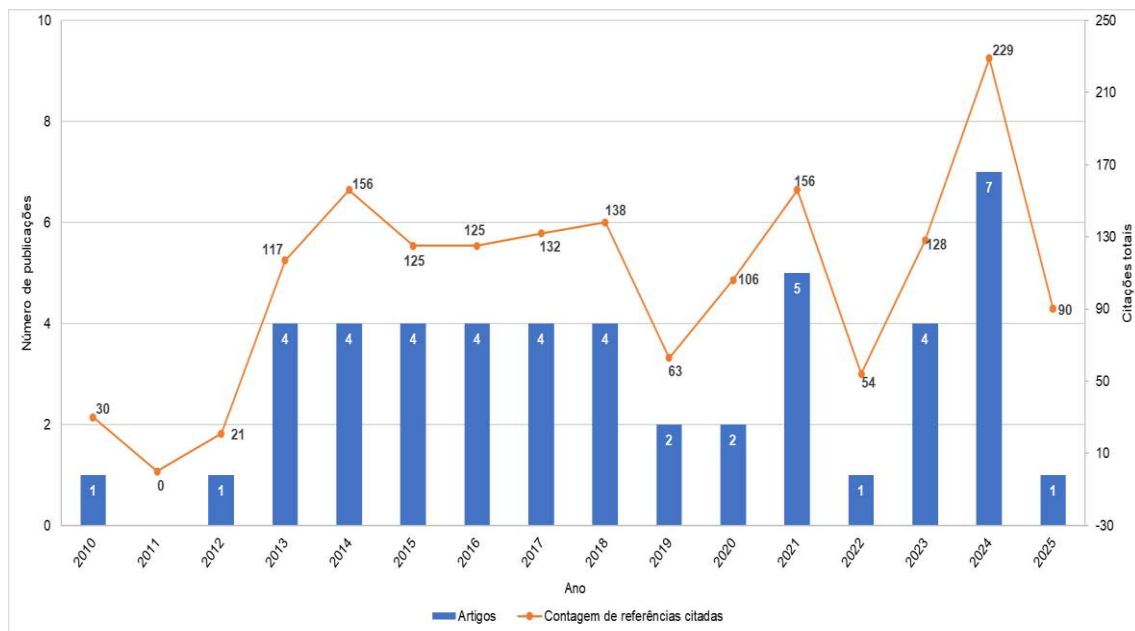
Os artigos foram lidos integralmente, sendo selecionados apenas aqueles que avaliaram, por meio de modelagem CFD, lagoas abertas em formato de pista, equipadas com roda de pás como mecanismo de movimentação.

Trabalhos que abordaram reatores diferentes dos descritos foram excluídos. Ao final, foram selecionados 48 artigos para análise e discussão, considerando indicadores bibliométricos, como volume de publicações, colaborações internacionais, impacto de citações e tendências de palavras-chave. A análise foi realizada utilizando o *bibliometrix R-Tool* (ARIA; CUCCURULLO, 2017) e o *software VOSviewer*, escolhido por sua qualidade superior na geração de representações gráficas.

5.2.1 Tendências anuais de publicações e países mais produtivos

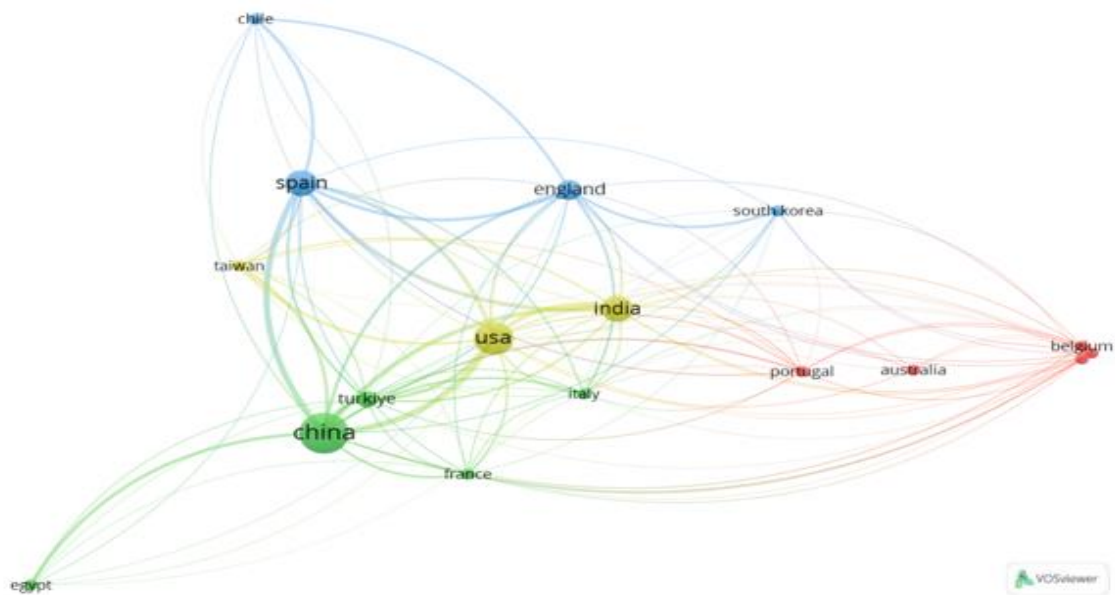
O número relativamente baixo de publicações (48) reflete a adoção gradual da modelagem CFD em sistemas de tratamento de águas residuárias em lagoas abertas do tipo *raceway* desde os anos 2000 (SAMSTAG et al., 2016). Na Figura 5.1 são apresentadas as publicações e citações relacionadas às aplicações de CFD em LATs no período de 2010 a 2025. Durante esse intervalo, a média anual de apenas três publicações resultou em cerca de 104 citações por ano, indicando que os estudos ainda estão em fase inicial de investigação. O ano mais produtivo foi 2024, com sete artigos publicados, enquanto 2011 não teve publicações. O período entre 2013 e 2018 não apresentou variação no número de publicações, mantendo uma média de quatro artigos por ano, contribuindo para os altos índices de citação nesses anos (média de 132 citações por ano). Desde 2019, o número de publicações tem oscilado entre um e sete artigos por ano, refletindo os esforços contínuos de pesquisa nessa área.

Figura 5.1 - Tendências anuais de publicações e citações sobre a aplicação de CFD em LATs (2010-2025).



Uma análise abrangente foi realizada para identificar os países mais produtivos e avaliar a colaboração internacional em pesquisas sobre modelagem CFD para LATs. A Figura 5.2 ilustra a rede global de colaboração, onde a espessura das linhas de conexão representa a intensidade da cooperação entre os países. De modo geral, a colaboração internacional nesse campo ainda é limitada, com interações mais expressivas, principalmente, entre China, Estados Unidos da América (EUA), Espanha e Índia.

Figura 5.2 - Mapa global de colaboração.



5.2.2 Principais tópicos de pesquisa e rede de cluster de palavras-chave

As palavras-chave representam uma síntese do conteúdo de pesquisa em uma área específica, e a análise de sua coocorrência fornece *insights* sobre o desenvolvimento e os temas mais relevantes do campo, aprimorando a compreensão do assunto em questão (GE et al., 2022). A Figura 5.3 apresenta o mapa de coocorrência de palavras-chave, no qual o tamanho dos nós representa a frequência das palavras-chave, enquanto a espessura das linhas indica a força das conexões mais significativas entre elas. As diferentes categorias (*clusters*) de palavras-chave são representadas por cores distintas (ERMAWAN; CORRIGAN; WIYONO, 2024).

aumentar a eficiência da produção de biomassa (FU et al., 2023a, 2023b; LIFFMAN et al., 2013; SAWANT et al., 2018, 2019; SHAO et al., 2024).

Paralelamente, o *cluster* roxo enfatiza a modelagem matemática nas simulações computacionais, com termos como “*computational fluid dynamics*”, “*modeling*”, “*performance*”, “*mass transfer*” e “*system*”. Este grupo parece estar fortemente ligado à avaliação de desempenho e à predição de comportamentos nos sistemas de cultivo.

Por fim, o *cluster* amarelo está relacionado aos métodos tradicionais de cultivo de microalgas, como a utilização de *raceways* e roda de pás (“*paddle wheel*”) como mecanismo de mistura, além de espécies algais como “*chlorella vulgaris*”. Termos como “*cultivation*”, “*light/dark cycle*” e “*cells*” indicam uma abordagem mais experimental e aplicada, muitas vezes utilizada como base para validação dos modelos computacionais descritos nos clusters anteriores.

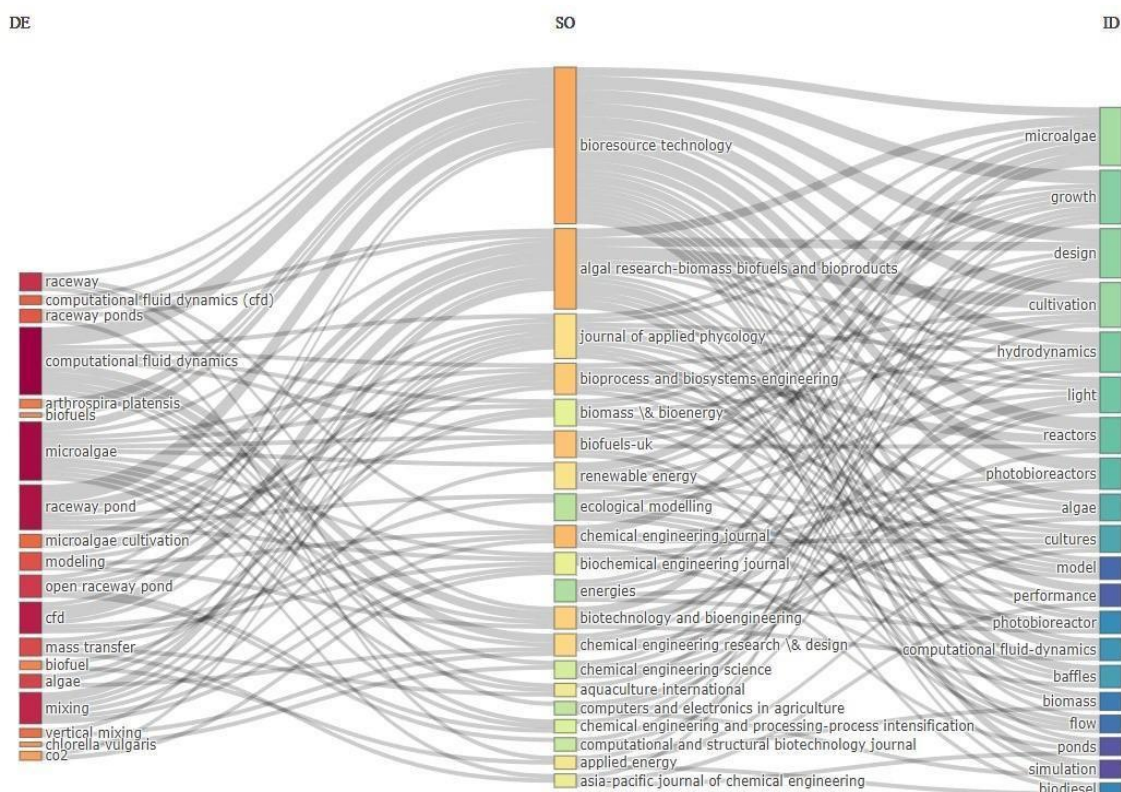
Apesar de cada *cluster* representar um núcleo temático distinto, observa-se uma forte interconexão entre eles, especialmente nos termos relacionados à mistura (“*mixing*”), que permeia tanto os aspectos biológicos quanto os hidrodinâmicos. Essa integração reflete a natureza multidisciplinar das pesquisas em microalgas, que combinam biotecnologia, engenharia, modelagem computacional e sustentabilidade energética.

5.2.3 Tendências de pesquisa

Este estudo utiliza o diagrama de *Sankey* (Figura 5.4), representação visual que ilustra as tendências de pesquisa (SANKEY, 1998), para mostrar o fluxo e a interconexão entre as palavras-chave dos autores DE (fornecidas pelos autores do trabalho), os periódicos de publicação SO e as palavras-chave utilizadas pelas revistas ID (extraídas dos títulos das referências citadas pela *Thomson Reuters*) (ZHANG et al., 2015). Nesse tipo de diagrama, a largura das conexões indica a força das relações, permitindo uma visualização clara da distribuição dos tópicos de pesquisa (XU et al., 2023). Palavras-chave como “*microalgae*”, “*mixing*”, “*cf*”, “*raceway pond*” e “*computational fluid dynamics*” representam os principais tópicos de pesquisas no contexto de CFD e microalgas e os periódicos “*Bioresource Technology*”, “*Algal Research Biomass Biofuel and*

Bioproducts” e *Journal of Applied Phycology*” foram as revistas com maior número de publicações dentro da base selecionada.

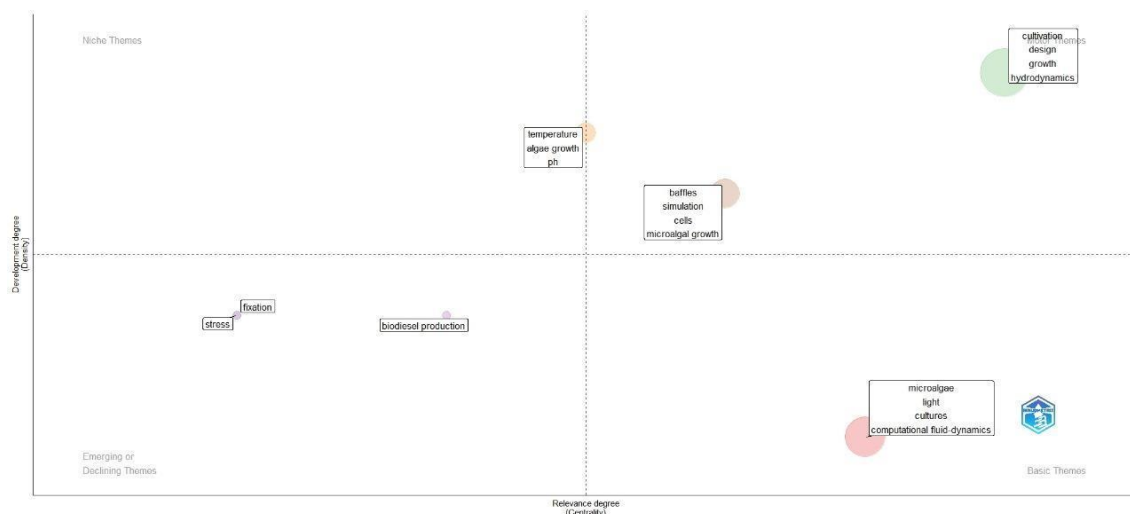
Figura 5.4 - Diagrama de Sankey.



A Figura 5.5 apresenta um diagrama estratégico que classifica os tópicos com base em sua centralidade e densidade de publicações, dividindo-os em quatro quadrantes: (i) tópicos bem estabelecidos e consolidados, (ii) tópicos emergentes e estratégicos, (iii) tópicos desenvolvidos, porém em declínio, e (iv) tópicos periféricos, com baixa relevância atual. Neste estudo, observou-se que as palavras-chave “*cultivation*”, “*design*”, “*growth*” e “*hydrodynamics*” representam as principais tendências de pesquisa em CFD aplicadas às LATs, enquanto termos como “*biodiesel production*”, “*fixation*” e “*stress*” aparecem com menor frequência. Esses resultados indicam que o uso dessa ferramenta computacional tem se concentrado, predominantemente, em aspectos relacionados ao projeto e à operação das LATs. Considerando a abordagem adotada neste trabalho, o número limitado de publicações provavelmente impactou a análise, influenciando o posicionamento de determinados temas nesse quadrante. Isso ocorre porque o mapa estratégico é gerado com base na frequência de ocorrência das palavras-chaves presentes nos artigos da base de

dados, além de considerar sua relevância dentro do contexto específico do estudo.

Figura 5.5 - Diagrama estratégico das palavras-chave dos autores.



Esse diagrama estratégico é uma ferramenta útil para identificar tendências emergentes e avaliar áreas de pesquisa dentro do contexto de CFD e microalgas com maior potencial de crescimento ou risco de se tornarem obsoletas, ajudando os pesquisadores a priorizar e alocar recursos de maneira mais eficaz.

5.3 Aplicações CFD em fotobiorreatores para tratamento de águas residuárias

O cultivo de microalgas em fotobiorreatores (FBRs) é um processo hidrodinâmico complexo de fluxo multifásico, envolvendo células de microalgas, transferência de gases (CO_2) e oxigênio (O_2), e o meio de cultura (AMINI et al., 2016; ZOU et al., 2024). Para melhor investigar esse processo, a modelagem CFD é uma poderosa ferramenta de baixo custo (AMINI et al., 2018), que pode ser utilizada tanto no design quanto na otimização de FBRs.

O advento da CFD na década de 1970 e seu desenvolvimento contínuo abriram caminho para o projeto e desenvolvimento de diversos FBRs como sistemas de tratamento de águas residuárias e produção de biomassa, permitindo que as características de fluxo dentro dos FBRs, essenciais para o seu design, sejam completamente analisadas e visualizadas (BITOG et al., 2011). As simulações por CFD permitem identificar e ZM, melhorar a distribuição de luz e nutrientes, analisar os campos de velocidade, os padrões de fluxo e a

performance de mistura, obter a trajetória das partículas de microalgas, e avaliar os efeitos de diferentes parâmetros de *design*, como a geometria do FBR e a configuração das curvas e rodas de pás (INOSTROZA et al., 2021; ORTIZ et al., 2022; RANGANATHAN et al., 2017; ZOU et al., 2024). Além disso, com o uso da modelagem CFD é possível modelar as variações espaço-temporais da hidrodinâmica, permitindo caracterizar/estimar parâmetros que são praticamente inacessíveis às medições experimentais, como as tensões de cisalhamento locais (HREIZ et al., 2014).

Diversos estudos têm sido realizados com diferentes tipos de FBRs, com foco especial na análise da hidrodinâmica de FBRs do tipo coluna de bolhas (AHMAD et al., 2024; ALMANI et al., 2025; LI et al., 2023a; OJANIEMI et al., 2025). Para esses tipos de reatores, a modelagem via CFD permite investigar os principais fatores que influenciam o comportamento hidrodinâmico do escoamento e afetam significativamente as correntes líquidas na coluna, tais como a velocidade superficial do gás, o volume de gás retido, o diâmetro das bolhas, a geometria da coluna, o uso de agentes antiespumantes e a pressão de operação (BITOG et al., 2011). Esses parâmetros são especialmente relevantes para a otimização do cultivo de microalgas em larga escala (KRISHNA; VAN BATEN; URSEANU, 2000; SEO et al., 2012).

As LATs são os FBRs mais amplamente utilizados para a cultura de microalgas, sendo aplicados extensivamente para esse fim (SAWANT et al., 2019). No entanto, inadequações estruturais dentro do sistema de lagoas de canal podem resultar em baixa concentração de células algais, uso subótimo das condições luminosas e altos custos de consumo de recursos, tornando essencial a otimização da mistura turbulenta, a minimização de ZM e o aumento da fixação CO₂ para promover o crescimento eficiente da biomassa de microalgas (SHAO et al., 2024).

5.4 Parâmetros hidrodinâmicos e operacionais que influenciam a eficiência das LATs

As LATs consistem em dois ou mais canais paralelos conectados por curvas fechadas, onde a circulação e mistura da cultura de microalgas é promovida por rodas de pás (HREIZ et al., 2014; LIFFMAN et al., 2013). No

entanto, a eficiência energética é comprometida tanto nas curvas quanto nas rodas de pás, onde a maioria da energia é consumida.

Além do consumo de energia, outros problemas comumente encontrados em lagoas abertas incluem a baixa eficiência fotossintética e a mistura insuficiente (FU et al., 2023b; SHAO et al., 2024). A produtividade de microalgas é altamente influenciada pela penetração da luz solar na coluna de água. Por esse motivo, as LATs são, geralmente, operadas com profundidades rasas, na faixa de 0,15 a 0,30 metros, de forma a maximizar a disponibilidade de energia solar para as células das microalgas, favorecendo a fotossíntese e, conseqüentemente, o acúmulo de biomassa (HREIZ et al., 2014; INOSTROZA et al., 2021; SAWANT et al., 2019). Todavia, COUTO et al., (2021) verificaram que a adição de CO₂ permite a adoção de profundidades maiores, em torno de 0,40 metros, quando se utiliza efluentes secundários como meio de cultivo.

A mistura do meio de cultura também interfere na produção de microalgas nas LATs, pois evita gradientes na concentração de nutrientes, temperatura e potencial hidrogeniônico (pH) dentro das lagoas. Além disso, previne a sedimentação das microalgas, aumenta as taxas de transferência de massa líquido-célula, e melhora a eficiência fotossintética das microalgas (HREIZ et al., 2014), por meio da exposição intermitente das células à radiação solar. Assim, a velocidade de mistura deve ser suficientemente alta, para que não haja acúmulo de células em áreas de baixo fluxo de fluido (HADIYANTO et al., 2013), denominadas ZM ou zonas estagnadas, diminuindo sua produtividade. Uma velocidade superior a 0,1 m/s é comumente necessária para garantir a homogeneidade da mistura e a penetração de luz solar (PANDEY; PREMALATHA, 2017; SAWANT et al., 2019). No entanto, altas velocidades e um elevado grau de mistura podem danificar as células algais nas LATs (SAWANT et al., 2019), devido às forças de cisalhamento hidrodinâmicas e mecânicas (HADIYANTO et al., 2013). Os valores de velocidade que podem danificar as células variam conforme a espécie e o estágio de crescimento das microalgas (LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021). HADIYANTO et al., (2013) sugerem um limite de velocidade de 0,6 m/s. Sendo assim, um dos maiores desafios do cultivo de microalgas em lagoas abertas é a mistura da cultura com velocidade

adequada, de modo que não haja sedimentação e nem destruição das células, com o mínimo consumo de energia.

A mistura também desempenha um papel considerável ao alternar as células de microalgas entre a zona clara próxima à superfície e as regiões escuras na parte inferior, resultando em ciclos de claro/escuro (L/D) induzidos pela própria mistura (ZENG et al., 2016), o que impacta diretamente a produtividade de microalgas. À medida que a concentração de microalgas aumenta, a profundidade de penetração da luz solar na lagoa diminui, reduzindo, conseqüentemente, a duração dos ciclos L/D (YANG et al., 2016). Portanto, compreender as características desses ciclos L/D é essencial para o desenvolvimento de sistemas eficientes de cultivo de microalgas (CHEN et al., 2016).

Diante do exposto, para otimizar o design e as condições operacionais das LATs, diferentes fatores devem ser considerados, sendo os mais relevantes a geometria do reator, a configuração das curvas e o design específico da roda de pá (INOSTROZA et al., 2021).

5.4.1 Alterações de design nas LATs

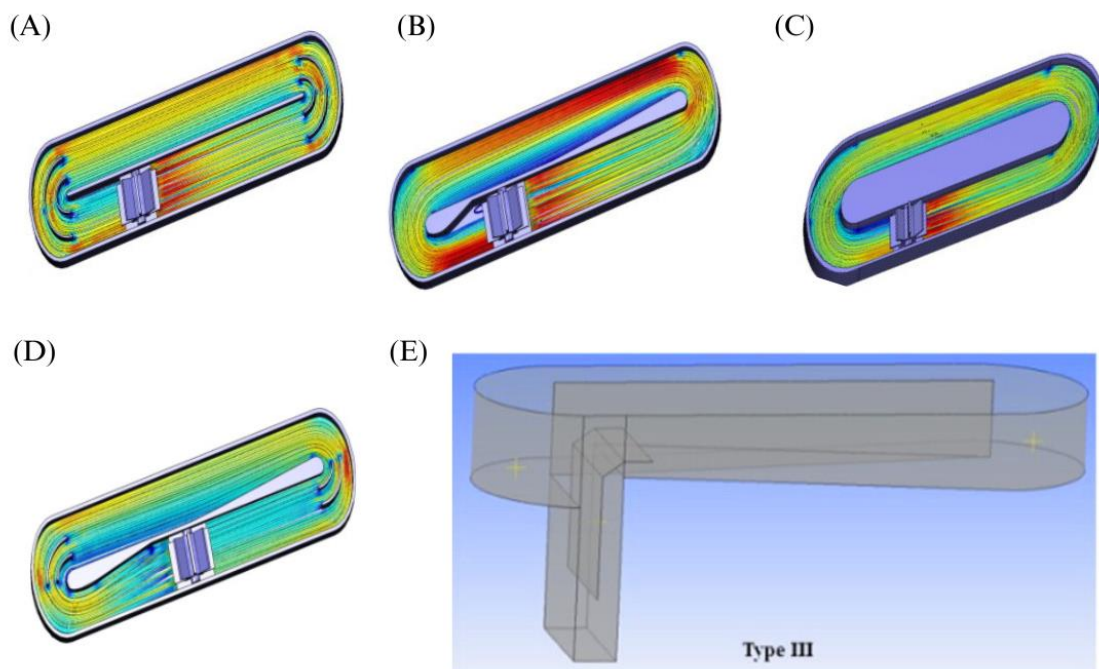
Baseado em simulações CFD, alguns pesquisadores desenvolveram novas abordagens para otimizar o design das LATs de forma a reduzir o consumo de energia e melhorar a produtividade de microalgas. HADIYANTO et al., (2013) demonstraram que, para manter uma distribuição uniforme de velocidade ao longo do comprimento da LAT e, conseqüentemente, reduzir tanto as ZM quanto o consumo de energia, a relação comprimento/largura deve ser, no mínimo, 10. Os autores também avaliaram possíveis modificações em LATs tradicionais e observaram que o aumento da largura da chicana central (Figura 5.6C), mantendo a largura dos canais, reduziu o consumo de energia em 40%. Além disso, essa modificação permitiu uma distribuição uniforme do fluxo ao longo da seção reta do canal, minimizando as ZM em mais de 80%. Outras alterações realizadas, embora eficazes na redução de ZM, resultaram em maior consumo de energia. Entre elas, destacam-se a instalação de defletores nas curvas (Figura 5.6A), que aumentou o consumo de energia em 20% e reduziu o percentual de ZM em, aproximadamente, 90%; a modificação da chicana para o

formato de gota em suas extremidades (Figura 5.6B), que gerou um acréscimo de 25% no consumo de energia, e diminuiu as ZM em, aproximadamente, 50%; e a combinação dessas alterações (Figura 5.6D), que elevou o consumo de energia em 20% e reduziu a quase zero as ZM. A instalação de defletores nas curvas favorece uma distribuição mais regular do fluxo ao entrar e sair da roda de pás (WEISSMAN; GOEBEL, 1987). Por sua vez, a adição de gotas nas extremidades da chicana tem como objetivo dissipar os grandes vórtices que normalmente se formam nesta região (HADIYANTO et al., 2013).

HUANG et al., (2016) desenvolveram uma lagoa inclinada (Figura 5.6E), com ângulo de inclinação do canal de 1.55° , movida a *airlifting* (ALSRWP). Em comparação com a LAT convencional, essa configuração reduziu as ZM de 4,5% para 3,1%, considerando uma velocidade de roda de pás de 20 rpm e uma taxa de aeração de 1,0 vvm. A eficiência energética do sistema ALSRWP ($0,29 \text{ gW}^{-1}\text{d}^{-1}$) foi 1,64 vezes maior que a LAT convencional ($0,11 \text{ gW}^{-1}\text{d}^{-1}$). Além disso, o novo sistema ALSRWP pode produzir mais biomassa com a mesma entrada de energia. A produtividade volumétrica de *Chlorella pyrenoidosa* aumentou 25,83% em comparação à LAT convencional.

LIFFMAN et al., (2013) analisaram diversas modificações no design das curvas da LAT tradicional, incluindo seis modelos com diferentes geometrias de curvas, um modelo incorporando três defletores em cada curva e outro com a adição de estruturas em forma de gotas nas extremidades da chicana. Os autores constataram que as modificações nas curvas da LAT tradicional foram eficazes na redução das perdas de energia. As novas configurações geométricas diminuiriam essas perdas em até 87% em comparação ao modelo convencional. De forma semelhante, a introdução de três defletores em cada curva resultou em uma redução de 82% na perda de carga, evidenciando o potencial dessas alterações para melhorar a eficiência hidráulica do sistema.

Figura 5.6 - (A) LAT com defletores de fluxo nas curvas; (B) Chicana com inserção do formato de gota nas extremidades; (C) Chicana com largura modificada; (D) LAT com defletores nas curvas e chicana com inserção do formato de gotas nas extremidades; (E) LAT com sistema *airlifting*.



Fonte: (A, B, C e D) HADIYANTO et al., (2013); (E) HUANG et al., (2016).

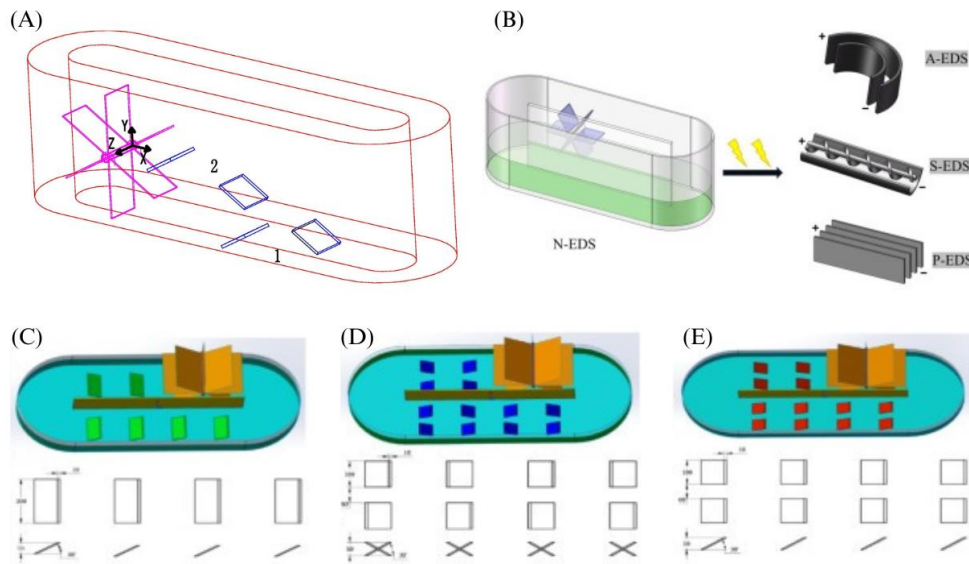
Algumas pesquisas dedicaram-se à exploração e simulação de alternativas para melhorar a eficiência energética das rodas de pás. Por exemplo, ZENG et al., (2016) observaram uma redução de 30% no consumo de energia e uma melhoria na eficiência de mistura ao utilizar uma roda de pás com inclinação de 15° e, conseqüentemente, um aumento de 11% na produção de *Chlorella pyrenoidosa* em comparação à roda de pá tradicional. PANDEY; PREMALATHA, (2017) analisaram três configurações para a posição da roda em uma LAT - uma única roda no centro, uma única roda na extremidade final e duas rodas posicionadas em cada extremidade - utilizando o conceito de índice de mistura vertical (IMV) para avaliar o comportamento da mistura vertical dentro da lagoa, e concluíram que a melhor configuração é a roda localizada na extremidade final, pois apresentou o maior IMV (39,6%). Embora o uso de duas rodas de pá tenha resultado em um IMV ainda maior (41,2%), o consumo de energia dobrou em relação à configuração com apenas uma roda.

Estratégias, como defletores de fluxo instalados nas curvas, *baffles* localizados no canal reto, modificações na parede central das LATs, entre outras, também estão sendo exploradas para aumentar a velocidade de fluxo, reduzir ZM, aumentar a frequência do ciclo L/D e, conseqüentemente, aprimorar a produtividade da biomassa de microalgas. Segundo HUANG et al., (2015), a combinação de defletores de fluxo e *baffles* inclinados apresenta um grande potencial para produção eficiente de microalgas com baixo consumo de energia, pois reduz a perda de carga em 10%, aumenta a velocidade em 6,8% e elimina significativamente as ZM, quando comparada à LAT tradicional com rodas de pá a 20 rpm. ZHANG et al., (2015) também mostraram que a combinação de defletores de fluxo e *wing baffles* é positiva em uma LAT tradicional, pois a perda de carga diminuiu em 15%, a velocidade média do fluido aumentou em 27% e as ZM reduziram-se em 60%.

Analisando uma LAT experimental modificada com *up-down chute baffles* (Figura 5.7A), YANG et al., (2016) observaram uma redução de 24% no período do ciclo L/D, um aumento de 75% na velocidade vertical do fluido e um incremento de 22% na biomassa de *Chlorella sp.*, em comparação à LAT tradicional. FU et al., (2023b) propuseram uma nova estrutura de *cross baffles* (Figuras 5.7C, 5.7D e 5.7E) para melhorar a mistura do fluido e acelerar o crescimento de microalgas em LATs, cuja simulação CFD mostrou uma redução de 18% no ciclo L/D e um conseqüente aumento de 36,6% na produção de *Chlorella*, em comparação à LAT sem *cross baffles*. SHAO et al., (2024) introduziram novas estruturas defletoras de eletrodos (EDEs) (Figura 5.7B), que integravam misturadores estáticos tradicionais com eletrodos. Essas estruturas atuaram simultaneamente na melhoria do fluxo do líquido e na estimulação das microalgas, reduzindo ZM. Seu formato, em arco ou espiral, promoveu a formação de turbulência e vórtices, evitando áreas de baixa circulação. Além disso, o campo elétrico gerado pelos eletrodos manteve as células em constante movimento e metabolicamente ativas, prevenindo sua acumulação em regiões estagnadas. Como resultado, houve um aumento na eficiência da mistura, na absorção de CO₂ e na produtividade de biomassa algal, contribuindo para otimizar o desempenho das lagoas. Assim, a aplicação dos EDEs em formato de arco e espiral reduziu as ZM em 9,1% e 11,7%, respectivamente, além de elevar

o acúmulo de células de *Arthrospira platensis* em 14,7% e 11,5%, quando comparado ao sistema tradicional de LAT.

Figura 5.7 - (A) Chute baffles; (B) Estruturas defletoras de eletrodos; e (C), (D) e (E) Cross baffles.



Fonte: (A) YANG et al., (2016); (B) SHAO et al., (2024); e (C), (D) e (E) FU et al., (2023b).

5.4.2 Estratégias operacionais para otimização das LATs

Simulações CFD vêm sendo empregadas para analisar o impacto da velocidade de rotação das rodas de pás, permitindo a otimização das condições hidrodinâmicas em LATs e a maximização da eficiência do processo.

AMINI et al., (2016) desenvolveram um modelo integrado de CFD e radiação espectral para simular a hidrodinâmica e a transferência de luz em LATs, prevendo com precisão a velocidade tridimensional e a intensidade luminosa em diferentes condições. As simulações mostraram que o aumento da velocidade da roda de pás (0,1 para 0,3 m/s) promoveu maior uniformidade na concentração celular, com valores aproximados de 0,4 g/L, especialmente em uma lagoa de 100 m². A velocidade da roda de pás também favoreceu uma distribuição luminosa mais homogênea na superfície do meio, embora a penetração da luz fosse limitada. A sedimentação celular teve menor impacto na penetração da luz, mas foi mais intensa no fundo da LAT de 0,2 m de profundidade, destacando a influência da profundidade na dispersão celular.

AMINI et al., (2018) desenvolveram um modelo integrado que combina cinética de crescimento, transferência de luz e CFD para prever a taxa de crescimento e produtividade de microalgas em LATs. As previsões mostraram boa concordância com valores experimentais para *Chlorella vulgaris*, confirmando que a produtividade de biomassa diminui com o aumento da densidade celular e do tempo de cultivo. Para 0,30 m de profundidade, a produtividade de biomassa caiu de 12,5 para 7,4 g/m²/dia ao longo de três semanas. O modelo também avaliou estratégias de colheita, indicando que a coleta parcial das algas pode mitigar essa queda. Na LAT de 0,2 m de profundidade, a remoção de 50% das algas, ao atingir 0,2 g/L, aumentou a produtividade para 10,5 g/m²/dia, um ganho de 43,8%. Esses resultados destacam a colheita contínua como estratégia para otimizar a produtividade e evitar as limitações causadas pelo aumento da densidade celular.

KUSMAYADI; PHILIPPIDIS; YEN, (2020), assim como HUANG et al., (2015), observaram que o aumento da velocidade de rotação da roda das pás reduziu as áreas de ZM, especialmente nas curvas da lagoa, embora isso tenha resultado em maior consumo de energia. Para mitigar esse efeito, KUSMAYADI; PHILIPPIDIS; YEN, (2020) combinaram a roda de pás com aspersores de CO₂ (30 mL/min) posicionados estrategicamente em áreas de baixa velocidade, promovendo um aumento na velocidade do fluxo e redução das ZM, o que resultou em uma produção de *Chlorella vulgaris* 2,6 vezes maior à produção obtida com a roda de pás sem aspersão.

Para otimizar a mistura e aumentar a produtividade de biomassa de algas sem elevar os custos energéticos, AKCA et al., (2023) investigaram o uso de sistemas de vibração induzida por vórtice em combinação com a rodas de pás. O dispositivo consiste em um cilindro instalado na seção reta do canal, que gira livremente, impulsionado pela força do próprio escoamento, dispensando, assim, a necessidade de uma fonte externa de energia para operar. Essa estratégia resultou em um aumento superior a 20% na produção de biomassa de *Chlorella vulgaris* em comparação com a lagoa tradicional, demonstrando o potencial da modificação para ampliar a produção algal sem aumentar os custos de instalação e operação.

5.4.3 Modelagem CFD combinada com modelos matemáticos para análise de LATs

Diversos modelos matemáticos têm sido desenvolvidos para descrever o crescimento de microalgas, enquanto a ferramenta CFD tem sido usada para simular o comportamento dos sistemas de cultivo em lagoas abertas. PARK; Li, (2015) desenvolveram um modelo integrando a cinética de crescimento de microalgas com a modelagem CFD do fluxo hidrodinâmico em uma LAT, onde o balanço de massa de algas pode ser expresso conforme a Equação 5.1:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{F}{v}(X_0 - X) + \beta X - DX \quad (\text{Equação 5.1})$$

em que:

F: vazão volumétrica ($m^3 d^{-1}$);

v: volume do elemento (m^3);

X_0 : concentração de massa afluyente de algas (gm^{-3});

X: concentração de massa de efluente de algas (gm^{-3});

β : taxa de crescimento específica das algas (d^{-1}); e

D: coeficiente de mortalidade (d^{-1}).

O modelo previu com precisão o acúmulo de biomassa, sua distribuição espacial e a atenuação da luz, que aumentou de 5% para aproximadamente 40% da área transversal em 50 dias, influenciada pela profundidade e pela concentração celular. Validado com dados experimentais em escala industrial, apresentou bom ajuste ($R^2 > 0,8$) para as variações nas concentrações de biomassa, CO₂ e nitrogênio. A produtividade simulada aumentou em 17,6% com o incremento da concentração de CO₂ de 0,0006 para 0,150 g/L, enquanto a velocidade da roda de pás teve impacto insignificante. Quando a biomassa atingiu 0,42 g/L (dia 35), as ZM presentes na curva da lagoa desapareceram.

RANGANATHAN et al., (2017) desenvolveram modelos matemáticos combinando a modelagem dinâmica do crescimento de microalgas e a modelagem CFD da hidrodinâmica de uma LAT. O modelo dinâmico incorporou equações de balanço de massa para a concentração de algas e CO₂, além de fatores relacionados à intensidade luminosa e transferência de massa. As previsões geradas pelo modelo em relação a concentração de microalgas

mostraram concordância com dados experimentais de cultivo de *Arthrospira platensis* em escala piloto. O modelo CFD, validado com dados da literatura, identificou ZM em diferentes regiões da lagoa. Também observou que o aumento da velocidade de rotação da roda de pás reduziu o tempo de circulação (20 s a 6 rpm), sendo menor que o tempo de mistura (30 s a 6 rpm), mas elevou o consumo de energia de 0,031 para 0,365 W na simulação CFD e de 0,023 para 0,375 W na equação teórica. Assim, as análises permitiram um detalhamento do desempenho da lagoa.

ALI et al., (2018) desenvolveram um modelo CFD baseado no esquema numérico Euler-Euler para otimizar a mistura de nutrientes em LATs, considerando um sistema bifásico com partículas sólidas (nutrientes) dispersas em água. As simulações, variando a profundidade da lagoa de 0,1 a 0,3 m, mostraram que o aumento da profundidade reduziu o coeficiente de transferência de massa sólido-líquido em até 3,1%, enquanto ZM próximas à parede central comprometeram a dissolução dos nutrientes. Os autores concluíram que lagoas mais profundas requerem maiores velocidades de rotação da roda de pás para melhorar a eficiência da dissolução. A validação com dados experimentais confirmou a precisão do modelo na previsão da dinâmica da mistura de nutrientes em LATs.

5.5 Desafios existentes na aplicação de CFD em LATs

A modelagem CFD aplicada em LATs para cultivo de microalgas e tratamento de águas residuárias enfrenta diversos desafios técnicos e operacionais. Esses desafios decorrem da complexidade das dinâmicas de fluxo, do acoplamento entre processos físicos e biológicos, das limitações na validação experimental e da demanda por recursos computacionais. A superação dessas dificuldades exige uma abordagem multidisciplinar e avanços metodológicos para garantir a precisão e a eficiência das simulações.

A complexidade das dinâmicas de fluxo presentes nesses sistemas é um dos principais desafios. Lagoas rasas, comuns no cultivo de microalgas, apresentam padrões de escoamento não uniformes devido à combinação de fatores como baixa profundidade, estratificação térmica, influência de ventos e radiação solar. Essas condições frequentemente resultam em ZM, curto-circuito

hidráulicos, distribuição irregular de nutrientes e baixa produtividade de biomassa algal, comprometendo a eficiência do sistema.

Além disso, o acoplamento entre os aspectos físicos do escoamento e os processos biológicos representam um desafio para a modelagem. O crescimento microbiano, por exemplo, é descrito por equações não-lineares, enquanto o processo de fotossíntese realizado pelas algas altera parâmetros como pH e oxigênio dissolvido. A formação de biofilmes, que modifica as características do escoamento ao longo do tempo, aumenta a complexidade dos modelos.

Outro obstáculo relevante é a dificuldade em validar os modelos CFD devido às limitações práticas na obtenção de dados experimentais. A instrumentação em escala real envolve custos elevados, variabilidade natural dos sistemas biológicos e escassez de técnicas para a medição em tempo real. Essas restrições dificultam a calibração e a validação adequada dos modelos, impactando na sua confiabilidade.

A demanda por recursos computacionais também constitui um desafio importante. Simulações realistas exigem alto poder de processamento, levando os pesquisadores a enfrentarem um “*trade-off*” entre o nível de detalhamento do modelo e a capacidade computacional disponível. As simplificações são frequentemente necessárias para viabilizar as simulações, o que, em contrapartida, pode comprometer a precisão dos resultados obtidos.

Cada tipo de sistema apresenta desafios específicos que precisam ser considerados na simulação CFD. No tratamento de águas residuárias, questões como a mistura de substratos e remoção de sólidos são cruciais para garantir um desempenho adequado. Já no cultivo de microalgas, a distribuição de luz e a captura de CO₂ representam aspectos fundamentais para a produtividade e eficiência do sistema. A otimização dessas aplicações requer considerações sobre geometria, posicionamento dos dispositivos de mistura e eficiência energética.

A modelagem CFD das LATs permanece um campo fértil para pesquisa, com potencial para melhorar significativamente a eficiência de processos biológicos em lagoas. Portanto, investimentos em inovação tecnológica e

colaboração entre áreas do conhecimento são essenciais para o progresso neste domínio.

5.6 Perspectivas futuras

O estudo das LATs para o cultivo de microalgas tem avançado significativamente, especialmente com a aplicação de CFD para otimizar parâmetros hidrodinâmicos, geométricos e operacionais. No entanto, alguns desafios persistem, abrindo caminho para pesquisas futuras voltadas ao aprimoramento da eficiência energética, produtividade de biomassa e sustentabilidade desses sistemas.

Uma das linhas mais promissoras para o avanço das LATs consiste no aprimoramento das modelagens CFD integradas. A combinação de simulações computacionais com modelos metabólicos e de crescimento de microalgas permite uma abordagem mais holística do sistema. Pesquisas futuras poderiam desenvolver modelos acoplados CFD-cinética microbiana que considerem variações sazonais de luz e temperatura, além das complexas interações entre diferentes espécies de microalgas. A incorporação de inteligência artificial, especialmente técnicas de aprendizado de máquinas, pode agregar à área, permitindo prever dinâmicas de fluxo e otimizar parâmetros operacionais em tempo real. Além disso, simulações que consideram condições extremas, como ventos fortes ou variações bruscas de temperatura, são essenciais para aprimorar a robustez dos projetos de LATs em diferentes cenários operacionais e regiões do planeta.

Em relação à inovação em dispositivos de mistura, os sistemas de baixo custo energético representam uma fronteira importante de pesquisa. O alto consumo de energia, especialmente associado às rodas de pás convencionais, ainda permanece como um dos principais gargalos tecnológicos. A integração de fontes renováveis de energia, particularmente sistemas fotovoltaicos acoplados às LATs, pode alimentar os mecanismos de mistura enquanto minimiza a pegada energética do sistema.

Investimentos em simulações avançadas, validação experimental e tecnologias sustentáveis podem transformar as lagoas em sistemas economicamente viáveis e ambientalmente estratégicos. A priorização de

pesquisas que equilibrem eficiência energética, produtividade e escalabilidade é fundamental para consolidar as microalgas como uma solução global para a bioeconomia e a sustentabilidade.

5.7 Conclusões

Este estudo oferece uma análise detalhada da aplicação de CFD na otimização de LATs, identificando as principais tendências de pesquisa, tecnologias testadas e desafios existentes. Países como China, Estados Unidos e Espanha destacam-se como líderes nesse campo, com o crescente número de citações refletindo o aumento do interesse acadêmico. No entanto, a implementação em larga escala das LATs ainda enfrenta obstáculos, como a complexidade hidrodinâmica e a necessidade de validação experimental robusta. O estudo destaca que a colaboração internacional pode acelerar avanços, mas aponta a importância de maior diversificação geográfica nas pesquisas, especialmente em regiões com carências em saneamento básico. A inclusão de pesquisadores de áreas vulneráveis poderia impulsionar soluções inovadoras e ampliar o impacto global desta tecnologia.

Além disso, o estudo reconhece limitações, como possíveis restrições na base de dados e viés na seleção de palavras-chave, fatores que podem influenciar os resultados da análise bibliométrica. A falta de padronização metodológica entre os artigos revisados também dificulta a comparação direta de resultados obtidos. Apesar desses desafios, a CFD continua sendo uma ferramenta importante para o desenvolvimento de LATs mais eficientes. Avanços em modelagem computacional, integração de energias renováveis e inteligência artificial despontam como estratégias promissoras para superar as limitações atuais. Investimentos contínuos em pesquisa e cooperação global são fundamentais para consolidar as LATs como uma solução sustentável para o tratamento de águas residuárias e a produção de biomassa algal.

Por fim, o estudo reforça que a eficiência das LATs depende não apenas da modelagem, mas também de aspectos relacionados ao projeto e à operação dos sistemas. A velocidade de circulação do fluido exerce papel fundamental, devendo ser suficientemente alta para evitar ZM e a sedimentação das células algais, mas controlada para não causar a lise dessas células. Da mesma forma,

a incorporação de defletores nas curvas, modificações geométricas nas chicanas e relação comprimento/largura são alterações importantes para otimizar a hidrodinâmica, reduzir zonas de estagnação e promover uma distribuição mais homogênea do fluxo. Essas estratégias elevam a eficiência da mistura e, conseqüentemente, a produção de biomassa. Assim, o sucesso das LATs depende de uma abordagem integrada, que considere simultaneamente o aperfeiçoamento do design físico e o controle das variáveis operacionais, visando à maximização do desempenho e à sustentabilidade do processo.

5.8 Referências

AHMAD, Imran et al. Computational fluid dynamics (CFD) simulation modeling for the cultivation of microalgal monoculture in axenic enclosed bubble column photobioreactor (BCPBR). *Algal Research*, v. 83, p. 103725, out. 2024.

AKCA, Mehmet Sadik et al. Application of Vortex Induced Vibration Systems to Improve Vertical Mixing and Create Light/Dark Cycles for Enhanced Algal Biomass Productivity in Raceway Ponds. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 2, p. 245, 18 jan. 2023.

ALI, Haider et al. Two-Phase Flow Modeling of Solid Dissolution in Liquid for Nutrient Mixing Improvement in Algal Raceway Ponds. *Energies*, v. 11, n. 4, p. 899, 11 abr. 2018.

ALMANI, Sikandar et al. CFD simulation of isolated bubbles rising in Newtonian or non-Newtonian fluids inside a thin-gap bubble column. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 214, p. 202–218, fev. 2025.

AMINI, Hossein et al. Numerical and experimental investigation of hydrodynamics and light transfer in open raceway ponds at various algal cell concentrations and medium depths. *Chemical Engineering Science*, v. 156, p. 11–23, dez. 2016.

AMINI, Hossein et al. An integrated growth kinetics and computational fluid dynamics model for the analysis of algal productivity in open raceway ponds. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 145, p. 363–372, fev. 2018.

ARIA, Massimo; CUCCURULLO, Corrado. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, nov. 2017.

BITOG, J. P. et al. Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 76, n. 2, p. 131–147, maio 2011.

CHEN, Zhijie et al. Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. *Bioresource Technology*, v. 219, p. 387–391, nov. 2016.

COUTO, Eduardo et al. Evaluation of high rate ponds operational and design strategies for algal biomass production and domestic wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, v. 791, p. 148362, out. 2021.

ERMAWAN, Rieva; CORRIGAN, Hubertus; WIYONO, Nanang. Current update and trend of 3D printing in spinal surgery: A bibliometric analysis and review of literature. *Journal of Orthopaedics*, v. 50, p. 22–28, abr. 2024.

FATNASSI, Hicham; ERRAIS, Reda; PONCET, Christine. Optimizing greenhouse design for enhanced microalgae production: A CFD Analysis of microclimate and water thermal dynamics in raceway ponds. *Ecological Modelling*, v. 499, p. 110946, jan. 2025.

FOX, Hayden M. et al. The top 100 most-cited publications on contrast-enhanced ultrasound: A bibliometric analysis. *WFUMB Ultrasound Open*, v. 1, n. 2, p. 100020, dez. 2023.

FU, Shuangcheng et al. Reinforcing effect of cross baffles on mass transfer process in raceway photobioreactors. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v. 18, n. 4, 16 jul. 2023a.

FU, Shuangcheng et al. Effects of cross baffles on the flow of the microalgae in raceway photobioreactors. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 192, p. 109515, out. 2023b.

GE, Huimin et al. A review of research on driving distraction based on bibliometrics and co-occurrence: Focus on driving distraction recognition methods. *Journal of Safety Research*, v. 82, p. 261–274, set. 2022.

HADIYANTO, H. et al. Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, v. 217, p. 231–239, fev. 2013.

HREIZ, Rainier et al. Experimental and numerical investigation of hydrodynamics in raceway reactors used for algaculture. *Chemical Engineering Journal*, v. 250, p. 230–239, ago. 2014.

HUANG, Jianke et al. Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CFD simulations and experiments. *Algal Research*, v. 10, p. 64–71, jul. 2015.

HUANG, Jianke et al. Design and optimization of a novel airlift-driven sloping raceway pond with numerical and practical experiments. *Algal Research*, v. 20, p. 164–171, dez. 2016.

INOSTROZA, Cristian et al. Improvement of real-scale raceway bioreactors for microalgae production using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Algal Research*, v. 54, p. 102207, 1 abr. 2021.

KRISHNA, R.; VAN BATEN, J. M.; URSEANU, M. I. Three-phase Eulerian simulations of bubble column reactors operating in the churn-turbulent regime: a scale up strategy. *Chemical Engineering Science*, v. 55, n. 16, p. 3275–3286, ago. 2000.

KUSMAYADI, Adi; PHILIPPIDIS, George P.; YEN, Hong-Wei. Application of computational fluid dynamics to raceways combining paddlewheel and CO₂ spargers to enhance microalgae growth. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 129, n. 1, p. 93–98, jan. 2020.

LI, Lifeng et al. Multiphysics simulations of concentric-tube internal loop airlift photobioreactors for microalgae cultivation. *Chemical Engineering Journal*, v. 457, p. 141342, fev. 2023a.

LI, Ming et al. Knowledge Mapping of High-Rate Algal Ponds Research. *Water*, v. 15, n. 10, p. 1916, 18 maio 2023b.

LIFFMAN, Kurt et al. Comparing the energy efficiency of different high rate algal raceway pond designs using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 91, n. 2, p. 221–226, fev. 2013.

LIMA, Adriano; MARINHO, Bárbara; MORAIS, Tiago. Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions. *Aquaculture International*, v. 29, n. 1, p. 19–35, 16 fev. 2021.

OJANIEMI, Ulla et al. CFD modeling of CO₂ fixation by microalgae cultivated in a lab scale photobioreactor. *Bioresource Technology*, v. 415, p. 131715, jan. 2025.

ORTIZ, Antonio et al. Advanced biokinetic and hydrodynamic modelling to support and optimize the design of full-scale high rate algal ponds. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, v. 20, p. 386–398, 2022.

PANDEY, Ramakant; PREMALATHA, M. Design and analysis of flow velocity distribution inside a raceway pond using computational fluid dynamics. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 40, n. 3, p. 439–450, 17 mar. 2017.

PARK, Stephen; LI, Yebo. Integration of biological kinetics and computational fluid dynamics to model the growth of *Nannochloropsis salina* in an open channel raceway. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 112, n. 5, p. 923–933, 13 maio 2015.

RANGANATHAN, Panneerselvam et al. Experimental and modelling of *Arthrospira platensis* cultivation in open raceway ponds. *Bioresource Technology*, v. 242, p. 197–205, out. 2017.

SAMSTAG, R. W. et al. CFD for wastewater treatment: an overview. *Water Science and Technology*, v. 74, n. 3, p. 549–563, 10 ago. 2016.

SANKEY, M. H. P. R. Introductory note on the thermal efficiency of steam-engines. in: *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. [S.l.: S.n.]. v. 13.

SAWANT, S. S. et al. Computational and experimental studies of high depth algal raceway pond photo-bioreactor. *Renewable Energy*, v. 118, p. 152–159, abr. 2018.

SAWANT, S. S. et al. Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, v. 133, p. 528–537, abr. 2019.

SEO, Il-hwan et al. Numerical investigation of a bubble-column photo-bioreactor design for microalgae cultivation. *Biosystems Engineering*, v. 113, n. 3, p. 229–241, nov. 2012.

SHAO, Cong et al. Enhancing microalgal biomass production in lab-scale raceway ponds through innovative computational fluid dynamics-based electrode deflectors. *Bioresource Technology*, v. 394, p. 130282, fev. 2024.

WEISSMAN, J. C.; GOEBEL, R. P. Design and analysis of microalgal open pond systems for the purpose of producing fuels: A subcontract report. Golden, CO: [S.n.].

XU, Zhe et al. NeatSankey: Sankey diagrams with improved readability based on node positioning and edge bundling. *Computers & Graphics*, v. 113, p. 10–20, jun. 2023.

YANG, Zongbo et al. Decrease in light/dark cycle of microalgal cells with computational fluid dynamics simulation to improve microalgal growth in a raceway pond. *Bioresource Technology*, v. 220, p. 352–359, nov. 2016.

ZENG, Fanxue et al. Investigation on novel raceway pond with inclined paddle wheels through simulation and microalgae culture experiments. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 39, n. 1, p. 169–180, 13 jan. 2016.

ZHANG, Qinghua et al. Installation of flow deflectors and wing baffles to reduce dead zone and enhance flashing light effect in an open raceway pond. *Bioresource Technology*, v. 198, p. 150–156, 1 dez. 2015.

ZOU, Xiangbo et al. Numerical simulation on vortex flow and CO₂ bubble aggregation behavior in a raceway pond with diaphragm aerators. *Biochemical Engineering Journal*, v. 204, p. 109243, abr. 2024.

6 CAPÍTULO 2. AVALIAÇÃO DA DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EM PROJETOS DE LAGOAS DE ALTA TAXA: DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Resumo

As LATs são amplamente utilizadas no cultivo de microalgas, porém apresentam limitações hidrodinâmicas associadas à formação de ZM. Este estudo aplicou simulações de CFD para otimizar a circulação e reduzir essas limitações. O trabalho teve como objetivo analisar e minimizar as ZM, definidas como regiões com velocidades inferiores a 0,1 m/s, que impactam negativamente a eficiência operacional do sistema. A calibração do modelo CFD foi realizada por meio de validação experimental, utilizando o método do flutuador, que apresentou elevada concordância com os dados simulados. Foram avaliadas diferentes combinações operacionais de profundidade (0,20; 0,35 e 0,50 m) e velocidade de escoamento (0,10; 0,25 e 0,40 m/s), a partir de um planejamento composto central. Os resultados demonstraram que a velocidade de escoamento é o principal fator na mitigação das ZM, com efeito estatisticamente significativo ($p < 0,001$), enquanto a profundidade não apresentou influência relevante no intervalo avaliado. Observou-se uma redução acentuada das ZM até velocidades em torno de 0,35–0,38 m/s, acima das quais não foram verificados ganhos hidrodinâmicos significativos. A condição operacional mais eficiente foi observada no tratamento com profundidade de 0,50 m e velocidade de 0,40 m/s, que resultou no menor percentual de ZM (9,02%). Conclui-se que a otimização hidrodinâmica de LATs deve priorizar o ajuste da velocidade de escoamento, sendo a profundidade um parâmetro de menor impacto sobre a circulação, embora relevante para aspectos operacionais e biológicos.

Palavras-chave: Dinâmica dos Fluidos Computacional; Lagoa de Alta Taxa; Zonas Mortas; Hidrodinâmica; Microalgas.

6.1 Introdução

Nas últimas décadas, as microalgas têm despertado grande interesse devido ao seu potencial como matéria-prima para biocombustíveis e à sua capacidade de produzir compostos valiosos, como pigmentos, alimentos,

suplementos nutricionais, produtos farmacêuticos e nutracêuticos (BABCOCK et al., 2016; KHAN et al., 2018; WANG; LAN, 2018). Dentre os sistemas de cultivo de microalgas mais comuns, a LAT é a tecnologia de produção mais utilizada, sendo que mais de 90% dos sistemas em todo o mundo são baseados nesses reatores (GHASEMI et al., 2012; LUNDQUIST; WOERTZ; BENEMANN, 2010; MENDOZA et al., 2013). Todavia, a capacidade de produção de biomassa é menor, devido à sua vulnerabilidade às condições ambientais e climáticas, alto risco de contaminação e mistura inadequada (AKCA et al., 2023).

O cultivo de microalgas em LATs é um processo hidrodinâmico complexo, caracterizado por um fluxo multifásico envolvendo células de algas, os gases CO_2 e O_2 , e o meio de cultura líquido. A eficiência desse processo depende da qualidade da mistura, essencial para assegurar o fornecimento adequado de CO_2 , a remoção eficiente do O_2 produzido, a distribuição homogênea dos nutrientes, a prevenção da sedimentação celular e a otimização da exposição à luz para todas as células algais (ALI et al., 2015; CHENG et al., 2015; DELAVARI AMREI et al., 2015). Para garantir uma mistura eficiente, o projeto de uma lagoa deve considerar, em particular, a ocorrência de ZM, regiões caracterizadas por velocidades inferiores a 0,1 m/s (WEISSMAN; GOEBEL; BENEMANN, 1988). Essas regiões ocorrem principalmente nas chicanas localizadas a jusante das curvas, onde há maior dissipação de energia e tempos de residência celular desiguais. Essa condição é desfavorável à produtividade de microalgas, sobretudo em lagoas operadas de forma contínua (HREIZ et al., 2014).

Assim, melhorar a mistura em LATs pode ser alcançada pelo aumento da turbulência do fluxo, seja por meio de maiores velocidades de fluido ou pela adição de curvas (defletores), embora essa abordagem implica em um maior consumo de energia (CHIARAMONTI et al., 2013). Apesar dos métodos citados alcançarem melhorias consideráveis na produtividade da biomassa, a profundidade, em trabalhos experimentais, variou de 0,06 a 0,1 m (CHEN et al., 2016; CHENG et al., 2015; HUANG et al., 2015; RANGANATHAN et al., 2017), o que resultou em grande demanda de área e em perdas de fluido por evaporação. KUMAR et al., (2015) concluíram que configurações com baixa profundidade são essenciais para evitar limitações na disponibilidade de luz. Nesse mesmo sentido, SUTHERLAND; TURNBULL; CRAGGS, (2014)

destacaram que a profundidade das LATs influencia diretamente a eficiência de captura da luz, a qualidade da mistura e o consumo de energia da roda de pás. COUTO et al., (2021) relataram que o impacto da profundidade no crescimento da biomassa algal em LATs durante o tratamento de águas residuárias varia conforme a disponibilidade de carbono, sendo que a adição de CO₂ amplia a faixa de profundidade operacional, permitindo alcançar até 0,4 m sem comprometer a eficiência do tratamento.

Nesse contexto de melhoria da hidrodinâmica em LATs, a CFD destaca-se como uma abordagem de alta eficiência e baixo custo (BITOG et al., 2011), apresentando-se como uma alternativa eficaz para superar os desafios, permitindo a simulação do desempenho hidrodinâmico de qualquer lagoa. Essa ferramenta é útil na otimização de projetos, abrangendo aspectos como a geometria do reator, o design dos defletores e as especificações da roda de pás.

Por fim, com base na revisão de literatura apresentada no Capítulo I, a melhoria da eficiência das LATs está diretamente relacionada à análise dos parâmetros de projeto e das condições operacionais que influenciam os padrões de mistura. Assim, o presente estudo objetivou o desenvolvimento de modelagens CFD para analisar o fluxo hidrodinâmico em LATs. Para isso, foram realizadas simulações de velocidade em uma LAT e a proposição de uma nova configuração de operação e geometria, considerando o aumento da profundidade do fluido (aspecto ainda pouco explorado na literatura) e o aumento da velocidade de fluxo na LAT. Os resultados foram expressos por meio do percentual de ZM.

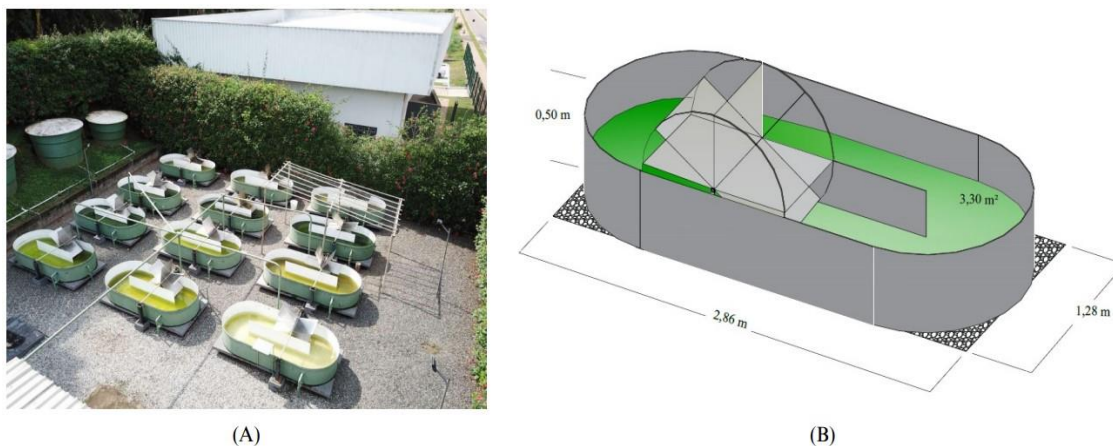
6.2 Materiais e Métodos

6.2.1 Configuração da LAT

Neste estudo, a LAT investigada é um reator em escala piloto operado ao ar livre e instalado na área experimental do Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, Brasil (20°45'14" S, 42°52'54" W) para o tratamento de águas residuárias, produção e separação de biomassa de algas (Figura 6.1A). A lagoa possui as seguintes características: material de fibra de vidro; 1,28 m de largura; 2,86 m de comprimento; 0,5 m de profundidade total; 3,3 m² de área superficial; e 0,3 m de profundidade de trabalho (Figura

6.1B). O fluido é circulado no sentido anti-horário por uma roda de pás de aço inoxidável, composta por 6 lâminas de 0,5 m de comprimento e largura. A velocidade angular é de 5,22 rpm, impulsionada por um motor elétrico de 0,5 HP e controlada por um redutor acoplado ao motor e por um inversor de frequência (série WEG CFW-10).

Figura 6.1 - (A) Vista aérea das LATs na área experimental; (B) Vista esquemática da lagoa a ser utilizada.



6.2.2 Simulação do modelo

O pacote *Ansys® Electronics Desktop Student 2025 R1* foi empregado para simular a hidrodinâmica na LAT. Para fins de simplificação, o modelo foi discretizado em um domínio computacional restrito à região correspondente pela própria LAT (Figura 6.2A). A roda de pás foi representada por regiões de entrada (*inlet*) e saída (*outlet*) de fluxo (velocidade) (Figura 6.2B), definidas em um volume retangular com 0,5 m de largura, 1,0 m de comprimento e profundidade equivalente à do canal. Assim, o modelo geométrico foi criado no ambiente *Ansys Design Modeler* e a malha foi gerada no *Ansys Design Mesh*, utilizando o método *Sweep*. A malha final, constituída por 804779 nós e 760536 elementos (Figura 6.3), foi projetada para garantir a uniformidade dos elementos da malha e a qualidade da discretização.

Figura 6.2 - (A) Modelo geométrico criado no *Ansys Design Modeler*; (B) Regiões de *inlet* e *outlet*.

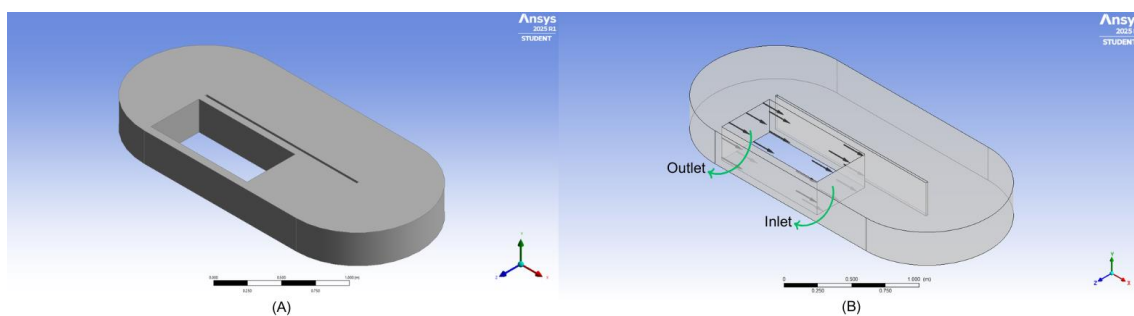
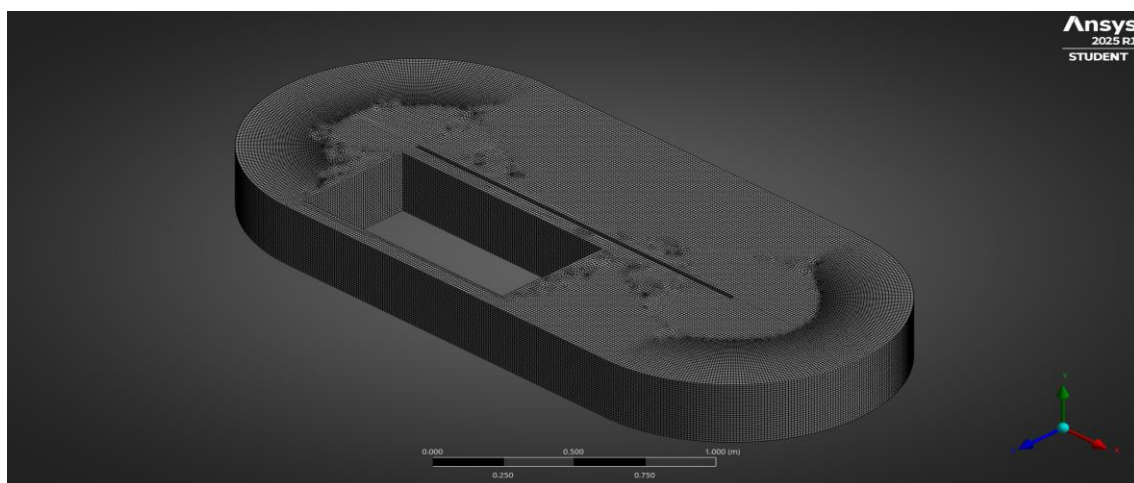


Figura 6.3 - Malha criada no *Ansys Design Mesh*.



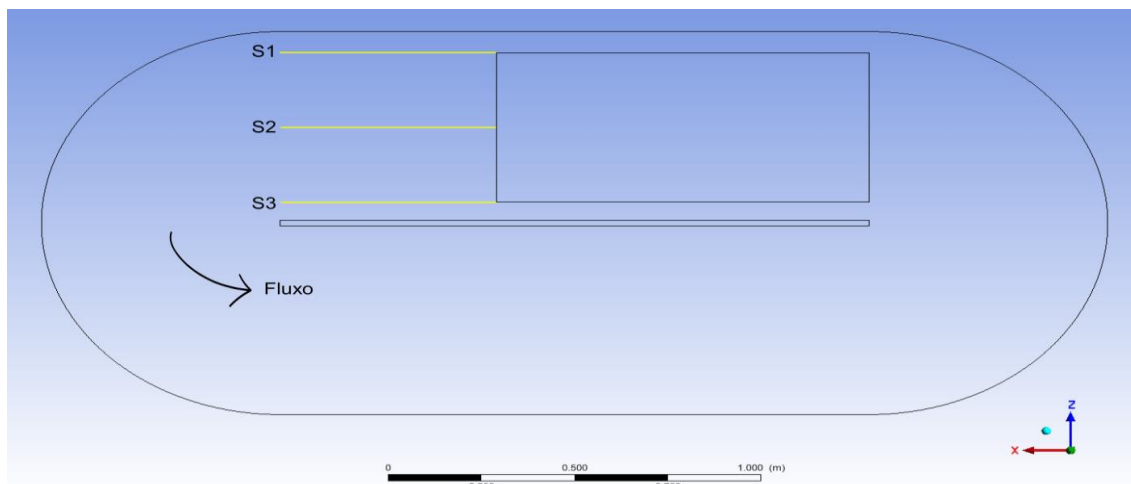
6.2.3 Condições de contorno

A LAT foi modelada como um domínio fluido contínuo, representado por água. A condição de parede automática (*automatic wall*) foi aplicada como padrão geral. Nas superfícies laterais e no fundo da lagoa, adotou-se a condição de parede não deslizante (*no slip wall*), que impõe velocidade nula do fluido em contato com essas superfícies. Já na superfície superior, aplicou-se a condição de parede deslizante (*free slip wall*), permitindo o escoamento tangencial sem resistência ao movimento.

As condições de contorno do tipo *inlet* e *outlet* foram utilizadas para representar, respectivamente, a entrada e saída do fluido no sistema. A velocidade de entrada foi estimada pelo método do flutuador (Santos et al., 2018), a partir da medição do tempo necessário para um flutuador percorrer uma distância de 0,58 m nas seções 1 (S1), 2 (S2) e 3 (S3), conforme a disposição apresentada na Figura 6.4. Durante os ensaios, manteve-se a profundidade

constante de 0,30 m do canal. A partir dados sumarizados na Tabela A1, Tabela A2 e Tabela A3 (APÊNDICE A), calculou-se a velocidade média nas três seções, adotando-se como velocidade de entrada o valor médio obtido, de 0,23 m/s.

Figura 6.4 - Seção 1, 2 e 3.



Devido ao escoamento induzido pelas condições de *inlet* e *outlet*, foi realizada uma simulação em regime permanente no software ANSYS CFX. Para representar adequadamente os efeitos da turbulência, adotou-se o modelo SST (*Shear Stress Transport*), que combina as vantagens dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$ (LAUNDER; SPALDING, 1974; YAKHOT et al., 1992). Esse modelo utiliza as equações do $\kappa - \varepsilon$ nas regiões afastadas das paredes, onde o escoamento é predominantemente livre, e as equações do $\kappa - \omega$ nas regiões próximas às paredes, onde há maiores gradientes de velocidade.

O modelo SST baseia-se em duas equações de transporte: uma para a energia cinética turbulenta (κ) (Equação 6.1) e outra para a taxa de dissipação específica da energia cinética turbulenta (ω) (Equação 6.2).

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + \frac{\partial (\kappa u_i)}{\partial x_i} = \frac{P_\kappa}{\rho} - \beta * \omega \kappa + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\Omega + \sigma_\kappa v_t) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] \quad (\text{Equação 6.1})$$

em que:

u_i : componentes de velocidade;

ρ : massa específica;

Ω : viscosidade molecular;

$v_t = \rho \frac{\alpha_1 \kappa}{\max(\alpha_1 \omega, \sqrt{S_{ij} S_{ij} F_2})}$; viscosidade turbulenta;

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^*\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega} \right) \right]^2 \right\};$$

$$P_\kappa = v_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial(\omega u_i)}{\partial x_i} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right]$$

$$+ 2(-F_1)\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (\text{Equação 6.2})$$

em que:

y : distância da superfície de não deslizamento;

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^*\omega y}, \frac{500v}{y^2\omega} \right), \frac{4\rho\sigma_{\omega 2}\kappa}{CD_{\kappa\omega}y^2} \right] \right\}^4 \right\};$$

$$CD_{\kappa\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right);$$

$\sqrt{S_{ij}S_{ij}}$: medida invariante do tensor de deformação.

As demais constantes utilizadas nas equações do modelo SST estão apresentadas na Tabela 6.1. Esses valores são derivados dos modelos $\kappa - \varepsilon$ e $\kappa - \omega$, com ajustes específicos que visam melhorar a precisão do modelo nas regiões próximas às paredes e nas zonas de transição do escoamento (MENTER, 1993). O critério de convergência para a simulação foi 1×10^{-4} para todos os resíduos (SAWANT et al., 2018).

Tabela 6.1 - Constantes das equações do modelo de turbulência *Shear Stress Transport*.

β	α_1	β_1	$\sigma_{\kappa 1}$	$\sigma_{\omega 1}$	α_2	β_2	$\sigma_{\kappa 2}$	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	5/9	3/40	0.85	0.5	0.44	0.0828	1	0.856

6.2.4 Avaliação da mistura - percentual de zonas mortas

O critério de velocidades iguais ou inferiores a 0,1 m/s (SAWANT et al., 2019) foi adotado como referência para a caracterização das ZM. Dessa forma, o percentual de zonas mortas ($\% Z_m$) para a condição avaliada foi determinado com base no modelo proposto por ALI et al., (2015), utilizando a Equação 6.3 como referência:

$$\% Z_m = 1 - \left(\frac{V - V_m}{V} \right) \quad (\text{Equação 6.3})$$

em que:

$\% Z_m$: percentual de zonas mortas;

V_m : volume da zona de estagnação (m^3);

V : volume total de fluido na LAT (m^3).

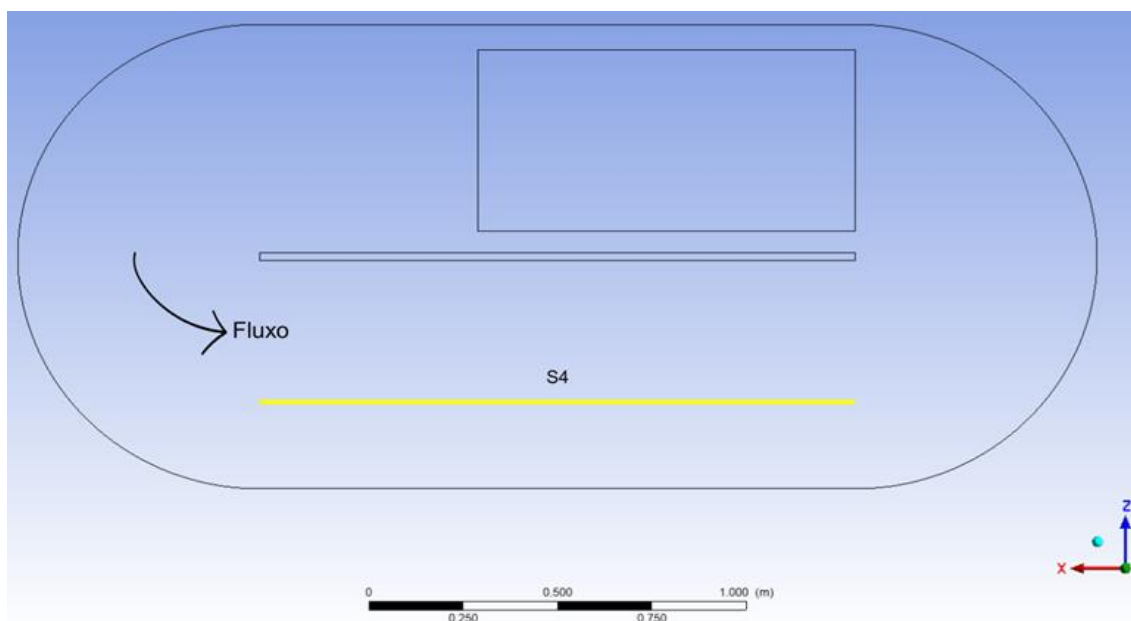
A existência de ZM gera um fluxo instável na lagoa, o que, por sua vez, pode levar à sedimentação de microalgas devido à formação de grandes redemoinhos, acarretando em menor produtividade nessas áreas (HADIYANTO et al., 2013). Na prática, o design ideal busca minimizar o volume dessas ZM, realçando a importância desse parâmetro tanto na avaliação das condições hidrodinâmicas atuais quanto na proposição de estratégias para mitigar a irregularidade do escoamento no canal (HADIYANTO et al., 2013).

6.2.5 Validação experimental

Com o objetivo de verificar a correspondência entre o modelo de simulação e o comportamento real do escoamento de fluido na lagoa, foi realizada uma etapa de validação experimental, na qual a lagoa foi operada utilizando água como fluido.

O método do flutuador (SANTOS et al., 2018) foi novamente empregado para medir a velocidade superficial da água, mantendo-se a profundidade constante de 0,30 m. A medição foi realizada utilizando um objeto flutuante na seção reta do canal, posicionada ao lado oposto à roda de pás (S4), conforme ilustrado na Figura 6.5. Essa região foi selecionada para evitar interferências da roda no deslocamento do flutuador, além de considerar o trajeto preferencial identificado durante os ensaios experimentais. A partir das 30 repetições disponibilizadas na Tabela B1 (APÊNDICE B), foi calculada a velocidade média experimental para S4. No modelo CFD, a velocidade média correspondente foi obtida utilizando a função “=lengthAve(Velocity)@LineS4” no software ANSYS CFX.

Figura 6.5 – Seção 4 determinada para a validação do modelo CFD.



Para verificar se a velocidade média prevista pelo modelo CFD é estatisticamente compatível com os valores obtidos experimentalmente, aplicou-se o teste t de *Student* unilateral para uma média conhecida.

6.2.6 Alterações geométricas e operacionais na LAT investigada

Em termos de avanço científico, esta pesquisa simulou a hidrodinâmica da lagoa com uma profundidade de fluido de 0,5 m (condição ainda não reportada na literatura), além de diferentes velocidades de escoamento. Considerando o objetivo de reduzir as ZM, adotaram-se velocidades de entrada (*inlet*) mínima e máxima de 0,10 m/s e 0,40 m/s, respectivamente - esta última correspondente a uma rotação de 7,64 rpm da roda de pás na LAT investigada. Esses valores garantem a mistura adequada do meio de cultura, promovendo turbulência sem causar efeitos adversos às microalgas (HREIZ et al., 2014).

6.2.6.1 Análise de sensibilidade

Para verificar a influência das variáveis profundidade e velocidade sobre o percentual de ZM, realizou-se um delineamento experimental no *software Minitab® 17*, utilizando o método de superfície de resposta com planejamento composto central ($\alpha = 1$). Consideraram-se dois fatores, cada um com três níveis (Tabela 6.2), totalizando nove tratamentos (Tabela 6.3). Além disso, realizou-se

uma análise de variância (ANOVA) para verificar a correlação entre os fatores analisados.

Tabela 6.2 - Delineamento experimental.

Fator	Nível		
	-1	0	+1
Profundidade (m)	0,20	0,35	0,50
Velocidade (m/s)	0,10	0,25	0,40

Tabela 6.3 - Condições operacionais das reações realizadas.

Tratamentos	Condição experimental	
	Profundidade (m)	Velocidade (m/s)
T1	0,20	0,10
T2	0,20	0,25
T3	0,20	0,40
T4	0,35	0,10
T5	0,35	0,25
T6	0,35	0,40
T7	0,50	0,10
T8	0,50	0,25
T9	0,50	0,40

6.2.7 Procedimento de simulação computacional

Todas as simulações hidrodinâmicas e análise estatística foram realizadas em uma estação de trabalho equipada com um processador Intel® Core™ i7-8700 CPU @ 3.19 GHz, com 6 núcleos, 32 GB de RAM e sistema operacional Windows 10 Pro.

6.3 Resultados e discussão

6.3.1 Validação do modelo CFD

A hipótese nula (H_0) considera que a média experimental é igual à média prevista pelo modelo CFD, enquanto a hipótese alternativa (H_1) assume que essas médias são diferentes. Com base na média experimental de 0,2358 m/s, desvio padrão de 0,0446 m/s e valor previsto de 0,2350 m/s para S4, a aplicação do teste t de *Student* unilateral resultou em um p-valor de 0,9240, superior ao nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Dessa forma, não se rejeita a hipótese nula, indicando que não há diferença estatística significativa entre as médias, e

que a previsão do modelo CFD é compatível com os dados experimentais (Tabela 6.4).

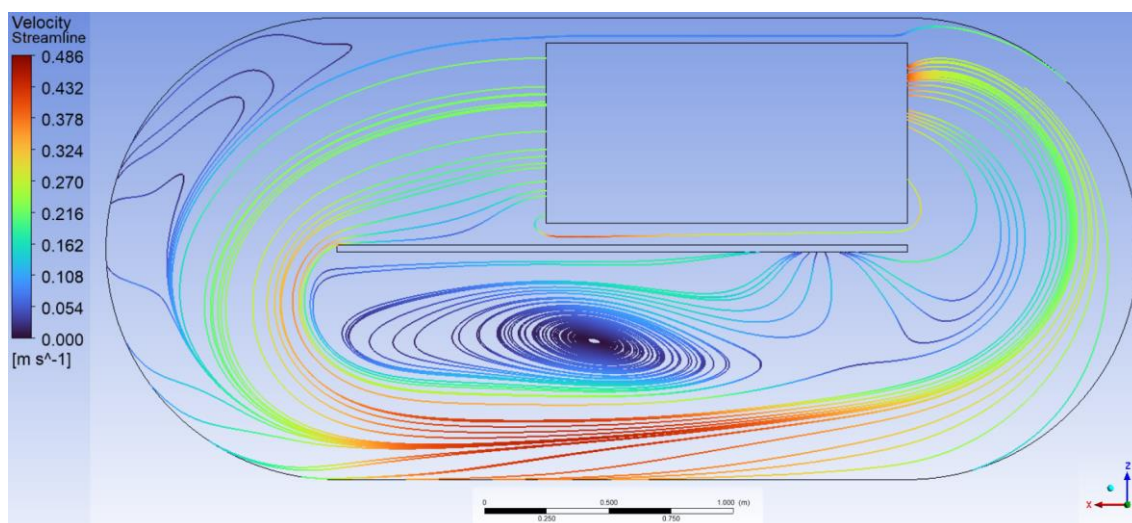
Tabela 6.4 - Velocidade do fluxo na seção quatro da lagoa de alta taxa usando dinâmica de fluidos computacional e método do flutuador.

Parâmetro	Método do flutuador (experimental)	CFD
Velocidade média (m/s)	0,2358	0,2350

6.3.2 Simulação de fluxo em lagoa unitária

A análise das características do escoamento foi realizada tomando como referência a LAT investigada. Sob condições operacionais fixas de velocidade (0,23 m/s) e profundidade (0,30 m), observou-se que o padrão de circulação do fluido favoreceu a formação de grandes vórtices logo após as curvas (Figura 6.6), os quais se estenderam até o canal oposto, contribuindo para a geração de ZM. Também foi identificada uma distribuição não uniforme das velocidades ao longo do canal, com menores velocidades nas proximidades da chicana e maiores valores junto às paredes laterais. Esses comportamentos são característicos de sistemas do tipo LAT e já foram reportados na literatura por HADIYANTO et al., (2013), HUANG et al., (2015), KUSMAYADI; PHILIPPIDIS; YEN, (2020), ORTIZ et al., (2022) e MORAIS CAMPOS et al., (2025).

Figura 6.6 - Linhas de corrente no plano XZ, a 0,30 m do fundo, coloridas de acordo com a magnitude da velocidade (m/s) na lagoa de alta taxa investigada.

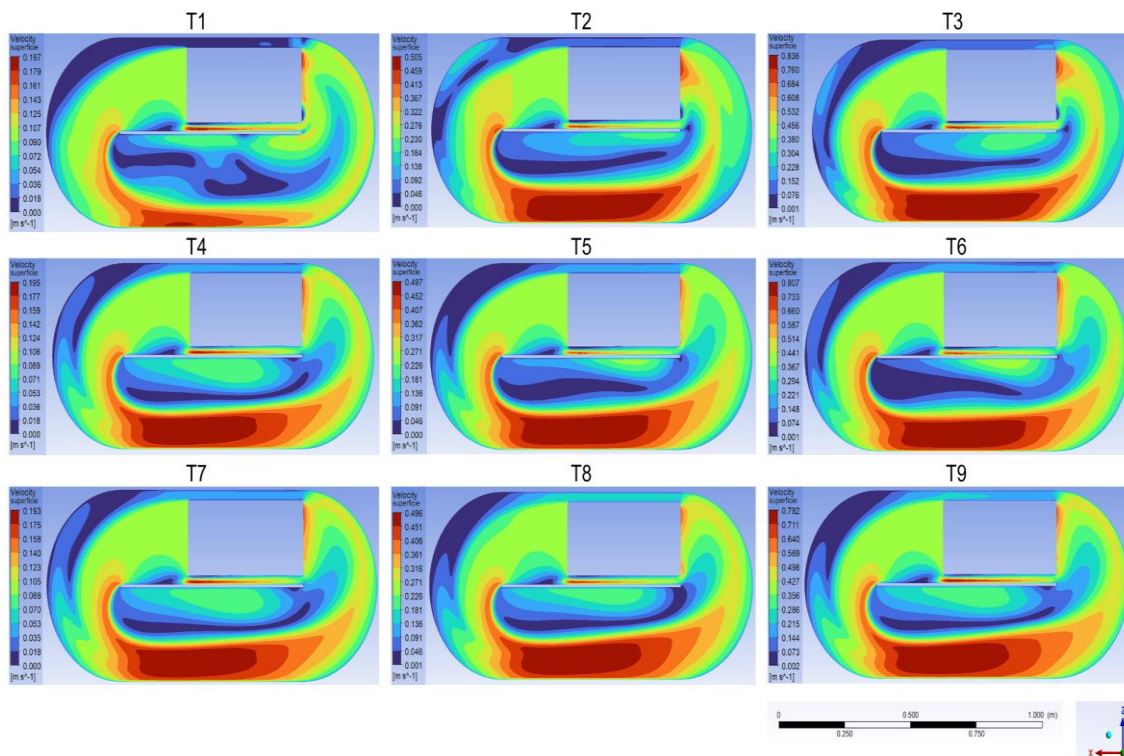


Essas limitações se tornam mais evidentes em lagoas que apresentam baixa razão comprimento/largura ($C/L < 10$), conforme apontado por HADIYANTO et al., (2013) e ORAGUI et al., (1987), o que compromete diretamente a eficiência operacional da lagoa.

Verificou-se, também, um aumento das velocidades de escoamento após as seções curvas, seguido por uma redução na segunda metade do canal, localizado no lado oposto ao sistema de agitação. Esse comportamento, coerente com os resultados observados por HUANG et al., (2015), pode ser explicado pela lei da conservação de massa. Como o fluido que percorre a parte externa da curva segue um trajeto mais longo em relação ao que flui pela parte interna, para que a vazão se mantenha constante, as velocidades nas regiões de maior raio de curvatura tendem a ser mais elevadas (MORAIS CAMPOS et al., 2025).

A Figura 6.7 evidencia como diferentes combinações de profundidade e velocidade influenciam diretamente o escoamento na LAT. Observa-se que a maior velocidade de entrada (0,40 m/s, nos tratamentos T2, T4 e T8) promovem melhor circulação e redução das ZM, embora estas ainda persistam em áreas próximas à chicana e nas curvas. Por outro lado, a menor velocidade de entrada (0,10 m/s, como em T1, T3 e T7) intensificaram as regiões de baixa velocidade, especialmente nos tratamentos com maiores profundidades (0,35 m em T7 e 0,50 m em T3). Condições intermediárias (0,25 m/s, em T5, T6 e T9) resultaram em melhorias no padrão de escoamento, com desempenho mais favorável quando associadas a profundidades maiores (0,35 m e 0,50 m). Adicionalmente, observa-se que, independentemente da profundidade, o padrão de escoamento manteve a tendência descrita na Figura 6.6. Esses resultados reforçam que a interação entre profundidade e velocidade é um fator decisivo para a eficiência hidrodinâmica da lagoa.

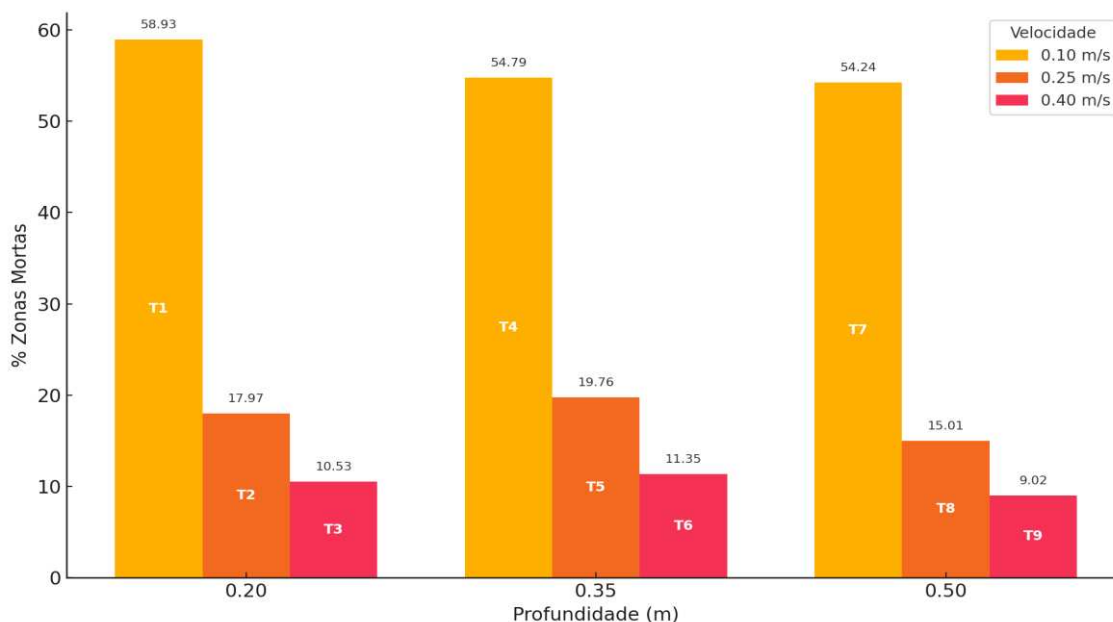
Figura 6.7 - Simulação do campo de velocidade na lagoa de alta taxa: T1 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T2 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T3 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T4 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T5 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T6 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T7 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T8 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; e T9 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* 0,40 m/s.



6.3.3 Percentual de zonas mortas

A Figura 6.8 apresenta os percentuais de ZM obtidos para cada combinação de velocidade e profundidade. Os menores valores foram registrados nos tratamentos T2 (10,53%), T4 (9,02%) e T8 (11,35%), enquanto os maiores ocorreram nos tratamentos T1 (58,93%), T3 (54,24%) e T7 (54,79%). Assim, destaca-se T4 (0,40 m/s e 0,50 m) como condição testada mais eficiente para minimizar a formação de ZM no sistema avaliado.

Figura 6.8 - Efeito da profundidade e velocidade de escoamento nas zonas mortas.



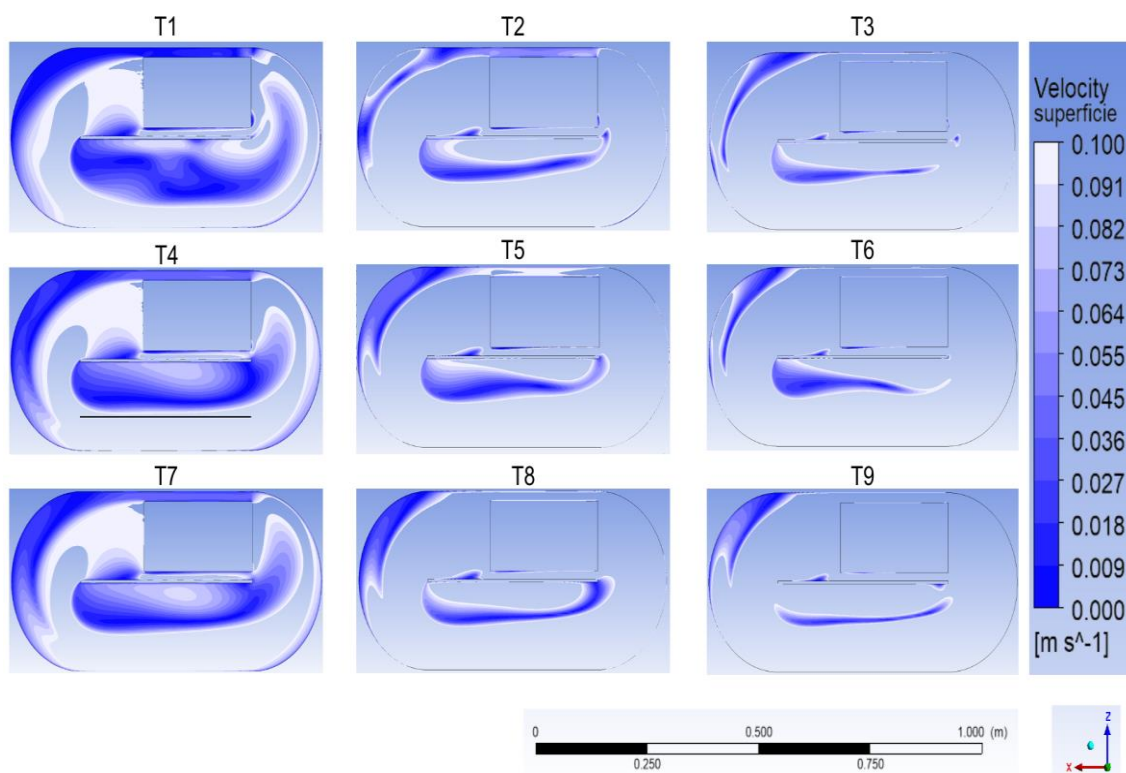
Na literatura, diferentes estratégias foram adotadas para reduzir ZM em sistemas de cultivo de microalgas. SOMPECH; CHISTI; SRINOPHAKUN, (2012) reportaram percentuais entre 0,2% e 6,7% ao modificarem a geometria das lagoas, utilizando três defletores nas curvas e extremidades em formato de gota nas chicanas. De forma semelhante, HUANG et al., (2015) observaram percentuais entre 0,3% e 8% ao empregar dois defletores nas curvas do canal, além de constatarem que o simples aumento da velocidade do fluido (de 0,25 m/s para 0,40 m/s, aproximadamente) foi capaz de reduzir as ZM de aproximadamente 8% para 5%. Em estudo posterior, HUANG et al., (2016) demonstraram que a injeção de CO₂, por meio de *sumps* posicionados após a roda de pás, resultou em uma redução mais expressiva, diminuindo as ZM de 8% para cerca de 3%.

Dessa forma, os valores observados no presente estudo, embora superiores aos relatados na literatura, são coerentes, uma vez que foram realizados apenas ajustes operacionais — variações na velocidade de escoamento e na profundidade — sem alterações na configuração geométrica do sistema, como aplicado nos estudos mencionados.

6.3.3.1 Localização das zonas mortas

A Figura 6.9 apresenta a distribuição das ZM no domínio computacional, obtida a partir de um plano de corte localizado a 0,30 m do fundo da lagoa. As ZM foram identificadas nas regiões onde as velocidades de escoamento ficaram abaixo de 0,1 m/s, evidenciando sua localização no sistema. Estudos recentes, como os de ABBASZADEH; MALDONADO; ALMEIDA, (2024), SHAO et al., (2024), KUMARI et al., (2024) e FU et al., (2023), corroboram esses resultados ao apontarem que as ZM tendem a se concentrar, predominantemente, nas curvas e na porção interna da seção reta, especialmente próxima à chicana, localizada no lado oposto à entrada do fluxo.

Figura 6.9 - Distribuição das zonas mortas na lagoa de alta taxa: T1 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T2 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T3 - profundidade de 0,20 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T4 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T5 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; T6 - profundidade de 0,35 m e velocidade de *inlet* de 0,40 m/s; T7 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,10 m/s; T8 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* de 0,25 m/s; e T9 - profundidade de 0,50 m e velocidade de *inlet* 0,40 m/s.



Observa-se que os tratamentos com menor velocidade de entrada (0,10 m/s, como T1, T3 e T7), apresentaram as maiores extensões de ZM. Nessas condições, destacam-se grandes áreas com velocidades muito baixas,

principalmente após as curvas e no canal oposto à roda de pás. Por outro lado, os tratamentos com velocidade de entrada mais elevada (0,40 m/s, como T2, T4 e T8), exibiram significativamente menores regiões de baixa velocidade, indicando uma circulação mais eficiente do fluido. Esse comportamento está diretamente relacionado à dinâmica do escoamento nas curvas da lagoa. A geometria, caracterizada por um raio interno menor, favorece a redução da velocidade do fluido nessa região, enquanto o escoamento ao longo do raio externo apresenta velocidades mais elevadas devido à maior distância percorrida. Esse fenômeno está em concordância com o princípio da conservação da quantidade de movimento (MORAIS CAMPOS et al., 2025).

Além disso, nota-se que o aumento da profundidade também influencia a dinâmica do escoamento, embora seu efeito seja menos expressivo comparado à velocidade. Por exemplo, ao comparar T5 (0,20 m e 0,25 m/s) com T9 (0,35 m e 0,25 m/s), observou-se uma leve redistribuição das zonas de baixa velocidade, porém sem alterações significativas no percentual de ZM.

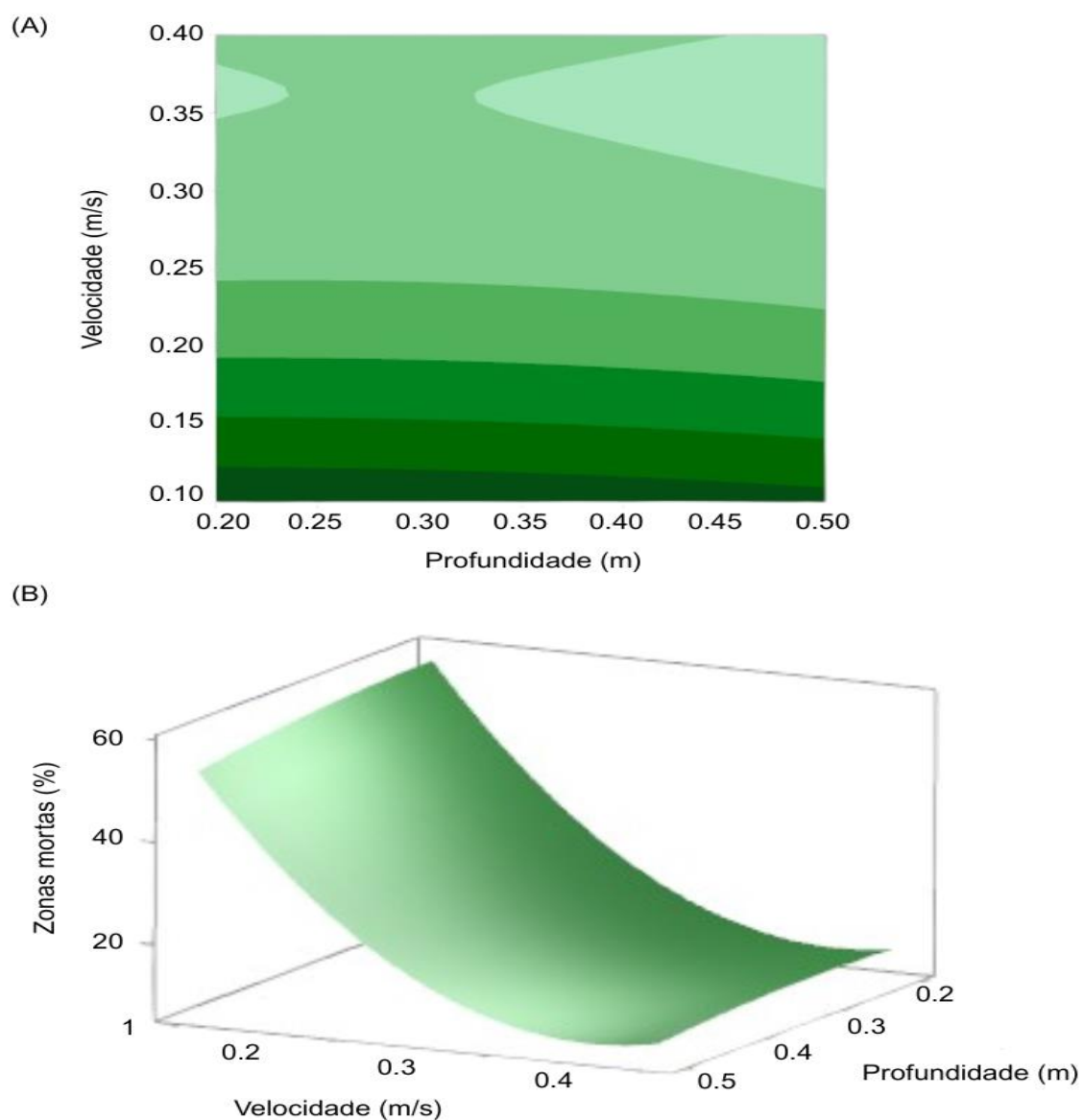
De forma geral, a análise visual da Figura 6.9 confirma que a velocidade do escoamento é o fator com maior influência na mitigação das ZM, sendo que valores superiores a 0,25 m/s promovem uma circulação mais homogênea e reduzem significativamente a extensão dessas regiões de baixa movimentação.

6.3.4 Variações na velocidade de fluido, profundidade do canal e impacto nas zonas mortas

A ANOVA indicou que o modelo ajustado é estatisticamente significativo ($p < 0,001$), demonstrando que os parâmetros de velocidade e profundidade explicam adequadamente a variação do percentual de ZM, com um coeficiente de determinação elevado ($R^2 = 99,8\%$). A velocidade apresentou efeito estatisticamente significativo tanto no termo linear ($p < 0,001$) quanto no quadrático ($p < 0,001$), sendo identificada como o parâmetro de maior influência na redução das ZM. Em contrapartida, a profundidade não se mostrou estatisticamente significativa ($p = 0,118$), assim como nos termos de interação linear ($p = 0,425$) e quadrático ($p = 0,464$). Esses resultados indicam que, dentro da faixa analisada (0,20 a 0,50 m), a profundidade exerce efeito mínimo sobre a variável resposta ZM.

Essa predominância do fator velocidade é confirmada visualmente pelos gráficos de contorno (Figura 6.10A) e de superfície de resposta (Figura 6.10B). O primeiro demonstra que, à medida que a velocidade aumenta, as ZM diminuem, independentemente da profundidade. O segundo evidencia uma tendência curvilínea, na qual as ZM reduzem de forma expressiva com o aumento da velocidade até, aproximadamente, 0,35 – 0,38 m/s. A partir desse intervalo, aumentos adicionais na velocidade não promovem reduções significativas das ZM.

Figura 6.10 - (A) Gráfico de contorno; (B) Gráfico de superfície de resposta.



A Equação 6.4 de regressão obtida pela ANOVA reforça os resultados anteriores. A velocidade possui um coeficiente linear negativo expressivo (–

510,5), indicando que seu aumento provoca a redução das ZM, e um coeficiente quadrático positivo (+691,7), que caracteriza o comportamento curvilíneo observado. Por outro lado, os coeficientes associados à profundidade são pequenos (12,7 e -45,2 referentes ao coeficiente linear e coeficiente quadrático positivo, respectivamente) e não contribuem significativamente para a modelagem da variável resposta. O termo de interação entre profundidade e velocidade também é pequeno e estatisticamente não significativo ($p = 0,425$).

$$\begin{aligned} \text{Zonas mortas (\%)} = & 100,66 * \text{Profundidade (m)} - 510,5 * \text{Velocidade (m/s)} - \\ & 45,2 * \text{Profundidade (m)} * \text{Profundidade (m)} + 691,7 * \text{Velocidade (m/s)} * \\ & \text{Velocidade (m/s)} + 35,3 * \text{Profundidade (m)} - 510,5 * \text{Velocidade (m/} \\ & \text{s)} \end{aligned} \quad (\text{Equação 6.4})$$

LIMA; MARINHO; MORAIS, (2021) apontaram que, embora lagoas mais profundas possam apresentar melhorias hidrodinâmicas, esse efeito tende a ser menos expressivo em canais longos, sugerindo que a influência da profundidade se torna secundária em relação à velocidade de escoamento. Esses achados corroboram os resultados deste trabalho, no qual o efeito da profundidade na redução das ZM não foi estatisticamente significativo. Além disso, os autores ressaltaram que o dimensionamento geométrico básico da lagoa (comprimento, profundidade e largura) não depende diretamente da velocidade alvo, dentro da faixa de 0,20 a 0,40 m/s — intervalo também adotado nesta análise.

Por outro lado, HADIYANTO et al., (2013) destacaram que, sob velocidade constante (0,30 m/s), o aumento da profundidade tende a elevar o volume das ZM, uma vez que há maior volume de fluido suscetível à formação de regiões de baixa movimentação, especialmente em canais com relações C/L menores. No entanto, os dados obtidos neste estudo sugerem que esse efeito não se manifesta de forma significativa nos intervalos de profundidade adotados. Essa divergência pode ser atribuída a dois fatores principais: o primeiro refere-se às possíveis diferenças nas geometrias dos sistemas analisados, uma vez que HADIYANTO et al., (2013) estudaram lagoas com configurações geométricas distintas; o segundo diz respeito à predominância do efeito da velocidade, que,

ao ser aumentada, promove uma circulação suficientemente eficiente para atenuar o impacto da profundidade sobre as ZM no cenário avaliado.

Outro ponto relevante é o comportamento curvilíneo identificado na relação entre velocidade e percentual de ZM, confirmado tanto pelo gráfico de superfície (Figura 6.10B) quanto pelos coeficientes da equação de regressão (Equação 6.4). Observa-se que a redução acentuada das ZM até aproximadamente 0,35 – 0,38 m/s, a partir da qual melhorias adicionais tornam-se marginalmente irrelevantes. Esse resultado sugere a existência de um ponto ótimo operacional, além do qual o aumento da velocidade resulta em maior consumo energético sem benefícios proporcionais na mitigação das ZM. Tal observação é coerente com discussões anteriores na literatura, que ressaltam a importância de se buscar um equilíbrio entre eficiência hidrodinâmica e custo energético em sistemas de cultivo (HREIZ et al., 2014; LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021).

Portanto, os resultados obtidos reforçam que, dentro dos intervalos analisados, a otimização da hidrodinâmica das LATs deve priorizar o controle adequado da velocidade de escoamento, sendo a profundidade um parâmetro de menor relevância para o controle das ZM, embora possa impactar outros aspectos operacionais, como a penetração de luz, temperatura e características biológicas específicas de cada cultura.

6.4 Conclusões

Os resultados obtidos por meio das simulações CFD, validadas experimentalmente, comprovaram a confiabilidade do modelo na representação do comportamento hidrodinâmico de uma LAT. As análises indicaram que a velocidade de escoamento é o fator predominante na mitigação das ZM, apresentando efeito estatisticamente significativo. Observou-se que o aumento da velocidade promove uma redução acentuada no percentual de ZM até atingir um patamar de saturação, entre aproximadamente 0,35 e 0,38 m/s, a partir do qual ganhos adicionais na circulação do fluido tornam-se marginalmente irrelevantes.

Em contrapartida, a profundidade, dentro do intervalo avaliado (0,20 a 0,50 m), não apresentou influência estatisticamente significativa sobre a

formação de ZM, indicando que seu impacto sobre a hidrodinâmica é limitado quando a velocidade de escoamento está devidamente ajustada. Esse resultado sugere que é possível operar lagoas com profundidades maiores sem comprometer a eficiência da circulação, desde que se mantenham velocidades adequadas para garantir a mistura do meio.

Entre as combinações testadas, o tratamento T4 - que corresponde à maior profundidade (0,50 m) e à maior velocidade de escoamento (0,40 m/s) - destacou-se como a configuração mais eficiente, apresentando o menor percentual de ZM (9,02%) e, conseqüentemente, o melhor desempenho hidrodinâmico dentre os cenários simulados.

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a otimização da hidrodinâmica em LATs deve priorizar o controle da velocidade de escoamento, uma vez que este é o parâmetro com maior influência na redução das ZM e na melhoria da distribuição do fluido. Embora a profundidade não tenha apresentado efeito significativo sobre a formação de ZM, ela continua sendo um elemento relevante no dimensionamento do sistema, especialmente por seus efeitos sobre aspectos biológicos, como penetração de luz, controle térmico e produtividade, e seu papel em aspectos operacionais.

6.5 Referências

ABBASZADEH, Mahmoud; MALDONADO, Sergio; ALMEIDA, Gustavo de. Changes in velocity distribution produced by paddlewheels in algae raceway ponds. *Algal Research*, v. 79, p. 103454, abr. 2024.

AKCA, Mehmet Sadik *et al.* Application of Vortex Induced Vibration Systems to Improve Vertical Mixing and Create Light/Dark Cycles for Enhanced Algal Biomass Productivity in Raceway Ponds. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 11, n. 2, p. 245, 18 jan. 2023.

ALI, Haider *et al.* Numerical prediction of algae cell mixing feature in raceway ponds using particle tracing methods. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 112, n. 2, p. 297–307, 10 fev. 2015.

BABCOCK, Roger W. *et al.* Improving mass transfer in an inclined tubular photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*, v. 28, n. 4, p. 2195–2203, 3 ago. 2016.

BITOG, J. P. *et al.* Application of computational fluid dynamics for modeling and designing photobioreactors for microalgae production: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 76, n. 2, p. 131–147, maio 2011.

CHEN, Zhijie *et al.* Light/dark cycle of microalgae cells in raceway ponds: Effects of paddlewheel rotational speeds and baffles installation. *Bioresource Technology*, v. 219, p. 387–391, nov. 2016.

CHENG, Jun *et al.* Enhanced flashing light effect with up-down chute baffles to improve microalgal growth in a raceway pond. *Bioresource Technology*, v. 190, p. 29–35, ago. 2015.

CHIARAMONTI, David *et al.* Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. *Applied Energy*, v. 102, p. 101–111, fev. 2013.

COUTO, Eduardo *et al.* Evaluation of high rate ponds operational and design strategies for algal biomass production and domestic wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, v. 791, p. 148362, out. 2021.

DELAVARI AMREI, H. *et al.* Using fluorescent material for enhancing microalgae growth rate in photobioreactors. *Journal of Applied Phycology*, v. 27, n. 1, p. 67–74, 21 fev. 2015.

FU, Shuangcheng *et al.* Effects of cross baffles on the flow of the microalgae in raceway photobioreactors. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 192, p. 109515, out. 2023.

GHASEMI, Y. *et al.* Microalgae biofuel potentials (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, v. 48, n. 2, p. 126–144, 29 mar. 2012.

HADIYANTO, H. *et al.* Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, v. 217, p. 231–239, fev. 2013.

HREIZ, Rainier *et al.* Experimental and numerical investigation of hydrodynamics in raceway reactors used for algaculture. *Chemical Engineering Journal*, v. 250, p. 230–239, ago. 2014.

HUANG, Jianke *et al.* Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CFD simulations and experiments. *Algal Research*, v. 10, p. 64–71, jul. 2015.

HUANG, Jianke *et al.* Design and optimization of a novel airlift-driven sloping raceway pond with numerical and practical experiments. *Algal Research*, v. 20, p. 164–171, dez. 2016.

KHAN, M. *et al.* Joint external evaluation of IHR core capacities of the Islamic Republic of Pakistan, 2016. *International Journal of Infectious Diseases*, v. 73, p. 36–37, ago. 2018.

KUMAR, Kanhaiya *et al.* Recent trends in the mass cultivation of algae in raceway ponds. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 875–885, nov. 2015.

KUMARI, Rozy *et al.* Hydrodynamic performance of raceway pond using k- ω and LES turbulence models. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 16, n. 6, 1 nov. 2024.

KUSMAYADI, Adj; PHILIPPIDIS, George P.; YEN, Hong-Wei. Application of computational fluid dynamics to raceways combining paddlewheel and CO₂ spargers to enhance microalgae growth. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 129, n. 1, p. 93–98, jan. 2020.

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, p. 269–289, 1974.

LIMA, Adriano; MARINHO, Bárbara; MORAIS, Tiago. Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions. *Aquaculture International*, v. 29, n. 1, p. 19–35, 16 fev. 2021.

LUNDQUIST, Tryg J.; WOERTZ, Ian; BENEMANN, John R. Microalgae for wastewater treatment and biofuels production. In: ABSTRACTS OF PAPERS OF

THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA: AMER CHEMICAL SOC, 2010.

MENDOZA, J. L. *et al.* Fluid-dynamic characterization of real-scale raceway reactors for microalgae production. *Biomass and Bioenergy*, v. 54, p. 267–275, jul. 2013.

MENTER, F. R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA Paper*, p. 93–2906, 1993.

MORAIS CAMPOS, Gabriel de *et al.* Influence of paddlewheel geometry on hydrodynamic performance and energy consumption in microalgae cultivations in open raceway ponds. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 48, n. 7, p. 1171–1188, 23 jul. 2025.

ORAGUI, J. I. *et al.* The Removal of Excreted Bacteria and Viruses in Deep Waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil. *Water Science and Technology*, v. 19, n. 3–4, p. 569–573, 1 mar. 1987.

ORTIZ, Antonio *et al.* Advanced biokinetic and hydrodynamic modelling to support and optimize the design of full-scale high rate algal ponds. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, v. 20, p. 386–398, 2022.

RANGANATHAN, Panneerselvam *et al.* Experimental and modelling of *Arthrospira platensis* cultivation in open raceway ponds. *Bioresource Technology*, v. 242, p. 197–205, out. 2017.

SANTOS, Thiago Oliveira dos *et al.* A UTILIZAÇÃO DOS MÉTODOS DE MEDIÇÃO ACÚSTICO DOPPLER E FLUTUADOR COMO FERRAMENTA PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO E VELOCIDADE EM CORPOS HÍDRICOS – NOTAS DE UMA EXPERIÊNCIA DE CAMPO. *ACTA GEOGRÁFICA*, v. 12, n. 28, p. 170–177, 24 abr. 2018.

SAWANT, S. S. *et al.* Computational and experimental studies of high depth algal raceway pond photo-bioreactor. *Renewable Energy*, v. 118, p. 152–159, abr. 2018.

SAWANT, S. S. *et al.* Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, v. 133, p. 528–537, abr. 2019.

SHAO, Cong *et al.* Enhancing microalgal biomass production in lab-scale raceway ponds through innovative computational fluid dynamics-based electrode deflectors. *Bioresource Technology*, v. 394, p. 130282, fev. 2024.

SOMPECH, Kawisra; CHISTI, Yusuf; SRINOPHAKUN, Thongchai. Design of raceway ponds for producing microalgae. *Biofuels*, v. 3, n. 4, p. 387–397, 9 jul. 2012.

SUTHERLAND, Donna L.; TURNBULL, Matthew H.; CRAGGS, Rupert J. Increased pond depth improves algal productivity and nutrient removal in wastewater treatment high rate algal ponds. *Water Research*, v. 53, p. 271–281, abr. 2014.

WANG, Chinchin; LAN, Christopher Q. Effects of shear stress on microalgae – A review. *Biotechnology Advances*, v. 36, n. 4, p. 986–1002, jul. 2018.

WEISSMAN, Joseph C.; GOEBEL, Raymond P.; BENEMANN, John R. Photobioreactor design: Mixing, carbon utilization, and oxygen accumulation. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 31, n. 4, p. 336–344, mar. 1988.

YAKHOT, V. *et al.* Development of turbulence models for shear flows by double expansion technique. [*S.l.*: *S.n.*]. v. 4.

7 Conclusão geral

A partir dos estudos realizados, foi possível compreender os desafios e as possibilidades associadas ao uso da CFD como ferramenta de apoio no projeto e na operação de LATs.

A análise bibliométrica evidenciou que, embora a aplicação da CFD em LATs esteja em expansão, trata-se de uma área ainda em desenvolvimento, com pesquisas concentradas em poucos países. As principais tendências estão voltadas à otimização da hidrodinâmica, ao aprimoramento das geometrias dos reatores e à integração da modelagem com aspectos biológicos, energéticos e econômicos, alinhando-se às demandas por soluções sustentáveis.

As simulações confirmaram que a velocidade de escoamento é um fator primordial para a mitigação das ZM, sendo essencial para promover uma circulação eficiente do fluido. Por sua vez, a profundidade apresentou influência secundária, dentro dos intervalos operacionais avaliados, permitindo maior flexibilidade no dimensionamento das LATs sem comprometer seu desempenho hidrodinâmico.

Diante dos resultados, o uso da CFD se destaca como uma ferramenta fundamental na otimização de LATs, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, sustentáveis e economicamente viáveis.

8 Sugestões para pesquisas futuras

Recomenda-se que pesquisas futuras sejam direcionadas à incorporação de modificações geométricas sobre a melhor condição operacional identificada neste trabalho — profundidade de 0,50 m e velocidade de entrada de 0,40 m/s. Dentre essas modificações, destaca-se a instalação de defletores nas curvas e a alteração das extremidades da chicana para o formato de gotas, com o objetivo de reduzir ZM e aprimorar a eficiência da circulação do fluido. Inicialmente, essas intervenções devem ser avaliadas por meio de simulações CFD, de forma a prever seu impacto hidrodinâmico e validar sua eficácia antes da aplicação prática.

Na sequência, sugere-se a implementação dessas alterações em sistemas em escala real, permitindo a condução de experimentos que avaliem, de forma integrada, tanto a dinâmica do escoamento quanto os efeitos diretos sobre a produtividade de biomassa microalgal e tratamento do efluente. Além dos ganhos técnicos, torna-se essencial analisar a viabilidade econômica das intervenções, ponderando se os benefícios obtidos em termos de eficiência operacional e aumento na produção de biomassa compensam os investimentos necessários para a adaptação dos sistemas.

REFERÊNCIAS

- ACIÉN, F. G. et al. Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 100, n. 21, p. 9013–9022, 20 nov. 2016.
- AHMAD, A. et al. Algae biotechnology for industrial wastewater treatment, bioenergy production, and high-value bioproducts. *Science of The Total Environment*, v. 806, p. 150585, 1 fev. 2022.
- ASSEMANY, P. P. et al. Algae/bacteria consortium in high rate ponds: Influence of solar radiation on the phytoplankton community. *Ecological Engineering*, v. 77, p. 154–162, abr. 2015.
- BENEDETTI, M. et al. Biomass from microalgae: the potential of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories*, v. 17, n. 1, p. 173, 10 dez. 2018.
- CAPPELLETTI, M. et al. Biotechnology of *Rhodococcus* for the production of valuable compounds. *Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 104, n. 20, p. 8567–8594, 12 out. 2020.
- CHEN, Z. et al. Numerical and experimental study on the CO₂ gas–liquid mass transfer in flat-plate airlift photobioreactor with different baffles. *Biochemical Engineering Journal*, v. 106, p. 129–138, fev. 2016.
- CRAGGS, R. et al. High rate algal pond systems for low-energy wastewater treatment, nutrient recovery and energy production. *New Zealand Journal of Botany*, v. 52, n. 1, p. 60–73, 2 jan. 2014.
- HADIYANTO, H. et al. Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, v. 217, p. 231–239, fev. 2013.
- HONDA, R. et al. Carbon dioxide capture and nutrients removal utilizing treated sewage by concentrated microalgae cultivation in a membrane photobioreactor. *Bioresource Technology*, v. 125, p. 59–64, dez. 2012.
- HUANG, J. et al. Investigation on the performance of raceway ponds with internal structures by the means of CFD simulations and experiments. *Algal Research*, v. 10, p. 64–71, jul. 2015.

LEONG, W. H. et al. Dual nutrient heterogeneity modes in a continuous flow photobioreactor for optimum nitrogen assimilation to produce microalgal biodiesel. *Renewable Energy*, v. 184, p. 443–451, jan. 2022.

LI, K. et al. Microalgae-based wastewater treatment for nutrients recovery: A review. *Bioresource Technology*, v. 291, p. 121934, nov. 2019.

LI, M. et al. Knowledge Mapping of High-Rate Algal Ponds Research. *Water*, v. 15, n. 10, p. 1916, 18 maio 2023.

LIMA, A.; MARINHO, B.; MORAIS, T. Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions. *Aquaculture International*, v. 29, n. 1, p. 19–35, 16 fev. 2021.

LIU, R. et al. Capabilities and mechanisms of microalgae on removing micropollutants from wastewater: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 285, p. 112149, maio 2021.

ORTIZ, A. et al. Advanced biokinetic and hydrodynamic modelling to support and optimize the design of full-scale high rate algal ponds. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, v. 20, p. 386–398, 2022.

PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J. Wastewater treatment and algal production in high rate algal ponds with carbon dioxide addition. *Water Science and Technology*, v. 61, n. 3, p. 633–639, 1 fev. 2010.

PATEL, A. K.; CHOI, Y. Y.; SIM, S. J. Emerging prospects of mixotrophic microalgae: Way forward to sustainable bioprocess for environmental remediation and cost-effective biofuels. *Bioresource Technology*, v. 300, p. 122741, mar. 2020.

PIRASACI, T. et al. Hydrodynamic design of an enclosed Horizontal BioReactor (HBR) for algae cultivation. *Algal Research*, v. 28, p. 57–65, dez. 2017.

ROSLI, S. S. et al. Optimum interaction of light intensity and CO₂ concentration in bioremediating N-rich real wastewater via assimilation into attached microalgal biomass as the feedstock for biodiesel production. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 141, p. 355–365, set. 2020. 47

ROSMAHADI, N. A. et al. Assuaging Microalgal Harvesting Woes via Attached Growth: A Critical Review to Produce Sustainable Microalgal Feedstock. *Sustainability*, v. 13, n. 20, p. 11159, 9 out. 2021.

SANTIAGO, A. DA F. Evaluation of the performance of high rate algal ponds treating pre-disinfected wastewater under different levels of solar radiation. *Doutorado em Geotecnia—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa*, 23 fev. 2013.

SAWANT, S. S. et al. Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, v. 133, p. 528–537, abr. 2019.

SOMPECH, K.; CHISTI, Y.; SRINOPHAKUN, T. Design of raceway ponds for producing microalgae. *Biofuels*, v. 3, n. 4, p. 387–397, 9 jul. 2012.

SU, Y. Revisiting carbon, nitrogen, and phosphorus metabolisms in microalgae for wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, v. 762, p. 144590, 25 mar. 2021.

SUTHERLAND, D. L. et al. Seasonal variation in light utilisation, biomass production and nutrient removal by wastewater microalgae in a full-scale high-rate algal pond. *Journal of Applied Phycology*, v. 26, n. 3, p. 1317–1329, 12 jun. 2014.

SUTHERLAND, D. L.; RALPH, P. J. 15 years of research on wastewater treatment high rate algal ponds in New Zealand: discoveries and future directions. *New Zealand Journal of Botany*, v. 58, n. 4, p. 334–357, 1 out. 2020.

APÊNDICE A

Tabela A1 - Tempo medido experimentalmente na Seção 1 e velocidade calculada para cada repetição.

Repetições	Δt (s)	Velocidade (m/s)
1	3,00	0,2000
2	3,00	0,2000
3	4,00	0,1500
4	3,00	0,2000
5	4,00	0,1500
6	3,00	0,2000
7	3,00	0,2000
8	3,00	0,2000
9	4,00	0,1500
10	2,00	0,3000
11	4,00	0,1500
12	3,00	0,2000
13	4,00	0,1500
14	4,00	0,1500
15	4,00	0,1500
16	2,00	0,3000
17	3,00	0,2000
18	3,00	0,2000
19	4,00	0,1500
20	4,00	0,1500
21	5,00	0,1200
22	2,00	0,3000
23	3,00	0,2000
24	3,00	0,2000
25	3,00	0,2000
26	3,00	0,2000
27	3,00	0,2000
28	3,00	0,2000
29	3,00	0,2000
30	3,00	0,2000

Tabela A2 - Tempo medido experimentalmente na Seção 2 e velocidade calculada para cada repetição.

Repetições	Δt (s)	Velocidade (m/s)
1	3,00	0,2000
2	2,00	0,3000
3	2,00	0,3000
4	2,00	0,3000
5	3,00	0,2000
6	2,00	0,3000
7	3,00	0,2000
8	2,00	0,3000
9	2,00	0,3000
10	2,00	0,3000
11	2,00	0,3000
12	2,00	0,3000
13	2,00	0,3000
14	4,00	0,1500
15	2,00	0,3000
16	4,00	0,1500
17	3,00	0,2000
18	2,00	0,3000
19	3,00	0,2000
20	2,00	0,3000
21	2,00	0,3000
22	3,00	0,2000
23	3,00	0,2000
24	3,00	0,2000
25	2,00	0,3000
26	2,00	0,3000
27	3,00	0,2000
28	2,00	0,3000
29	2,00	0,3000
30	3,00	0,2000

Tabela A3 - Tempo medido experimentalmente na Seção 3 e velocidade calculada para cada repetição.

Repetições	Δt (s)	Velocidade (m/s)
1	3,00	0,2000
2	3,00	0,2000
3	2,00	0,3000
4	2,00	0,3000
5	3,00	0,2000
6	2,00	0,3000
7	3,00	0,2000
8	2,00	0,3000
9	2,00	0,3000
10	2,00	0,3000
11	2,00	0,3000
12	2,00	0,3000
13	4,00	0,1500
14	3,00	0,2000
15	3,00	0,2000
16	3,00	0,2000
17	2,00	0,3000
18	2,00	0,3000
19	3,00	0,2000
20	3,00	0,2000
21	2,00	0,3000
22	2,00	0,3000
23	3,00	0,2000
24	3,00	0,2000
25	3,00	0,2000
26	3,00	0,2000
27	3,00	0,2000
28	2,00	0,3000
29	2,00	0,3000
30	2,00	0,3000

APÊNDICE B

Tabela B1 - Tempo medido experimentalmente na Seção 4 e velocidade calculada para cada repetição.

Repetições	Δt (s)	Velocidade (m/s)
1	6,64	0,2380
2	7,14	0,2213
3	5,14	0,3074
4	4,98	0,3173
5	4,83	0,3271
6	5,53	0,2857
7	7,14	0,2213
8	6,70	0,2358
9	8,36	0,1890
10	7,71	0,2049
11	6,69	0,2362
12	8,84	0,1787
13	7,94	0,1990
14	6,19	0,2553
15	8,54	0,1850
16	7,92	0,1995
17	6,78	0,2330
18	6,71	0,2355
19	5,89	0,2683
20	7,28	0,2170
21	5,10	0,3098
22	7,24	0,2182
23	6,43	0,2457
24	7,83	0,2018
25	7,39	0,2138
26	7,62	0,2073
27	7,78	0,2031
28	6,33	0,2496
29	9,97	0,1585
30	5,09	0,3104