

GABRIEL DE MORAIS CAMPOS

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA RODA DE PÁS NO DESEMPENHO
HIDRODINÂMICO E CONSUMO ENERGÉTICO EM CULTIVOS DE
MICROALGAS EM TANQUES ABERTOS**

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

Orientadora: Natália dos Santos Renato

Coorientador: Márcio Arêdes Martins

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

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

T

C198i
2023 Campos, Gabriel de Moraes, 1998-
Influência da geometria da roda de pás no desempenho
hidrodinâmico e consumo de energia em cultivos de microalgas
em tanques abertos / Gabriel de Moraes Campos. – Viçosa, MG,
2023.

1 dissertação eletrônica (122 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Natália dos Santos Renato.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Referências bibliográficas: f. 80-86.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.674>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Hidrodinâmica. 2. Microalgas - Cultura e meios de
cultura. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. Dinâmica dos
fluidos. I. Renato, Natália dos Santos, 1984-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 627.042


GABRIEL DE MORAIS CAMPOS

**INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA RODA DE PÁS NO DESEMPENHO
HIDRODINÂMICO E CONSUMO ENERGÉTICO EM CULTIVOS DE
MICROALGAS EM TANQUES ABERTOS**


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

APROVADA: 26 de julho de 2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **GABRIEL DE MORAIS CAMPOS**
Data: 26/10/2023 12:10:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel de Moraes Campos
Autor

Documento assinado digitalmente
 **NATALIA DOS SANTOS RENATO**
Data: 26/10/2023 11:31:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Natalia dos Santos Renato
Orientadora

*Aos meus pais Luzia e Rogério, aos
meus familiares, amigos e professores
pelo incentivo, parceria e oportunidades
durante minha trajetória
DEDICO*

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luzia Almeida de Moraes Campos e Rogério de Campos, que jamais mediram esforços para que eu pudesse estudar, nunca deixando faltar nada e sempre me apoiando, mesmo nas situações mais difíceis. À minha família, por compreender a necessidade da distância e por me receber de braços abertos nas minhas raras visitas.

À Clarisse Mercês, pelo apoio, paciência, amor, incentivo e por ajudar em tudo que foi possível. Obrigado por ter feito tanto por mim nessa jornada.

À Professora Natália dos Santos Renato, pelo suporte e orientação, que foram essenciais na conclusão deste trabalho, e ao meu coorientador, Márcio Arêdes Martins, por todo apoio, confiança, dedicação e orientação durante a elaboração deste trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Biocombustíveis, Dilson, Maurício e Elder, pelo suporte, troca de conhecimento e ajuda na condução dos trabalhos.

Aos meus amigos de casa, da República Butantã, Paloma Brás, Victor Passos e Thaís Alves, por serem parte da minha família em Viçosa, dividindo tudo comigo e me trazendo conforto ao chegar em casa, partilhando dos bons e maus momentos que um estudante vive na pós-graduação.

Aos meus amigos da República Integração, em especial Clarisse, Marcella, Nathan, Jean, Cachu, Pré, Mari, Lívia, Ana, Gaspar, Bárbara, Letícia, Thais, Mari Mota e Arthur, por terem me acolhido e terem sido minha primeira e eterna morada em Viçosa. Obrigado por tudo de maravilhoso que compartilhamos!

Aos meus amigos de Belo Horizonte, em especial Lucas Grossi, João Victor Aguiar, Karine Freitas e Isabela Araújo, por continuarem por perto, apesar da distância, e Igor Almeida, Eduardo Kossoski, Leonardo Campos e Lucas Menezes, por termos feito maravilhosas as poucas vezes que nos encontramos depois que vim para Viçosa.

Aos meus companheiros do grupo de pesquisa em Energia na Agricultura, em especial Caroline Piccoli, Luna Lilás, Augusto Laviola, Camile Arêdes e Luan Braga pela parceria e apoio. Ao Victor Laviola, braço direito nos aprendizados e na condução dessa pesquisa. Agradeço também a Pedro Moura, Bianca Assis, ao Laboratório de Qualidade Ambiental e ao Departamento de Física, pelo fundamental apoio na execução dos meus experimentos.

Aos profissionais Laís e Vinícius, da empresa Império do Acrílico, pela assistência na construção do protótipo.

Ao Programa Bom Aluno e a todos os professores que passaram pela minha vida acadêmica, os quais me proporcionaram a base para chegar até aqui. A todas as pessoas e movimentos sociais de esquerda que lutaram para que um dia pessoas pobres pudessem se formar mestres!

A todas as pessoas que conheci em Viçosa, principalmente no Teddies!

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização da pós-graduação no curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo financiamento da pesquisa (Código de Financiamento 001).

Agradeço a todos, do fundo do coração.

BIOGRAFIA

GABRIEL DE MORAIS CAMPOS, filho de Luzia Almeida de Moraes Campos e Rogério de Campos, nasceu em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, Brasil, em 24 de agosto de 1998.

Em fevereiro de 2016, iniciou o curso de Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), graduando-se em dezembro de 2020. Foi estagiário da Vale S.A. de 2018 a 2019 e atuou prestando serviços terceirizados à mesma empresa entre 2019 e 2021.

Em agosto de 2021, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Energia na Agricultura, submetendo-se à defesa da dissertação, requisito indispensável para a obtenção do título de *Magister Scientiae*, em 26 de julho de 2023.

"Vida sem utopia não entendo que exista."

Caetano Emanuel Viana Teles Veloso

RESUMO

CAMPOS, Gabriel de Morais, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Influência da geometria da roda de pás no desempenho hidrodinâmico e consumo energético em cultivos de microalgas em tanques abertos.** Orientadora: Natália dos Santos Renato. Coorientador: Márcio Arêdes Martins.

O cultivo de microalgas é uma área com grande potencial em várias indústrias, como farmacêutica, alimentícia, cosmética e energética. Com o intuito de otimizar os parâmetros geométricos de um sistema de agitação por pás rotativas de um tanque de microalgas, a partir de CFD e da validação experimental, foi realizada a investigação de diferentes velocidades de rotação, ângulo construtivo e número de pás em uma roda de pás na operação de um tanque de cultivo de microalgas. Os resultados obtidos revelaram que que tanques operados com as rodas com ângulo construtivo de 90° apresentaram velocidades médias de escoamento mais altas. Em termos de Índice de Mistura Vertical (IMV), as rodas com 8 pás obtiveram desempenhos inferiores em relação às de 4 e 6 pás. O ângulo construtivo de 60° minimizou a potência consumida. A configuração ótima encontrada foi a roda com 4 pás, ângulo de 60° e rotação de 19 rpm, sendo observado o maior Índice de Desempenho da Mistura (IDM), no valor de $46,12 \text{ W}^{-1}$. As pás retas, quando operadas na rotação de 13 rpm, não foram capazes de manter as microalgas em suspensão. Nos casos das pás com ângulo de 60° , todas as rotações testadas atingiram um alto nível de suspensão.

Palavras-chave: Otimização. CFD. Fluidodinâmica.

ABSTRACT

CAMPOS, Gabriel de Moraes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Influence of paddlewheel geometry on hydrodynamic performance and energy consumption in microalgae cultivations in open raceway ponds.** Adviser: Natália dos Santos Renato. Co-adviser: Márcio Arêdes Martins.

Microalgae cultivation is a field with significant potential across various industries, such as pharmaceuticals, food, cosmetics, and energy. Aiming to optimize the geometric parameters of a paddlewheel agitation system through Computational Fluid Dynamics (CFD) and experimental validation, an investigation was conducted involving different rotation speeds, blade pitch angles, and the number of blades on a paddlewheel within a microalgae cultivation tank. The results revealed paddlewheels with 90° inclined blades exhibited higher average flow velocities. Regarding the vertical mixing index (VMI), the 8-blade paddlewheels demonstrated inferior performance compared to systems with four and six blades. A pitch angle of 60° minimized power consumption. The optimal configuration found was a 60° angled 4-blade paddlewheel, operating at a rotation speed of 19 rpm, yielding the highest mixing performance index (MPI) value at 46.12 W⁻¹. Straight blades operated at 13 rpm could not sustain microalgae suspension. For 60° inclined blades, all tested rotations achieved a high level of suspension.

Keywords: Optimization. CFD. Fluid dynamics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de cultivo de microalgas em fotobiorreatores fechados.	19
Figura 2 – Exemplo de cultivo de microalgas em larga escala em tanques abertos na empresa Cyanotech Corporation.....	21
Figura 3 – Geometria de uma roda de pás para agitação de um cultivo de microalgas.	23
Figura 4 – Localização do ângulo construtivo β com relação aos vetores de velocidade tangencial, relativa e absoluta no triângulo de velocidades na ponta de uma pá.	24
Figura 5 – Indicação das dimensões L (comprimento), W (largura do canal) e d (profundidade do cultivo) na geometria do tanque.	26
Figura 6 – Posição do segmento de reta \bar{A} no tanque nas vistas (a) superior; (b) frontal; (c) lateral; e (d) isométrica.	37
Figura 7 – Medidor de velocidade tipo rotor (molinete) utilizado para as medições de velocidades experimentais.....	37
Figura 8 – Domínio computacional do tanque no ambiente do programa <i>Design Modeler</i> em vista isométrica.	40
Figura 9 – (a) Domínios computacionais das rodas com 4, 6 e 8 pás e ângulos construtivos de 45°, 60° e 90° em vista isométrica e (b) comparação dos ângulos construtivos no corte em vista lateral e com indicação do sentido de rotação do eixo.	41
Figura 10 – Malha discretizada gerada no ambiente <i>Ansys</i> para o Caso 9 em vista isométrica, com 414.814 nós e 368.731 elementos.....	42
Figura 11 – Variação de velocidade média em função da rotação e da quantidade de pás para os ângulos construtivos de (a) 45°, (b) 60° e (c) 90°.	43
Figura 12 – Variação da velocidade média em função do ângulo construtivo (β) para as rodas construídas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.	44
Figura 13 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 13 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.....	45
Figura 14 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 15 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.....	46
Figura 15 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 17 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.....	46
Figura 16 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 19 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.....	47
Figura 17 – Variação do percentual de zonas mortas em função do ângulo construtivo (β) para rodas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.	48

Figura 18 – Regiões de estagnação do escoamento (velocidade menor que $0,1 \text{ m s}^{-1}$) entre as pás no Caso 34 em vista isométrica.....	49
Figura 19 – Localização das zonas de estagnação no plano a 30 mm do fundo do tanque em vista superior.....	50
Figura 20 – Variação do índice de mistura vertical em função do ângulo construtivo das pás e da rotação para rodas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.....	51
Figura 21 – Variação da velocidade vertical média em função do ângulo construtivo (β) e para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19.....	52
Figura 22 – Vista lateral do perfil de velocidades nas regiões de ponta de pá do corte a 50 mm das paredes do canal, para pás retas e inclinadas em 60° , com mapa de cores da escala de velocidades verticais.....	53
Figura 23 – Variação do índice de uniformidade em função da rotação para os ângulos construtivos de (a) 45° , (b) 60° e (c) 90°	54
Figura 24 – Variação do índice de uniformidade em função do ângulo construtivo (β) para as rodas construídas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.....	55
Figura 25 – Localização das regiões com alto Número de Courant no Caso 16 em vista isométrica.....	58
Figura 26 – Variação da potência consumida teórica em função da rotação e da quantidade de pás para os ângulos construtivos (β) de (a) 45° , (b) 60° e (c) 90°	59
Figura 27 – Variação da potência consumida teórica em função do ângulo construtivo (β) e da quantidade de pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.....	60
Figura 28 – Variação da potência instantânea de uma pá em função do tempo computacional de passagem pela região fluída para os ângulos construtivos (β) de a 45° , 60° e 90°	61
Figura 29 – Comparação do instante de entrada de uma pá na região fluída para rodas com 4, 6 e 8 pás retas.....	63
Figura 30 – Variação das potências teóricas mínimas, máximas e médias em função do caso de simulação.....	64
Figura 31 – Vista lateral do tanque com a roda de pás com altura aumentada do eixo visando evitar espalhamento de fluído na entrada das pás.....	67
Figura 32 – Percentual da absorbância inicial em função do tempo, para a sedimentação livre e nas rotações de 13, 15 e 17 rpm, com ângulos construtivos (β) iguais a (a) 60° e (b) 90° , utilizando comprimento de onda de 750 nm.....	68
Figura 33 – Variação do percentual da absorbância inicial em função do tempo, para a sedimentação livre com ângulos construtivos (β) iguais a 60° e 90° , nas rotações de (a) 13, (b) 15 e (c) 17 rpm e comprimento de onda de 750 nm.....	69
Figura 34 – Variação da velocidade de escoamento simulada <i>versus</i> velocidade de escoamento experimental para o ângulo construtivo (β) de 60° em uma roda com 4 pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.....	70

Figura 35 – Variação da velocidade de escoamento simulada <i>versus</i> velocidade de escoamento experimental para o ângulo construtivo (β) de 90° em uma roda com 4 pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.....	71
Figura 36 – Variação da velocidade média no plano de corte e no segmento de reta em função do tempo computacional no Caso 29.....	73
Figura 37 – Variação das potências teóricas e experimentais em função da rotação para ângulos construtivos (β) de (a) 60 e (b) 90.	73
Figura 38 – Observação do escoamento pela adição de aveia em flocos na água com rotação das pás retas de 17 rpm.....	75
Figura 39 – Comparação do perfil de velocidade do escoamento simulado em CFD (Caso 21) com fotografia do escoamento com adição de aveia em flocos.	76
Figura 40 – Distribuição de velocidades de escoamento na secção a 100 mm do fundo do tanque para os Casos 29 e 29b na vista superior.	77
Figura 41 – Variação das potências teóricas instantâneas e médias em função do tempo computacional nos Casos 29 e 29b.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das variáveis chave dos 36 casos avaliados.....	28
Tabela 2 – Quantidade de nós para teste de independência de malha.....	29
Tabela 3 – Posição dos pontos amostrais de velocidade de escoamento.....	38
Tabela 4 – Avaliação do Número de Courant nas simulações.....	57
Tabela 5 – Variação do Índice de Desempenho da Mistura (IDM) e relação com os índices de uniformidade, mistura vertical, percentual de zonas mortas e potência consumida.....	65
Tabela 6 – Detalhamento do Índice de Desempenho da Mistura.....	72
Tabela 7 – Eficiência energética do sistema de mistura.....	74
Tabela 8 – Comparação dos indicadores para os casos 29 e 29b.....	76

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo geral	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1. Microalgas e suas aplicações	17
3.2. Tanques para cultivo de microalgas	19
3.2.1. Open Raceway Ponds (ORP).....	20
3.3. Sistemas de agitação	22
3.4. Aplicações de CFD no estudo de tanques	25
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1. Modelo de simulação	26
4.1.1. Geração da malha	28
4.1.2. Definições de setup.....	29
4.1.2.1. <i>Condições de contorno</i>	29
4.1.2.2. <i>Parâmetros temporais</i>	31
4.2. Avaliação da mistura	32
4.2.1. Índice de uniformidade	32
4.2.2. Índice de mistura vertical.....	33
4.2.3. Percentual de zonas mortas.....	33
4.2.4. Potência consumida média teórica.....	34
4.2.5. Indicador de desempenho de mistura	34
4.3. Validação experimental	35
4.3.1. Rotação crítica de sedimentação do cultivo de microalgas	35
4.3.2. Comparação das velocidades de escoamento	36
4.3.3. Comparação da potência consumida	38
4.3.4. Visualização do perfil de escoamento	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1. Modelagem e simulação do escoamento em tanque <i>raceway</i>	39
5.1.1. Geometria do tanque.....	39
5.1.2. Geração da malha	41

5.1.3. Velocidade média	42
5.1.4. Percentual de zonas mortas.....	48
5.1.4.1. <i>Localização das zonas mortas</i>	49
5.1.5. Velocidade e mistura na direção de atenuação da luz	51
5.1.6. Uniformidade da mistura	53
5.1.7. Número de Courant.....	56
5.1.8. Potência consumida	59
5.1.9. Indicador de Desempenho da Mistura	64
5.2. Validação experimental	66
5.2.1. Rotação crítica de sedimentação do cultivo de microalgas	67
5.2.2. Comparação das velocidades de escoamento	70
5.2.3. Comparação da potência consumida	73
5.2.4. Visualização do perfil de escoamento	75
5.2.5. Avaliação dos efeitos da alteração da posição do eixo motriz	76
6. CONCLUSÕES.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
APÊNDICE A – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DO CASO 35.....	87
APÊNDICE B – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DO CASO 1	109

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de microalgas desponta com um grande potencial para obtenção de produtos em diversos ramos industriais, como nas indústrias farmacêutica, alimentícia, cosmética e energética (INOSTROZA et al., 2021). Fatores como o aumento da população mundial, da industrialização e da necessidade por transporte vêm ocasionando uma rápida diminuição das reservas de combustíveis fósseis e recursos não-renováveis. Estima-se que, até 2030, a demanda global por energia terá um aumento de 53% em comparação aos valores atuais (KOWTHAMAN et al., 2022).

Em um contexto global de escalada da demanda energética, bem como da necessidade de priorização da energia limpa, obter produtos a partir de processos fotossintéticos é ambientalmente saudável e sustentável, visto que a principal fonte energética para tal é a luz natural e que se tem alta eficiência do uso da água (LIRA et al., 2012). Então, processos biofototrópicos têm sido estudados como ferramentas poderosas para a síntese de diversos produtos de interesse comercial, como pigmentos, fármacos, alimentos e combustíveis (CHOI et al., 2022; FRADIQUE et al., 2013; KOWTHAMAN et al., 2022; KUSMAYADI; PHILIPPIDIS; YEN, 2020). Além disso, as microalgas podem atuar como sequestradores de carbono e também no processo de tratamento de águas residuárias (ARINA et al., 2023; ZHAO et al., 2023).

A cultura de microalgas, que é amplamente desenvolvida em tanques abertos ou em *open raceways ponds* (ORP) (PANDEY; PREMALATHA, 2017), consiste no cultivo em um meio aquoso, no qual as microalgas se reproduzem e sintetizam lipídeos, proteínas, enzimas e outros compostos orgânicos, a partir da fotossíntese. Esses, por sua vez, são extraídos e utilizados na produção de produtos de interesse industrial (THUY LAN CHI et al., 2022).

Nesse tipo de tanque, a observação de alguns fatores pode garantir uma operação mais eficiente e lucrativa. Os principais fatores atrelados à qualidade do cultivo de microalgas são a intensidade luminosa, a distribuição vertical da luz, a distribuição de nutrientes e de gases no tanque (PANDEY; PREMALATHA, 2017).

A agitação é um fator crítico no cultivo de microalgas, pois afeta a distribuição de nutrientes, a renovação do ar, além da uniformidade da temperatura e da luminosidade no tanque de cultivo (HADIYANTO et al., 2012). Uma das maneiras de controlar a agitação é por meio da escolha da geometria da roda de pás. A forma e o tamanho das pás podem influenciar a eficiência da agitação, bem como a distribuição de fluido no tanque e o consumo energético.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos a partir de simulações numéricas de escoamento de fluidos em *raceways*, buscando um melhor entendimento do regime turbulento de movimento do meio de cultura (HREIZ *et al.*, 2014; LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021; PARK; LI, 2015; SAWANT *et al.*, 2019; YANG *et al.*, 2016). Entretanto, a influência de fatores geométricos, como o ângulo construtivo das pás, ainda precisa ser melhor compreendido.

O presente estudo é importante para a indústria de produção de microalgas, pois possui potencial para otimizar o processo de cultivo e aumentar a eficiência de agitação, resultando em melhores condições para o crescimento das microalgas e, conseqüentemente, em maior produtividade. Além disso, a metodologia e os resultados deste estudo podem ser aplicados em outras pesquisas envolvidas com agitação de tanques, como na produção de biotecnologia, de produtos químicos e alimentos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Otimizar os parâmetros geométricos de um sistema de agitação por pás rotativas (*paddlewheel*) visando a máxima eficiência de mistura em um tanque tipo *raceway* para cultivo de microalgas.

2.2. Objetivos Específicos

- I. Determinar, via simulação computacional, o efeito da alteração do número de pás do *paddlewheel* na eficiência de agitação do tanque;
- II. Simular o ângulo construtivo de pá mais adequado energeticamente para a produção de microalgas;
- III. Testar experimentalmente a melhor configuração por meio um protótipo de *paddlewheel* no *raceway* piloto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Microalgas e suas aplicações

As microalgas são seres unicelulares microscópicos que obtêm energia por meio da fotossíntese. Podem ser eucariontes, ou seja, possuir um núcleo celular definido, com estruturas complexas, ou procariontes, nas quais o material genético celular fica disperso no citoplasma (CICHONSKI; CHRZANOWSKI, 2022). As microalgas são um dos mais antigos seres a habitarem a Terra, e, por isso, passaram por bilhões de anos de adaptações e evolução, o que,

hoje, permite uma vasta gama de aplicações de interesse humano para os mais diversos tipos de microalgas existentes (CALIJURI et al., 2022; LEVASSEUR; PERRÉ; POZZOBON, 2020).

No setor alimentício, uma das grandes vantagens da utilização de microalgas para obtenção de insumos é o fato de que não é necessário solo fértil para o cultivo. Mesmo que a composição nutricional de uma porção de microalga possa variar de acordo com diversos fatores (como espécie, tipo de cultivo, exposição à luz solar e oferta de nutrientes durante o cultivo) é possível que seja inserida na dieta humana e há evidências desse consumo há cerca de 14 mil anos (TORRES-TIJI; FIELDS; MAYFIELD, 2020). Assim, as microalgas representam um emergente recurso sustentável em um cenário de crescimento populacional e da demanda por alimentos e insumos agrícolas, podendo ser fonte de carboidratos, proteínas e lipídeos para alimentação e suplementação humana e animal (GAROFALO et al., 2022; KUSMAYADI et al., 2021; VIEIRA et al., 2021).

Além disso, a utilização de microalgas na dieta humana também é investigada com relação a possíveis benefícios à saúde. Estudos reportam que a suplementação de *Spirulina Platensis* em uma dosagem de um grama por dia foi eficaz na regulação do peso, redução de apetite e dos índices de colesterol (GROSSHAGAUER; KRAEMER; SOMOZA, 2020; ZEINALIAN et al., 2017). Outrossim, a *Spirulina Platensis* é um agente promissor como alimento funcional para o controle do diabetes (LEE et al., 2008).

Com o supracitado cenário de aumento populacional, outra demanda crescente é a diversificação da matriz energética global. Nesse contexto, as microalgas possuem um grande potencial para a produção de biocombustíveis, principalmente quando comparadas à culturas terrestres convencionais, por não depender de solo fértil para plantio e atuarem como sequestradoras de CO₂ da atmosfera (JAVED et al., 2019; SAJJADI et al., 2018). O biodiesel produzido por meio das microalgas não apresenta grandes diferenças em relação ao produto oriundo de plantas oleaginosas, visto que é produzido a partir do processo de transesterificação dos triglicerídeos presentes no óleo, assim como feito quando o óleo é extraído de plantas (LIRA et al., 2012).

Algumas espécies de microalgas apresentam excelentes performances fotossintéticas, alta produtividade de biomassa e considerável resistência à exposição a águas residuárias e salobras (JAVED et al., 2019; RODRÍGUEZ-PALACIO et al., 2022). Por isso, diversos estudos investigam a aplicação de microalgas no tratamento de águas residuárias (HEREDIA FALCONÍ et al., 2021; NICODEMOU; KALLIS; KOUTINAS, 2023; ROCHA et al., 2019). A grande vantagem dessa utilização é o fato de que, além de realizar o tratamento do resíduo

industrial e/ou doméstico, há a geração de produtos com valor agregado e custo reduzido, como lipídeos para produção de biodiesel, bio-óleo, biogás etc. (EMALYA et al., 2023; LI; LI; HO, 2022; RODRÍGUEZ-PALACIO et al., 2022).

3.2. Tanques para cultivo de microalgas

O cultivo de microalgas pode ser realizado em sistemas abertos e fechados. No caso dos sistemas abertos, em linhas gerais, tratam-se de lagoas de baixa profundidade, tanques e *open raceways ponds* (ORP). Os sistemas fechados são amplamente conhecidos como fotobiorreatores. Um exemplo de reator fechado pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 1 – Exemplo de cultivo de microalgas em fotobiorreatores fechados.



Fonte: (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2014)

Os sistemas fechados, denominados fotobiorreatores, são sistemas nos quais o meio de cultivo fica isolado do ambiente externo. Nesses sistemas, as microalgas são cultivadas no interior de estruturas, como tubos ou placas transparentes, que permitem a entrada de luz. Há uma entrada de nutrientes, uma saída para extração de biomassa e um sistema de propulsão, que promove força motriz para o escoamento, como bombas ou aeradores (PRUVOST; POTTIER; LEGRAND, 2006). Nos casos nos quais o fotobiorreator utiliza a luz solar, há também a necessidade de sistemas de arrefecimento do meio de cultivo, visando controle de temperatura.

Mesmo que os custos de construção e operação de um fotobiorreator sejam mais elevados do que os de tanques abertos, o impacto do custo inicial pode ser amortizado, em médio ou longo prazos, devido à maior eficiência e os maiores rendimentos em relação à extração de óleo, que são garantidos pela possibilidade de melhor controle da cultura oferecida

pelos reatores fechados, além da operação com maiores concentrações (CHIARAMONTI et al., 2013; MOLINA GRIMA et al., 2003). O maior custo de construção e operação dos sistemas fechados se deve ao fato da maior necessidade de materiais para fechar o reator e também à necessidade de instrumentação do reator para controle dos parâmetros como temperatura e pH.

Por sua vez, os sistemas abertos possuem como vantagem seu menor custo de instalação, produção e operação. Apesar disso, há grande dificuldade em controlar parâmetros como a temperatura, pH, intensidade luminosa e concentração de oxigênio no meio de cultura.

Há ainda a ocorrência de evaporação e conseqüente redução da coluna de líquido, além do constante risco de contaminação da cultura com outros agentes vindos do ambiente externo, como fezes de pássaros ou outras espécies de microalgas que competem por nutrientes com a cultura e podem também apresentar toxicidade e serem prejudiciais à produtividade do tanque (HAN et al., 2019; KUSMAYADI et al., 2020). Esses fatores fazem com que o desempenho do cultivo seja variável, além de consideravelmente dependente da localização geográfica e, com exceção das regiões tropicais (como no caso do Brasil), seja limitada apenas aos meses mais quentes.

3.2.1. Open Raceway Ponds (ORP)

Os tanques do tipo *raceway*, ou *open raceway ponds* (ORP) são comumente utilizados para cultivo de microalgas desde a década de 1950. Tratam-se de dois canais retos paralelos, separados por uma ilha ou placa central e conectados nas duas extremidades do tanque por dois canais em curva (Figura 2).

As dimensões de um ORP podem variar de acordo com a escala de produção, contudo, é usual que a profundidade da coluna de fluido esteja entre 0,15 e 0,4 m (KUSMAYADI et al., 2020). Além disso, é recomendável, visando maior eficiência hidrodinâmica, que a razão entre o comprimento do tanque e a largura do canal seja maior que 10 (HADIYANTO *et al.*, 2012).

A Figura 2 exibe tanques do tipo *raceway* em operação de cultivo de microalgas em larga escala na empresa estadunidense Cyanotech Corporation.

Figura 2 – Exemplo de cultivo de microalgas em larga escala em tanques abertos na empresa Cyanotech Corporation.



Fonte: (CYANOTECH, 2023)

Nos últimos 15 anos, diversos trabalhos vêm estudando melhorias na geometria padrão dos ORP, principalmente com foco em diminuir a ocorrência de zonas de baixa velocidade e otimizar o escoamento de fluido no tanque (LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021). Nesse contexto, foram desenvolvidos estudos de modificação da ilha central. HADIYANTO *et al.* (2012) mostraram que é possível reduzir o percentual de zonas mortas em um tanque de cultivo a partir da utilização de aparatos de maior raio nas extremidades da ilha central, bem como a utilização de uma placa central de maior espessura.

Esses resultados são corroborados por estudo desenvolvido por INOSTROZA *et al.* (2021), que mostraram um menor percentual de zonas mortas em tanques construídos com placas defletoras e com ilhas centrais quando comparados aos tanques tradicionais, sem defletoras e com divisória central de placa simples. Outrossim, a literatura reporta uma diminuição de até 87% na perda de carga nas curvas de tanques construídos com ilhas centrais de alto raio de curvatura comparativamente aos tanques tradicionais (LIFFMAN *et al.*, 2013), bem como uma redução de 6,7 para 0,2% no percentual de zonas mortas, a partir da inserção de três placas defletoras nas curvas (SOMPECH; CHISTI; SRINOPHAKUN, 2012).

A alteração do comprimento de canal do tanque foi avaliada por LIMA; MARINHO; MORAIS (2021). Os resultados mostraram que tanques com canais estreitos e longos tendem a ter um melhor desempenho hidrodinâmico, apresentando uma menor potência requerida por área de cultivo e maior uniformidade dos perfis de velocidade de escoamento.

A alteração da distância entre o fundo do tanque e a roda de pás foi avaliada por PANDEY; PREMALATHA (2017). Os resultados indicam que a distância ideal entre as pontas das pás e o fundo do tanque está na faixa de 5 a 8 cm para uma coluna de fluido de 25 cm. Além

disso, foi realizada avaliação das razões de comprimento (L) por largura do canal (W) do tanque. Com uma rotação de 20 rpm, foram reportadas condições adequadas para o cultivo de microalgas em um tanque com valor de 6 para a razão de L/W. Contudo, razões baixas não são recomendadas, visto que uma agitação severa (necessária para agitar tanques de baixa razão) pode causar prejuízos às células da cultura. Os resultados de HADIYANTO *et al.* (2012) concluíram que a razão ideal é acima de 10.

Estudo realizado CHIARAMONTI *et al.* (2013) propôs a alteração da altura de coluna de fluido e concluiu que a redução de 20 cm para 5 cm foi benéfica para a produtividade do cultivo, bem como para a redução da potência consumida no processo.

3.3. Sistemas de agitação

No cultivo de microalgas em tanques *raceway*, um importante fator para o sucesso da cultura é o aspecto hidrodinâmico promovido pela agitação do fluido (HADIYANTO *et al.*, 2012). Para que o metabolismo celular funcione de modo a aumentar a produtividade do processo é preciso que o ambiente seja controlado de forma que a célula tenha adequado acesso aos nutrientes e à luz necessária para que ocorra a fotossíntese (LIRA *et al.*, 2012).

Contudo, em um *raceway*, a luminosidade decai exponencialmente a partir do espelho d'água iluminado pela luz solar (ROSELLO SASTRE *et al.*, 2007), sendo que a luz é dispersada e absorvida pelos pigmentos das células da parte superior, causando um gradiente de luz no tanque. Além disso, a sedimentação das células no meio de cultura forma zonas mortas que causam sombras nas camadas inferiores, diminuindo a incidência de luz nas células mais ao fundo do tanque e funcionando como potenciais zonas de formação de toxinas prejudiciais à cultura (HADIYANTO *et al.*, 2012).

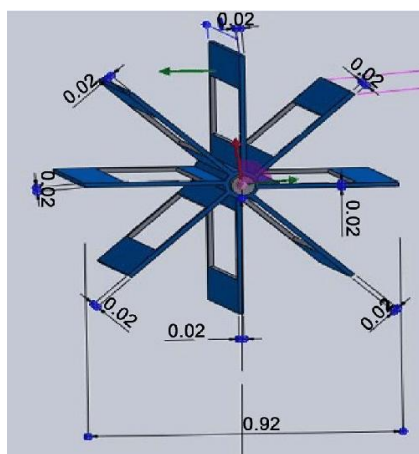
Dessa maneira, a instalação de um sistema de agitação no *raceway* é primordial para evitar a decantação das microalgas no fundo do tanque, a formação de zonas mortas e a não homogeneização dos nutrientes no meio fluido, além de evitar formação de sombras devido à sedimentação e atuar para que as microalgas circulem verticalmente e tenham todas condições para realizar fotossíntese e entregar quantidades suficientemente vantajosas de produtos para o processo (PRUVOST; POTTIER; LEGRAND, 2006). Esse sistema de agitação deve promover um escoamento turbulento, que possibilita a mistura vertical dentro do tanque.

Do ponto de vista energético, o sistema de agitação trás impactos nos custos de produção, visto que toda a energia de movimentação do meio de cultura provém do sistema de acionamento da agitação (LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021). *Raceways* com melhor eficiência energética viabilizam a utilização de sistemas *off-grid*, ou seja, não conectados à rede

de energia, melhor aplicáveis ao cultivo no campo. Esse é um fator importante, uma vez que o custo com transmissão de energia pode ser um fator proibitivo para a implantação de projetos de grande porte de fazendas de cultivo de microalgas em tanques abertos. Além disso, ainda se busca por um processo de extração das microalgas que seja mais barato e rentável, de forma que melhorias no sistema de cultivo aumentam a margem de trabalho na etapa de extração (MOLINA-MIRAS et al., 2019).

O mecanismo de agitação mais difundido na operação de tanques do tipo *raceway* é a roda de pás (*paddlewheel*), que é exibido na Figura 3. Ela funciona como uma hélice, movendo a solução do tanque de cultivo, almejando garantir uma mistura homogênea e uma distribuição adequada de luz e nutrientes para as microalgas.

Figura 3 – Geometria de uma roda de pás para agitação de um cultivo de microalgas.



Fonte: (SINGHA; KUMAR DEB; SHAHRIAR, 2017)

Apesar de o sistema de agitação mais utilizado em tanques de microalgas ser o *paddlewheel*, sistemas inovadores vêm surgindo devido à necessidade de melhoria na eficiência energética do processo de cultivo de microalgas, como sistemas de agitação por jatos de água e jatos de ar comprimido (ELTANAHY et al., 2018) e aplicação de impelidores marítimos (CHIARAMONTI et al., 2013).

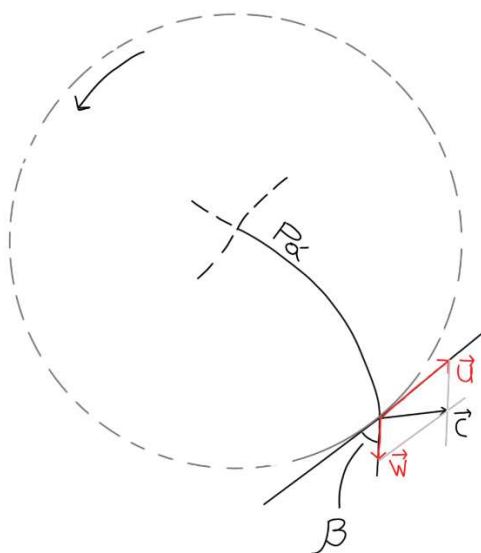
Nos casos de utilização da roda de pás, a relação do sistema de agitação com a característica de escoamento do fluido está intimamente ligada à geometria do impelidor. A variação de fatores geométricos, como formato das pás, quantidade de pás e ângulo construtivo das pás, provoca alteração nos perfis de escoamento, na turbulência gerada e, consequentemente, na produtividade de microalgas e no gasto energético do sistema de agitação do *raceway* (HREIZ et al., 2014).

Dessa forma, fica evidente a importância das características geométricas do sistema de agitação no processo de cultivo de microalgas. A otimização da geometria do *paddlewheel*

representa uma oportunidade de tornar o cultivo de microalgas em ORP cada vez mais viável, aumentando a produtividade do *raceway* e reduzindo o gasto energético por unidade de massa de produto gerado.

A geometria da roda de pás tem sido estudada no sentido de variar o ângulo de fixação das pás no eixo motriz do *paddlewheel* (HREIZ et al., 2014; ZENG et al., 2016), variar o formato das pontas das pás (LI et al., 2014), avaliar a distância entre a ponta das pás e o fundo do tanque (PANDEY; PREMALATHA, 2017), avaliar a velocidade de rotação do eixo motriz (HUANG et al., 2015; INOSTROZA et al., 2021a; PANDEY; PREMALATHA, 2017) e avaliar o melhor posicionamento do sistema de agitação ao longo do tanque (PANDEY; PREMALATHA, 2017). Contudo, ainda há uma significativa lacuna no conhecimento em relação aos efeitos da geometria de pás nos aspectos fluidodinâmicos no *raceway*, principalmente no que se trata do ângulo construtivo da pá (β), que é o ângulo formado, no triângulo de velocidades da ponta de uma pá, entre o vetor velocidade relativa do fluido (\vec{w}) e o sentido negativo do vetor velocidade tangencial do fluido (\vec{u}), sendo essas as componentes do vetor velocidade absoluta do fluido (\vec{c}) ao sair da roda de pás, conforme exibido na Figura 4.

Figura 4 – Localização do ângulo construtivo β com relação aos vetores de velocidade tangencial, relativa e absoluta no triângulo de velocidades na ponta de uma pá.



Fonte: Autoria própria

A alteração do ângulo construtivo das pás altera, como consequência, a decomposição vetorial do vetor velocidade absoluta do fluido e o formato das pás, que se tornam mais convexas ao passo que esse ângulo é diminuído.

3.4. Aplicações de CFD no estudo de tanques

Em diversas aplicações industriais o fenômeno da turbulência é de extrema importância, principalmente em processos de mistura. A turbulência é a instabilidade do escoamento de um fluido, no qual, ao contrário dos escoamentos laminares, as camadas de fluido se sobrepõem durante o deslocamento (YUSOF et al., 2020).

Devido à complexidade do regime turbulento, ferramentas computacionais são utilizadas para entendimento dos escoamentos em reatores. As modelagens em CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*, ou seja, Dinâmica de Fluidos Computacional) auxiliam na melhoria do design de tanques, sistemas de agitação, definição do tempo de retenção hidráulico e entre outros parâmetros relevantes na construção e operação de um reator para cultivo de microalgas (RANGANATHAN et al., 2022).

Assim, diversos estudos têm utilizado CFD para modelar o escoamento turbulento em *raceways*. Estudo realizado por Inostroza et al. (2021) investigou, para 4 faixas de rotação, a performance de tanques tradicionais comparados à tanques modificados com placas defletoras nas curvas e com uma maior área da ilha central. O resultado obtido via CFD identificou o design com placas defletoras como o mais adequado para a produção de microalgas, do ponto de vista da dinâmica de fluidos.

Estudo desenvolvido por Huang et al. (2015) investigou o efeito da inserção de placas defletoras nos secções retas e curvas do tanque, visando determinar o efeito dessas modificações na velocidade vertical do fluido. O trabalho concluiu que a aplicação dessas placas defletoras possui grande potencial no aumento da eficiência do tanque.

A posição do agitador no tanque foi estudada por Pandley e Premelatha (2017). Os autores concluem que o melhor posicionamento da roda de pás é nas proximidades das curvas, em comparação ao posicionamento no centro do canal. Além disso, concluem que o ganho em capacidade de agitação obtido pela inserção de um segundo *paddlewheel* no tanque não é suficiente para que seja vantajoso, visto que o gasto energético é duas vezes maior.

Estudo realizado por Zeng et al. (2016) concluiu que a aplicação de pás inclinadas 15° com relação à linha de simetria do eixo motriz do rotor apresentam melhor eficiência de agitação para um mesmo consumo energético quando feita a comparação com as rodas de pás convencionais.

Ainda no que diz respeito à roda de pás, Hreiz et al. (2014) concluíram que o desalinhamento das pás no eixo do *paddlewheel* não influencia significativamente as velocidades médias de escoamento no tanque. Porém, essa alteração na montagem das pás pode

melhorar a eficiência de mistura e possibilita uma diminuição de cerca de 14% no gasto energético para movimentação da roda de pás.

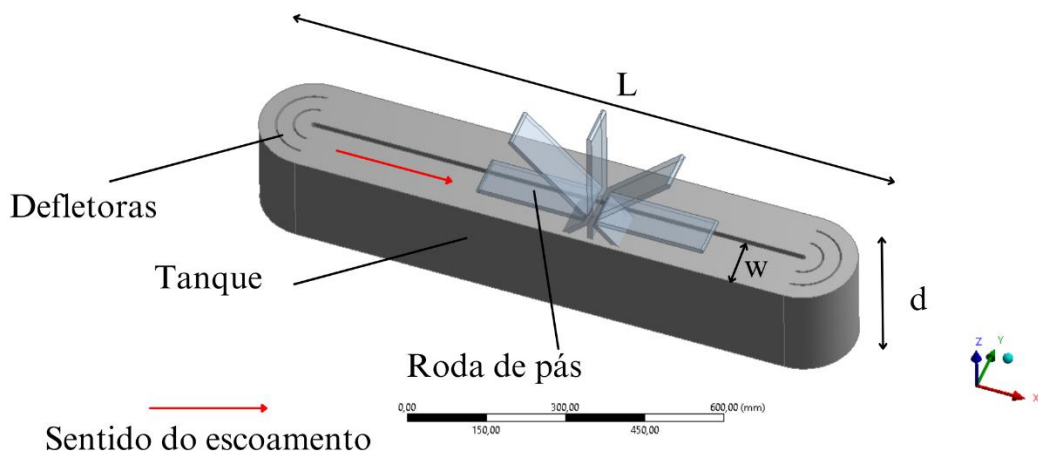
Ainda que muitos estudos acerca do uso de CFD para modelar tanques para cultivo de microalgas estejam disponíveis na literatura (ALI; CHEEMA; PARK, 2015; HADIYANTO *et al.*, 2012; KUSMAYADI *et al.*, 2020; LIFFMAN *et al.*, 2013a; LIMA; MARINHO; MORAIS, 2021; PARK; LI, 2015; PRUSSI *et al.*, 2014; SAWANT *et al.*, 2019; XU; LI; WALLER, 2014; YANG *et al.*, 2016), ainda não foi abordada a investigação da variação do ângulo construtivo da pá (β).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Modelo de simulação

As dimensões do modelo priorizaram a ideia de um tanque de bancada de laboratório, de pequena escala, ainda assim, respeitando a métrica de razão L/W de no mínimo 10 (HADIYANTO *et al.*, 2012), sendo W a largura do canal e L o comprimento do tanque, conforme exibido na Figura 5. Foi definido um comprimento L de 1,2 m, uma largura W de 0,1 m e uma profundidade de coluna de fluido (d) igual a 0,2 m.

Figura 5 – Indicação das dimensões L (comprimento), W (largura do canal) e d (profundidade do cultivo) na geometria do tanque.



Fonte: Autoria própria

Foram utilizados modelos de roda com três diferentes quantidades de pás (q), sendo eles com 4, 6 e 8 pás. Além disso, para todos os casos, o diâmetro da roda de pás foi 460 mm. O eixo da roda de pás foi posicionado a 50 mm da superfície superior do fluido, de forma que se obteve uma distância não varrida pela roda de pás de 10% da coluna de fluido. A distância entre

a borda das pás e a parede lateral do tanque foi definida como 10 mm em ambos os lados e em todos os casos. Esses parâmetros foram escolhidos de forma a maximizar a interface da roda de pás com o fluido, visando uma maior eficiência de mistura (CHIARAMONTI et al., 2013).

Foram inseridas duas placas defletoras em cada borda do tanque, baseando-se nos resultados obtidos por Huang et al. (2015), que mostram que a aplicação desses aparatos proporciona escoamento mais uniforme e com menores perdas de carga nas curvas do tanque. A espessura de 3 mm das placas defletoras foi definida baseando-se principalmente na disponibilidade de placas de acrílico dessa dimensão no mercado, visando maior facilidade na construção do protótipo de tanque. A escolha do acrílico como material foi feita para facilitar a visualização do fluido no interior do tanque, por ser um material translúcido, resistente e de mais fácil conformação mecânica que o vidro.

Foram testadas três inclinações para as pás (45° , 60° e 90°) e quatro velocidades de rotação (13, 15, 17 e 19 rpm). As velocidades de rotação a serem testadas foram definidas a partir de testes preliminares, que foram feitos visando com que o fluido no tanque tivesse velocidades médias de escoamento similares às encontradas na literatura. Dessa forma, para avaliar os parâmetros de ângulo construtivo, quantidade de pás e velocidade de rotação, foram desenvolvidos 36 modelos numéricos para simulação, os quais foram organizados e serão chamados ao longo desse estudo de Caso 1 a Caso 36, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das variáveis chave dos 36 casos avaliados

Caso	Rotação (rpm)	q	β	Caso	Rotação (rpm)	q	β
1	13	4	45°	19	17	4	45°
2			60°	20			60°
3			90°	21			90°
4		6	45°	22		6	45°
5			60°	23			60°
6			90°	24			90°
7		8	45°	25		8	45°
8			60°	26			60°
9			90°	27			90°
10	15	4	45°	28	19	4	45°
11			60°	29			60°
12			90°	30			90°
13		6	45°	31		6	45°
14			60°	32			60°
15			90°	33			90°
16		8	45°	34		8	45°
17			60°	35			60°
18			90°	36			90°

Fonte: Autoria própria

4.1.1. Geração da malha

O tanque foi dividido em dois domínios computacionais: a roda de pás e o tanque. A partir do modelo geométrico elaborado no ambiente do *Ansys Design Modeler*, a malha foi gerada pelo método *Sweep*. Essa metodologia de geração de malha foi escolhida visando uniformizar os elementos da malha.

Foi realizado teste de independência de malha. O objetivo desse teste foi identificar a sensibilidade dos resultados obtidos pelo modelo de simulação computacional para o nível de refinamento da malha. Dessa forma, pôde-se utilizar uma malha suficientemente refinada, sem que o custo computacional fosse demasiadamente elevado. O teste levou em consideração seis classes de refinamento de malha, sendo eles A, B, C, D, E e F, exibidos na Tabela 2. Na geração pelo método *Sweep*, foram variados os parâmetros de geração de malha como número de divisões verticais e tamanho máximo dos elementos, de forma que se obtiveram as quantidades de nós exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade de nós para teste de independência de malha.

Malha	Quantidade de nós
A	75.281
B	191.605
C	216.064
D	293.753
E	437.209
F	472.873

Fonte: Autoria própria

Foi realizada a análise de variância ANOVA para os valores de velocidade média ao longo de uma linha na secção reta do canal do lado oposto à roda de pás, onde a variabilidade de velocidades é menor, devido a maior distância do propulsor. O teste objetivou identificar variações significativas entre as médias de velocidade em cada uma das classes de malha testadas. A malha escolhida foi aquela a partir da qual a variação da velocidade média ao longo da linha deixou de ser significativa.

4.1.2. Definições de setup

4.1.2.1. Condições de contorno

Foi utilizado o método de corpo imerso para simular o movimento rotativo das pás. Esse método foi escolhido devido à sua ampla utilização para estudo de fenômenos envolvendo corpos sólidos em interação com líquidos e gases. Dessa forma, as pás foram consideradas como um domínio sólido, enquanto o tanque foi um domínio líquido (água).

A condição de parede *scalable* foi utilizada visando obtenção de resultados mais parecidos com a realidade nas regiões próximas às superfícies limítrofes do tanque, visto que essa condição ajusta a representação das condições de contorno nas paredes, equilibrando a acurácia da simulação e o desempenho computacional. Para a superfície superior do tanque, foi escolhida a condição de parede não deslizante, visto que essa não permite saída do fluido através da superfície e não inclui atrito e formação de camada limite. Devido à periodicidade do escoamento gerado pela roda de pás, foi implementada uma simulação em regime transiente no ANSYS CFX.

O modelo padrão k- ϵ foi utilizado para descrever a turbulência do escoamento no tanque. Trata-se de um modelo de duas equações diferenciais parciais de transporte, que fornece

uma descrição geral da turbulência do escoamento. Esse modelo foi selecionado devido à estabilidade de cálculo e à recorrente utilização do mesmo para simulação de tanques de cultivo de microalgas (HADIYANTO et al., 2012; HUANG et al., 2015; PARK; LI, 2015; YUSOF et al., 2020), além da possibilidade de utilização nas regiões próximas e mais distantes das paredes sem a necessidade de ajuste das constantes do modelo (LAUNDER; SPALDING, 1974) e da ampla utilização desse tipo de modelo, com diversas aplicações e melhorias ao longo dos anos (ARGYROPOULOS; MARKATOS, 2015).

Esse modelo é descrito pelas equações a seguir.

$$v_t = C_\mu \cdot \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (1)$$

em que:

v_t : viscosidade cinemática turbulenta ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

C_μ : constante do modelo = 0,09;

k : energia cinética turbulenta (J kg^{-1}).

ε : taxa de dissipação da turbulência ($\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$);

A Equação (2) descreve a energia cinética turbulenta.

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(v + v_t)}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \varepsilon + \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

em que:

t : tempo (s);

\bar{u}_j : componente da velocidade média na direção j (m s⁻¹);

\bar{u}_i : componente da velocidade média na direção i (m s⁻¹);

ν : viscosidade cinemática (m² s⁻¹);

σ_k : número de Prandtl para k ($\sigma_k = 1,0$);

τ_{ij} : tensor de tensão de Reynolds (Pa).

A Equação (3) descreve a taxa de dissipação da turbulência.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{(\nu + \nu_t)}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

em que:

σ_ε : número de Prandtl para ε ;

C_{ε_1} : constante de modelo ($C_{\varepsilon_1} = 1,44$);

C_{ε_2} : constante de modelo ($C_{\varepsilon_2} = 1,92$).

4.1.2.2. Parâmetros temporais

O tempo total da simulação foi definido como 16 segundos. Essa definição se justifica pela necessidade de estabilização do escoamento, ou seja, as análises a serem desenvolvidas pelo presente estudo consideram a fase de escoamento na qual a partida da roda de pás já está completamente encerrada.

O passo de tempo é um importante parâmetro para a análise transiente, visto que é o incremento de tempo utilizado para o cálculo numérico na simulação. O passo foi determinado para cada caso, a depender da rotação do *paddlewheel* e da quantidade de pás, conforme a Equação (4).

$$ts = \left(\frac{2}{N \cdot q} \right) \quad (4)$$

em que:

ts: passo de tempo;

N: rotação da roda de pás (rpm);

q: quantidade de pás no *paddlewheel*.

A partir dessa determinação, o período para cada um dos casos foi de 30 passos de tempo. Por definição, esse estudo tratou como primeira etapa de submersão da pá o quarto de cilindro formado pela trajetória do *paddlewheel* entre a entrada da pá no fluido e 50% da sua trajetória até a saída da mesma pá da região fluida, sendo os outros 50% dessa trajetória denominados segunda etapa de submersão da pá.

Foi realizado teste de independência, sendo que o número de Courant foi utilizado para controle da discretização temporal, visto que é recomendado que esse valor permaneça abaixo de 1. A Equação (5) é utilizada para o cálculo do número de Courant.

$$C = ts \cdot \sum_{i=1}^z \frac{u_{x_i}}{\Delta_{x_i}} \quad (5)$$

em que:

z: número de dimensões do problema;

u_{x_i} : magnitude da velocidade na dimensão z;

Δ_{x_i} : intervalo de comprimento da malha na dimensão z.

4.2. Avaliação da mistura

4.2.1. Índice de uniformidade

A partir da metodologia utilizada por Terashima et al. (2008), foi determinado, para cada caso, o índice de uniformidade (IU) da mistura no tanque. Conforme observado na Equação (6), quanto menor o valor de IU, mais homogênea é a mistura.

$$IU = \frac{\sum_{i=1}^s (|v_i - \bar{v}| \cdot V_i)}{\sum_{i=1}^s (v_i \cdot V_i)} \quad (6)$$

em que:

IU: índice de uniformidade;

s: número de células da malha;

v_i : velocidade na célula i (m s^{-1});

\bar{v} : velocidade média do escoamento (m s^{-1});

V_i : volume da célula i (m^3).

A partir do cálculo da variável V_i , observou-se que cerca de 80% das células possuem volume similar, com razão volumétrica menor que 1,2. Dessa maneira, considerou-se V_i como um valor constante.

4.2.2. Índice de mistura vertical

Tomando como referência a metodologia de quantificação da mistura vertical de PANDEY; PREMALATHA (2017), o comportamento do escoamento foi avaliado, para cada caso, em termos Índice de Mistura Vertical (IMV), descrito pelas Equações (7) e (8):

$$IMV = \frac{W_a}{U_a} \quad (7)$$

$$W_a = \sum_{i=1}^p \frac{|W_p|}{S} \quad (8)$$

em que:

IMV: índice de mistura vertical;

W_a : velocidade vertical média ($m s^{-1}$);

U_a : velocidade média de escoamento no sentido da corrente ($m s^{-1}$);

W_p : velocidade vertical em cada nó da malha ($m s^{-1}$);

p : nó da malha;

S : número de nós da malha.

4.2.3. Percentual de zonas mortas

A partir do volume de fluido com velocidade igual ou menor que $0,1 m s^{-1}$ (SAWANT *et al.*, 2019) foi determinado, para cada caso, o percentual de zonas mortas ($\% Z_m$) tomando como referência o modelo adotado por Ali, Cheema e Park (2015), por meio da Equação (9):

$$\%Z_m = 1 - \left(\frac{V - V_m}{V} \right) \quad (9)$$

em que:

$\% Z_m$: percentual de zonas mortas;

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

V: volume total de fluido no ORP (m³);

4.2.4. Potência consumida média teórica

A potência consumida teórica (P_{ct}) foi obtida na etapa de pós-processamento no *Ansys CFX*. Foi utilizada a função “torque_y” para obter o momento aplicado nas pás do impelidor. Dessa forma, calculou-se a potência instantânea teórica a partir da Equação (10):

$$P_{it} = \frac{30 \cdot \omega \cdot M}{\pi} \quad (10)$$

em que:

P_{ct} : potência instantânea teórica (W);

M : momento resultante na pá (N.m);

ω : velocidade angular (rad s⁻¹).

Com os valores de potência instantânea teórica, foi possível traçar a curva de potência instantânea teórica *versus* tempo para cada um dos 36 casos. A partir de então calculou-se a potência consumida média teórica por cada roda de pás, em cada um dos 36 casos, a partir da Equação (11):

$$\overline{P_{ct}} = \frac{1}{\phi} \cdot \sum_{j=1}^{\phi} (P_{it_j}) \quad (11)$$

em que:

$\overline{P_{ct}}$: potência consumida média teórica (W);

P_{it_j} : potência instantânea teórica no instante j (W);

ϕ : número total de dados temporais.

4.2.5. Indicador de desempenho de mistura

As análises de cada um dos índices %Z_m, IMV e IU separadamente permitem a quantificação da capacidade de agitação do sistema. Entretanto, a potência consumida é um parâmetro primordial para o sistema. Assim, com o intuito de correlacionar os três parâmetros

anteriores com a potência consumida, foi criado o indicador de desempenho de mistura (IDM), definido pela Equação (12) e calculado para os 36 casos:

$$IDM = \frac{IMV}{\%Z_m \cdot \overline{P}_{ct} \cdot IU} \quad (12)$$

em que:

IDM: Indicador de desempenho de mistura (W^{-1})

A partir do cálculo do IDM, foi definida qual a melhor configuração do sistema de agitação, ou seja, qual a quantidade de pás, a inclinação dessas e a rotação de trabalho mais adequada para uma agitação eficiente no tanque. Quanto maior o valor de IDM, melhor o sistema de agitação.

4.3. Validação experimental

Visando verificar a proximidade entre o modelo de simulação e a fenomenologia real do escoamento de fluido no tanque, foi realizada a etapa de validação experimental. Essa etapa consiste na prototipagem e operação de um tanque com as mesmas características geométricas do *raceway* modelado no ambiente virtual. A configuração que apresentou maior valor de IDM quando comparado aos demais casos teve sua geometria gerada por meio de uma impressora 3D.

4.3.1. Rotação crítica de sedimentação do cultivo de microalgas

A rotação mínima necessária para manter o cultivo de microalgas em suspensão no tanque foi avaliada experimentalmente. O tanque protótipo foi operado visando agitar uma cultura de microalgas extraída do tanque de cultivo do Laboratório de Biocombustíveis do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As microalgas foram retiradas do tanque no período final do cultivo, com intuito de minimizar as oscilações de concentração de biomassa e, como consequência, as características de sedimentação.

As zonas de provável sedimentação foram definidas a partir das ferramentas de visualização do *Ansys CFX Post*. Em uma dessas regiões do protótipo foram realizadas as medições de absorvância do meio. A cada 5 minutos foi retirada uma amostra, sendo que para cada amostra foi realizada uma triplicata. O tempo total de amostragem foi de 1 hora. Foi

utilizado um espectrofotômetro (THERMO SCIENTIFC, MULTISKAN GO, Estados Unidos) para mensurar a sedimentação das microalgas.

Utilizou-se o comprimento de onda de 750 nm. Esse comprimento de onda é utilizado para avaliar a quantidade de biomassa em um cultivo, minimizando a absorbância por pigmentação, e, com isso, diminuindo o erro em relação a quantidade de biomassa existente no cultivo (GRIFFITHS et al., 2011).

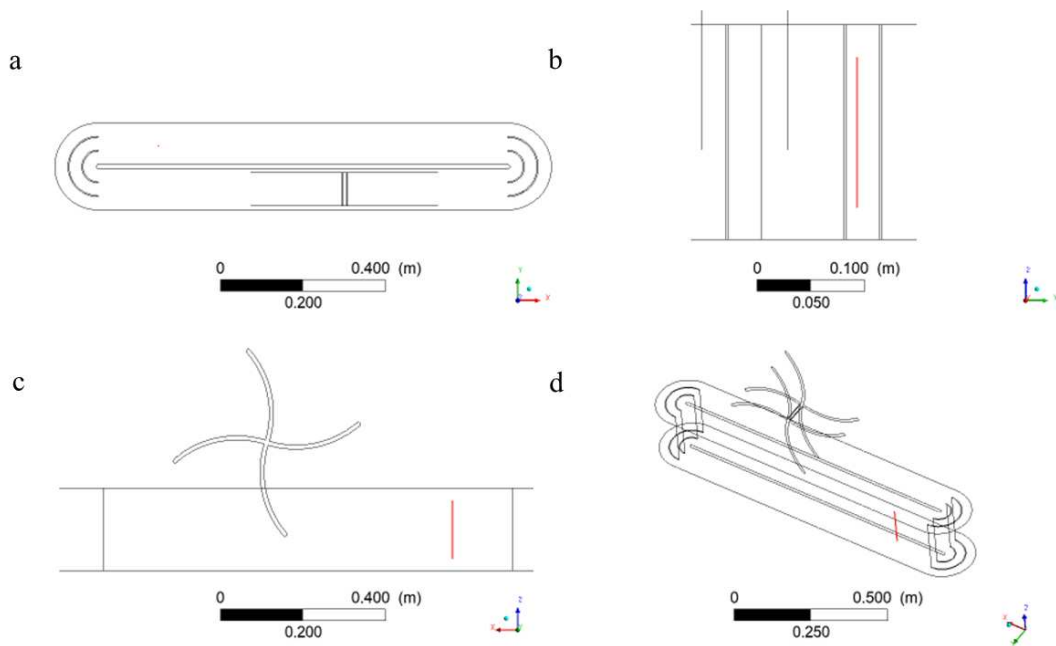
Os dados foram coletados em um mesmo ponto do tanque, ao passo que a rotação da roda de pás foi aumentada para cada coleta, iniciando em 13 rpm e sendo alterada com passo de 1 rpm.

Essa fase do experimento foi realizada para dois diferentes tipos de pás: pás retas e pás curvas, nas condições construtivas (quantidade de pás e ângulo β) com melhor desempenho no que diz respeito ao indicador IDM. Antes do início de cada experimento o tanque foi completamente agitado manualmente, visando obter uma condição de 100% agitado. Essa operação garantiu a possibilidade de uma comparação em termos percentuais entre todos os ensaios de absorbância realizados, visto a que a avaliação percentual elimina a variação da absorbância ao longo do tempo para variáveis como mortalidade de microalgas, aumento da concentração celular e aumento da concentração de pigmentos, por exemplo. Foi realizado controle de pH do meio, sendo este mantido entre 8 e 9, visando aumentar o potencial de sedimentação das microalgas.

4.3.2. Comparação das velocidades de escoamento

Visando validar as velocidades de escoamento obtidas nas simulações, foram realizadas medições no tanque protótipo. Foram determinados os pontos no segmento de reta A, conforme exibido na Figura 6. Os pontos de medição foram escolhidos em uma região do tanque no qual o escoamento foi mais uniforme e menos turbulento, uma vez que foi utilizado o medidor Mini Current Meter M1 (SEBA Hydrometrie), que mede a velocidade apenas em uma direção. O equipamento é exibido na Figura 7.

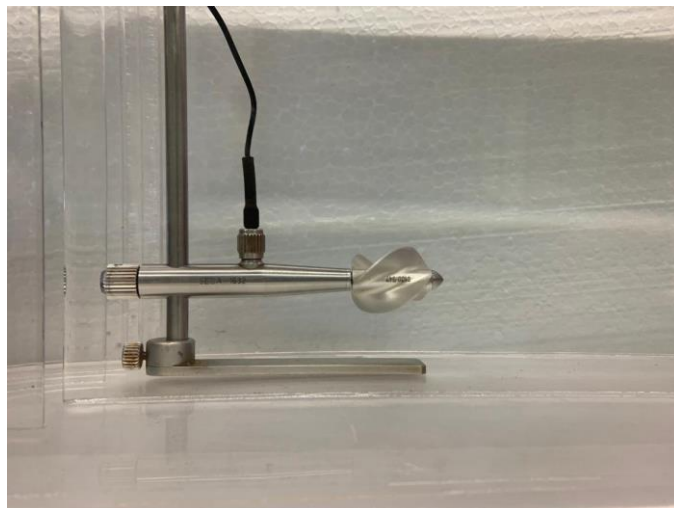
Figura 6 – Posição do segmento de reta \bar{A} no tanque nas vistas (a) superior; (b) frontal; (c) lateral; e (d) isométrica.



Fonte: Autoria própria

Foram determinados 6 pontos para medição e a Tabela 3 exhibe a altura de cada ponto com relação ao fundo do tanque, sendo todos os pontos na secção média do canal e a 14,6 cm do início das placas defletoras.

Figura 7 – Medidor de velocidade tipo rotor (molinete) utilizado para as medições de velocidades experimentais.



Fonte: Autoria própria

Tabela 3 – Posição dos pontos amostrais de velocidade de escoamento.

Ponto	Altura (cm)
1	3,0
2	5,8
3	8,6
4	11,4
5	14,2
6	17,0

Fonte: Autoria própria

O medidor foi posicionado nos pontos de medição e foram tomadas 10 medidas para cada um dos seis pontos. Foram realizadas medidas para as velocidades de rotação da roda de pás de 13, 15, 17 e 19 rpm. Essa fase do experimento foi realizada para dois diferentes tipos de pás: pás curvas e pás inclinadas, nas condições construtivas (quantidade de pás e ângulo β) com melhor desempenho no que diz respeito ao indicador IDM. Os valores obtidos foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey com 5% de significância.

A partir dos valores medidos, foi possível traçar o perfil de velocidades na secção do tanque e comparar os dados obtidos no escoamento real com aqueles oriundos da simulação numérica, para os mesmos pontos do tanque e do domínio computacional.

4.3.3. Comparação da potência consumida

A potência consumida pelo sistema de acionamento foi calculada a partir da medição da tensão (V) e da corrente (I). Para tal, foram utilizados dois multímetros digitais Minipa ET-2042, visando medições simultâneas dos dois parâmetros. As medições foram realizadas, para cada configuração de roda de pás e rotação, durante cinco revoluções completas da roda de pás. O tanque foi operado em duas condições de carga: cheio e vazio.

Os valores instantâneos de corrente e tensão foram utilizados para calcular a potência instantânea consumida a partir da Equação (13).

$$P_c = V.I \quad (13)$$

Em que:

V : Tensão (V)

I : Corrente elétrica (A)

O tanque foi operado com uma coluna de água de 0,2 m e, em sequência, operado vazio. A partir das potências instantâneas mensuradas para o tanque cheio e vazio, foi calculada a potência média para cada caso. Dessa forma, pôde-se subtrair a potência obtida com o tanque vazio do valor obtido com o tanque cheio. Esse procedimento foi realizado com o intuito de reduzir os impactos das perdas de potência por atrito dos componentes do motor e da transmissão mecânica, bem como o peso da roda de pás.

4.3.4. Visualização do perfil de escoamento

Para visualização do escoamento foi utilizada uma metodologia básica de mistura de aveia em flocos no tanque. Uma colher com 0,01 kg de aveia foi despejada na região à montante da roda de pás em plena operação. Uma câmera fotográfica foi posicionada com intuito de fotografar a operação do tanque durante o processo e gerar imagens a serem comparadas com os perfis extraídos do *Ansys CFX*.

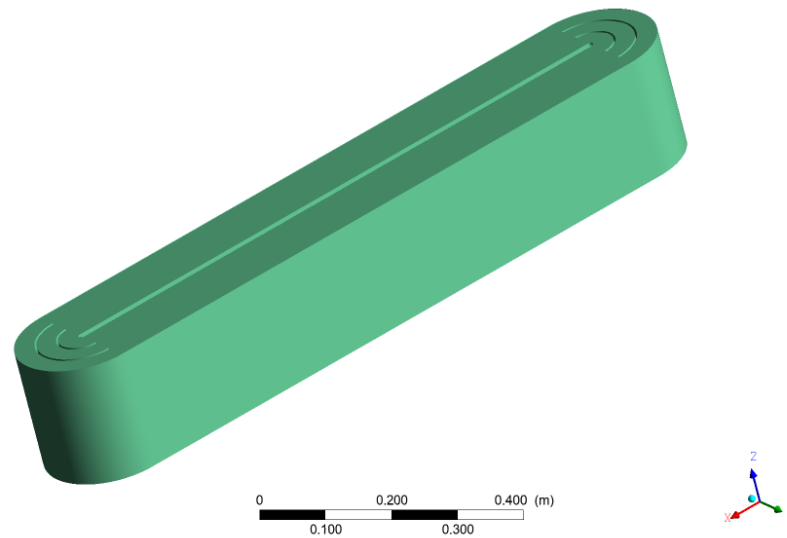
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Modelagem e simulação do escoamento em tanque *raceway*

5.1.1. Geometria do tanque

A geometria do tanque foi desenhada e padronizada para todos os 36 casos. A Figura 8 exibe o tanque criado no ambiente virtual do programa *Design Modeler*, disponível no pacote computacional ANSYS versão 2019. O volume total do tanque foi de 46,10 litros, para uma área superficial de 0,2305 m².

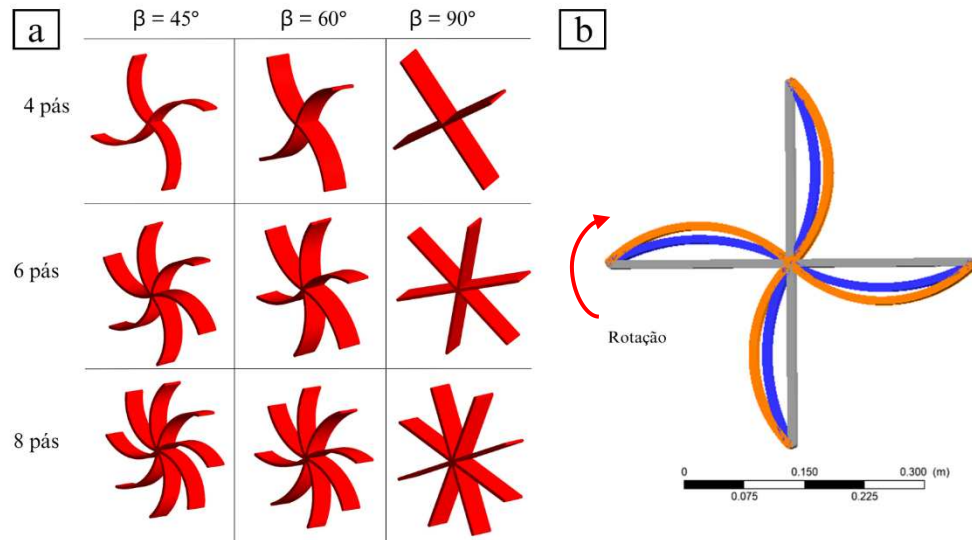
Figura 8 – Domínio computacional do tanque no ambiente do programa *Design Modeler* em vista isométrica.



Fonte: Autoria própria

As geometrias das pás foram desenhadas também no programa *Design Modeler*. Na Figura 9a estão apresentadas todas as configurações investigadas para as pás, combinando geometrias com 4, 6 e 8 pás com ângulos construtivos de 45° , 60° e 90° . A Figura 9b mostra as geometrias sobrepostas, em vista lateral, visando evidenciar a diferença dos ângulos construtivos. As pás com ângulos de 45° , 60° e 90° foram destacadas nas cores laranja, azul e cinza, respectivamente. Quanto menor o ângulo construtivo, maior a curvatura da pá em sua porção central.

Figura 9 – (a) Domínios computacionais das rodas com 4, 6 e 8 pás e ângulos construtivos de 45°, 60° e 90° em vista isométrica e (b) comparação dos ângulos construtivos no corte em vista lateral e com indicação do sentido de rotação do eixo.

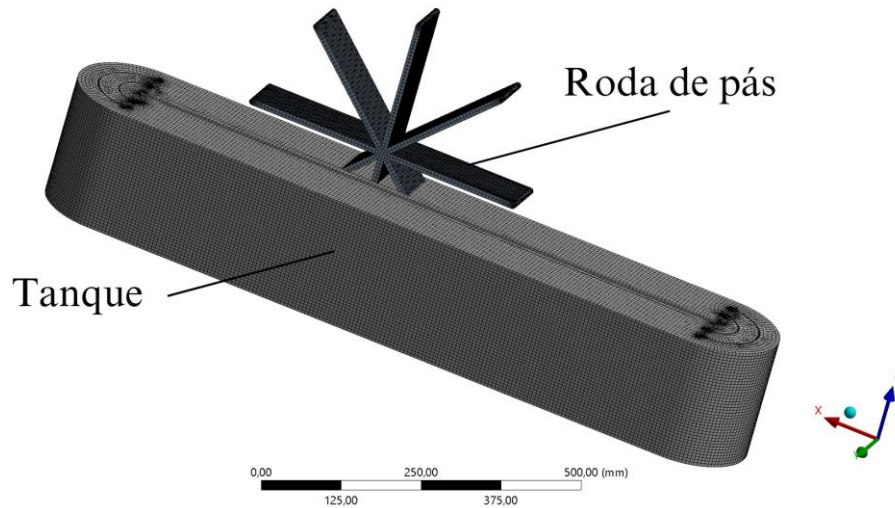


Fonte: Autoria própria

5.1.2. Geração da malha

A análise de variância feita para avaliar as malhas A, B, C, D, E e F apontou que ao menos um dos valores foi estatisticamente distinto, sendo então realizado o teste de *Tukey* (5% de significância) para a definição do nível de refinamento. O teste revelou que os resultados de velocidade média de escoamento ao longo do segmento de reta A (Figura 6) foram estatisticamente iguais para os casos D, E e F. Assim, observou-se que a variação da velocidade média deixou de ser significativa para malhas cujas arestas dos elementos foram menores que 6 milímetros, que corresponde a 40 divisões na direção vertical do tanque, sendo a malha D (Figura 10) adotada para a simulação dos modelos computacionais desenvolvidos. Devido à variação da geometria da roda de pás para cada caso, houveram variações nas quantidades de nós e elementos em cada caso, entretanto, todos os casos atingiram a independência do resultado com relação ao nível de refinamento de malha.

Figura 10 – Malha discretizada gerada no ambiente *Ansys* para o Caso 9 em vista isométrica, com 414.814 nós e 368.731 elementos.

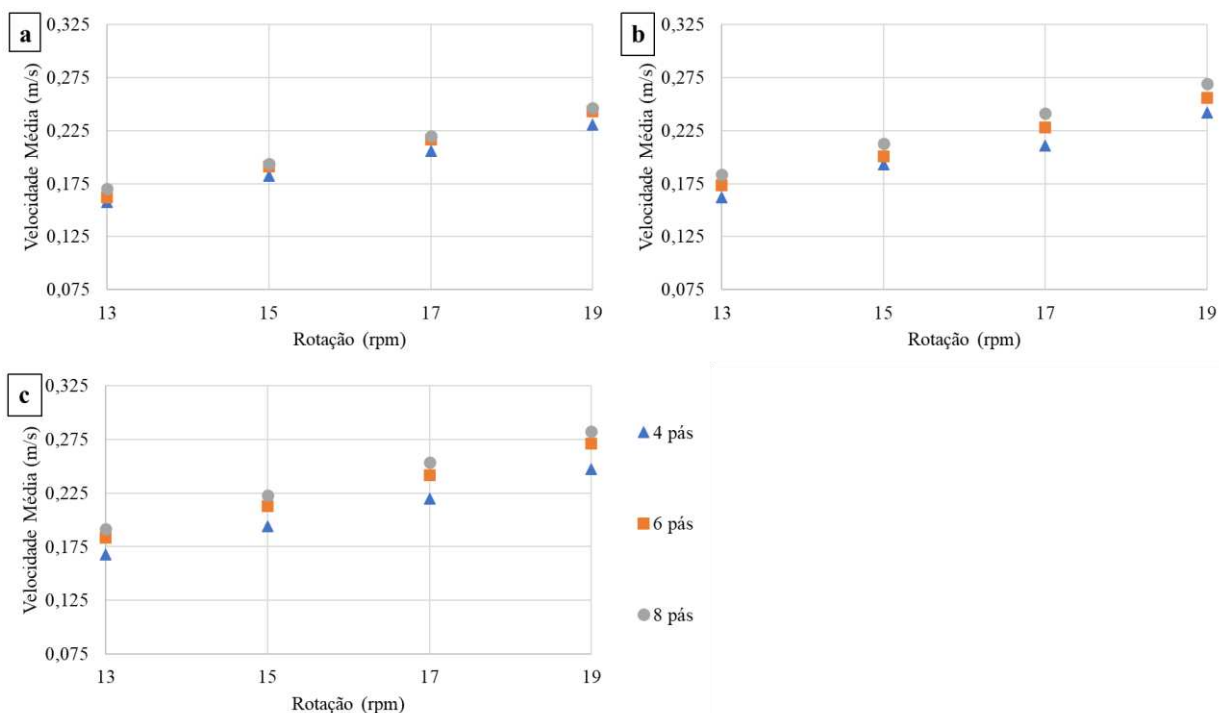


Fonte: Autoria própria

5.1.3. Velocidade média

Conforme exibido na Figura 11, para todos os 36 casos estudados via simulação numérica, os valores de velocidade média foram maiores para as rodas com 8 pás e menores para as rodas com 4 pás, para uma mesma rotação. As rodas com 6 pás produziram escoamentos com valores de velocidade intermediários em relação aos dois citados anteriormente. As pás são o corpo que transmite o momento para a massa fluída, ou seja, são a fonte motriz para o escoamento e, dessa forma, geram os perfis de velocidade. Assim, quanto maior a quantidade de pás, maior a energia transferida para o escoamento do fluído, o que explica as maiores velocidades de escoamento nos casos com as rodas dotadas de maior número de pás.

Figura 11 – Variação de velocidade média em função da rotação e da quantidade de pás para os ângulos construtivos de (a) 45°, (b) 60° e (c) 90°.

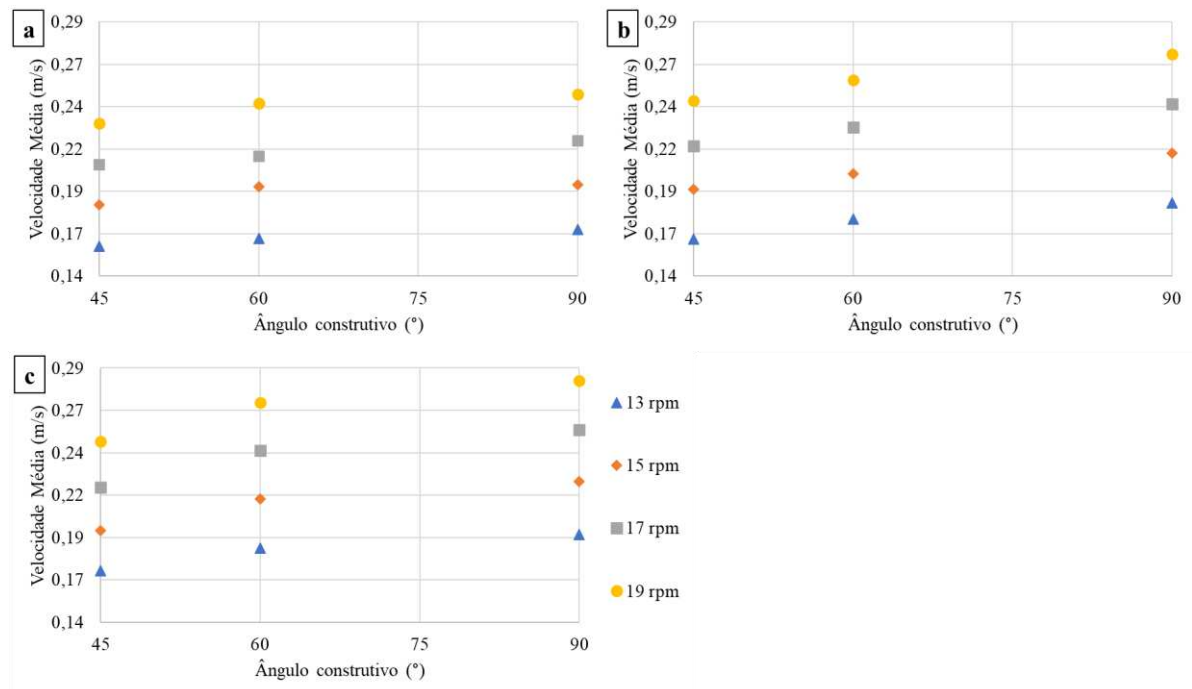


Fonte: Autoria própria

Outra tendência foi observada no que diz respeito às velocidades de escoamento: quanto maior a velocidade de rotação das pás, maior foi a velocidade média de escoamento do fluido no tanque. O aumento da velocidade de rotação representa um proporcional aumento da quantidade de energia aplicada ao sistema. Assim, essa energia é convertida para o escoamento da massa fluída a partir da ação das pás, justificando um escoamento mais veloz ao passo em que se aumentou a rotação do eixo motriz.

A velocidade média de escoamento foi também avaliada para a variação do ângulo construtivo da pá (Figura 12). Os resultados apresentados na Figura 12 corroboram a afirmação da ocorrência das maiores velocidades médias quando a operação do tanque foi feita em maiores rotações. Além disso, observou-se, em todos os 36 casos, que as pás retas, ou seja, com ângulo construtivo igual a 90°, apresentaram as maiores velocidades médias de escoamento quando comparadas aos ângulos de 60° e 45°, sendo que esse último apresentou as velocidades médias de escoamento mais baixas, para todos os casos.

Figura 12 – Variação da velocidade média em função do ângulo construtivo (β) para as rodas construídas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.



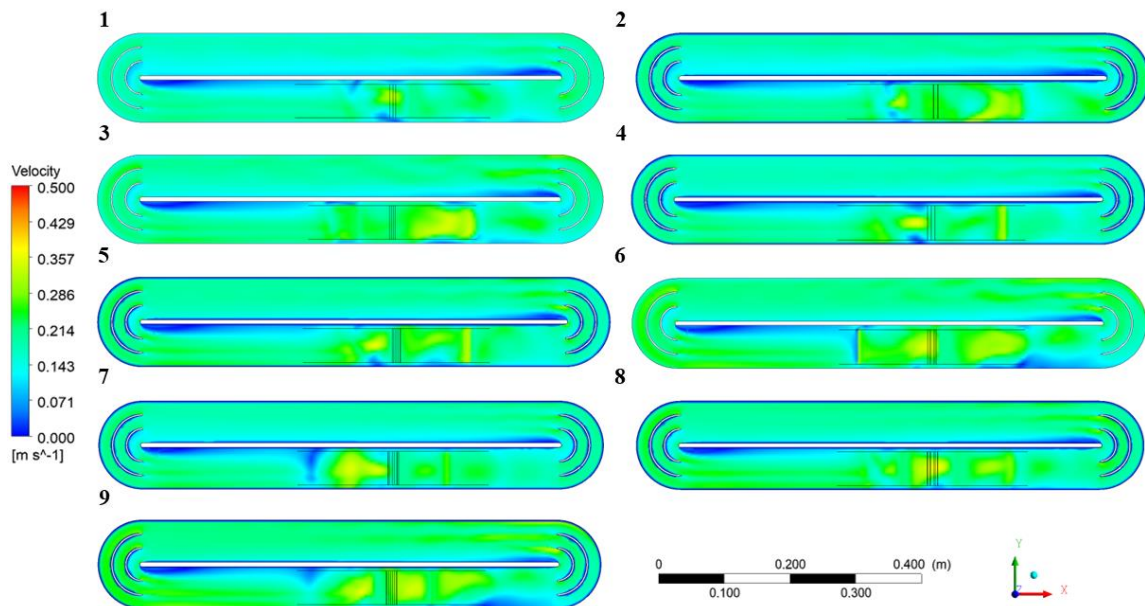
Fonte: Autoria própria

Nos casos em que o ângulo construtivo (β) foi igual a 90° , as pontas das pás permaneceram transferindo grande quantidade de energia para o fluido durante todo o tempo em que estiveram submersas na fase líquida. Enquanto isso, as pás com menor ângulo construtivo tiveram sua interação da ponta da pá com o fluido reduzida após o fim da primeira etapa de submersão da pá, devido ao menor ângulo entre a superfície da pá e a corrente de fluido no movimento ascendente. Dessa forma, as pás retas proporcionam um maior raio de ação sobre o fluido no sentido do escoamento, que, por sua vez, é diretamente proporcional à velocidade de escoamento na região fluída nas proximidades das pontas de pá, causando maiores velocidades médias de escoamento.

De forma geral, as velocidades médias de escoamento obtidas nas simulações numéricas foram similares aos valores médios encontrados na literatura. Foram reportadas velocidades médias de escoamento entre $0,10$ e $0,30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (CHIARAMONTI et al., 2013; KUSMAYADI et al., 2020), enquanto que no presente estudo as velocidades médias obtidas ficaram compreendidas entre $0,1575 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (velocidade de rotação de 13 rpm, 4 pás e β igual a 45°) e $0,2826 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (velocidade de rotação de 19 rpm, 8 pás e β igual a 90°), nos casos 1 e 36, respectivamente.

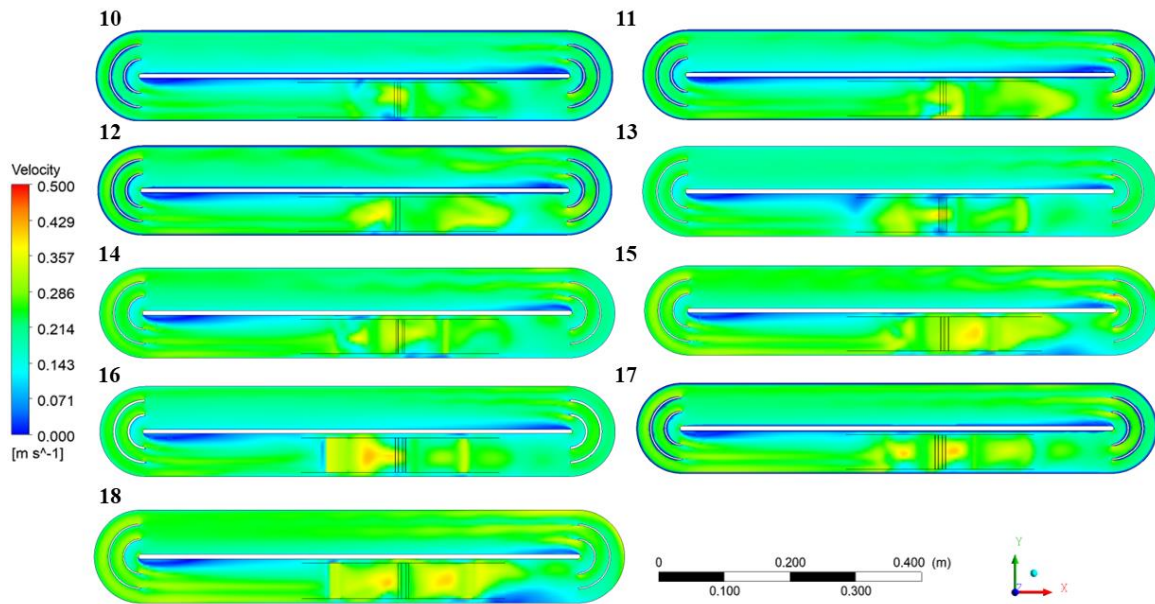
As Figuras 13, 14, 15 e 16 mostram a variação das velocidades do escoamento na secção média do domínio computacional do tanque, ou seja, à uma altura de 100 mm com relação ao fundo, para os casos 1 a 9, 10 a 18, 19 a 27 e 28 a 36, respectivamente. Dessa forma, cada uma das figuras exibe os casos cujas velocidades de rotação da roda de pás foram iguais. A escala de cores foi padronizada para as quatro imagens, variando entre 0,000 e 0,500 m s^{-1} , de forma com que as cores mais quentes representam maiores valores de velocidade. O fluido escoou no sentido anti-horário.

Figura 13 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 13 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.



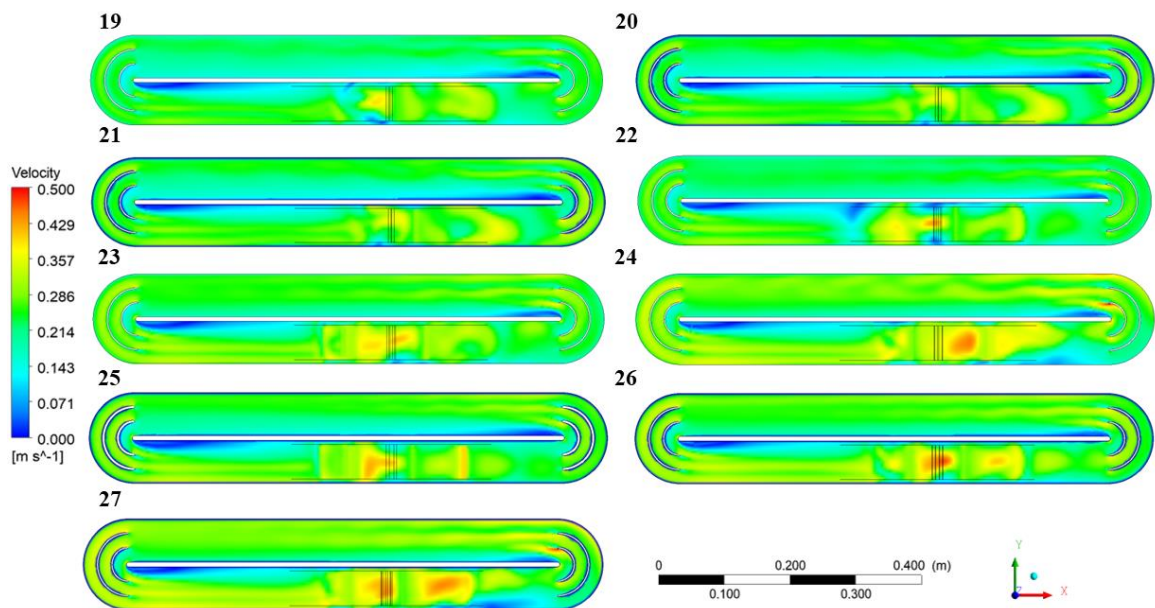
Fonte: Autoria própria

Figura 14 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 15 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.



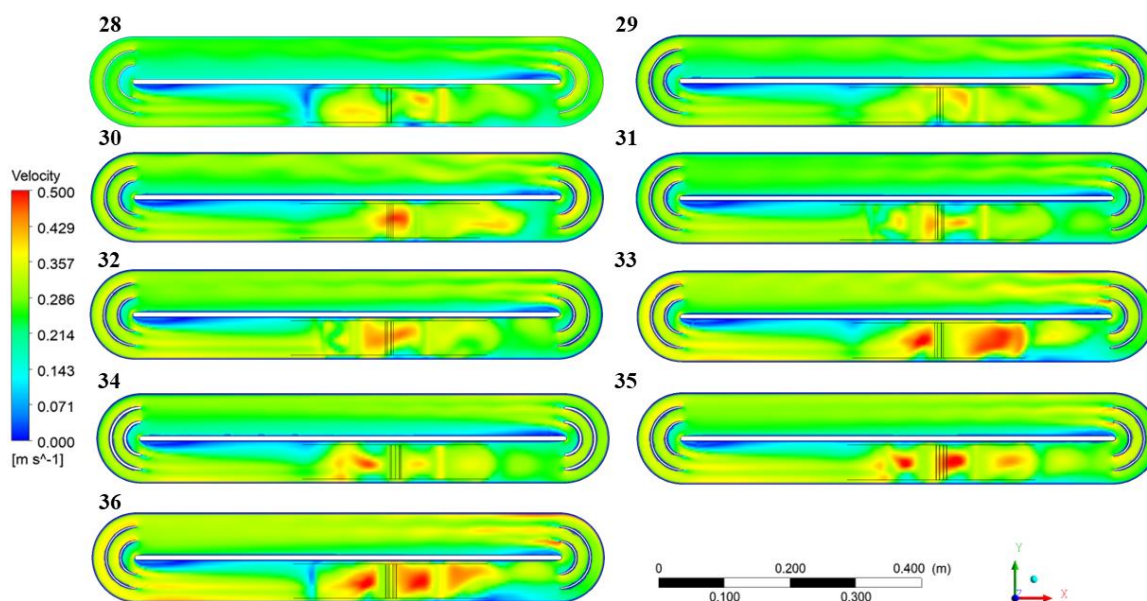
Fonte: Autoria própria

Figura 15 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 17 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.



Fonte: Autoria própria

Figura 16 – Distribuição de velocidades do escoamento para a rotação de 19 rpm em um plano a 100 mm do fundo do tanque em vista superior.



Fonte: Autoria própria

Observou-se que as velocidades, para todos os casos, foram maiores a partir da passagem do fluido pelas secções curvas e voltou a diminuir a partir da segunda metade do canal reto oposto ao sistema de agitação. Essa observação vai de encontro aos resultados de Huang et al., (2015) e é justificada pela lei de conservação da massa, visto que a parte do fluido que entra no canal curvo nas proximidades da extremidade externa desenvolverá uma trajetória maior que a parte que passa pela região mais interna da curva. Dessa forma, o fluido que escoou nas regiões de maior raio, o fez em maior velocidade.

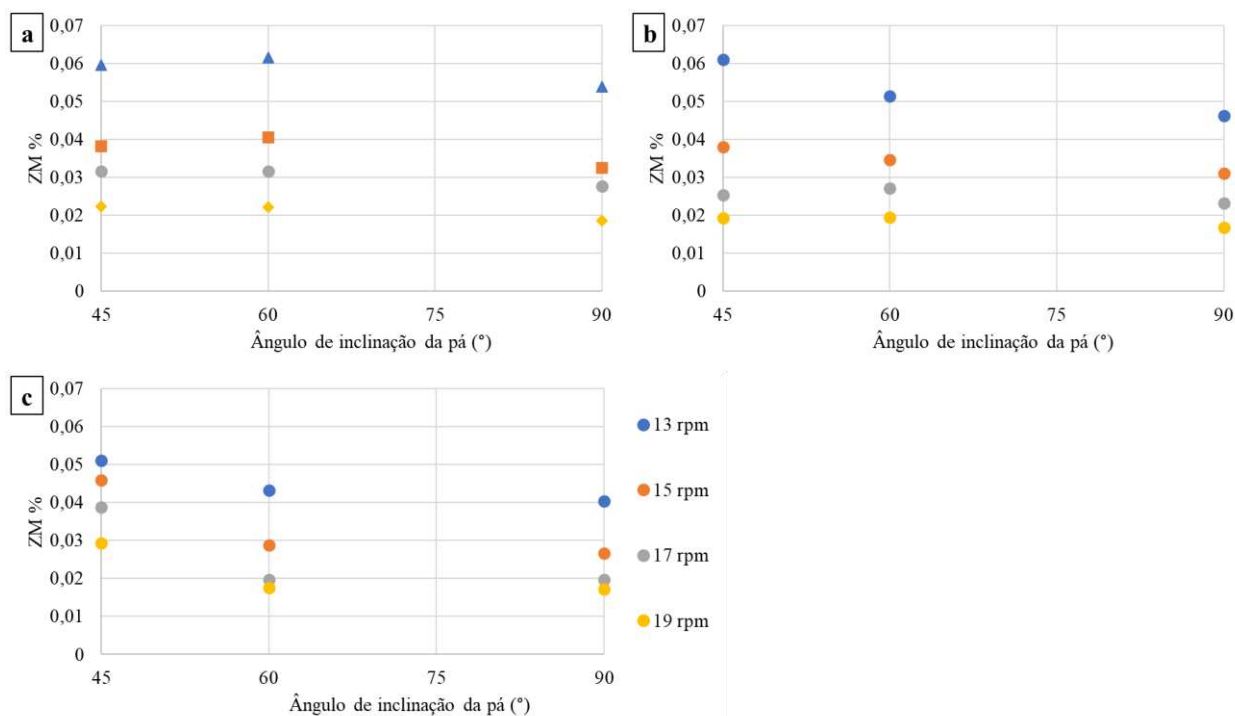
Ao se comparar as Figuras 13, 14, 15 e 16, observou-se que o padrão apresentou cores mais quentes ao passo que as rotações de trabalho da roda de pás foram maiores, evidenciando o aumento das velocidades de escoamento para um relativo aumento do aporte energético do *paddlewheel*. Contudo, ao observar as zonas com velocidades mais baixas, percebeu-se que essas ocorrem nas mesmas localidades em todos os casos, em mais ou menos intensidade, a depender da velocidade de agitação e ângulo construtivo das pás. Essa observação corrobora com a constatação de que o sistema de agitação bem projetado e operado pode auxiliar a corrigir ineficiências inerentes à geometria do tanque de cultivo.

5.1.4. Percentual de zonas mortas

A Figura 17 exibe os dados percentuais de zonas mortas em cada rotação para cada quantidade de pás e inclinação dessas. Os menores valores ocorreram nos casos 33 (1,69%), 36 (1,72%) e 35 (1,76%) e os maiores nos casos 2 (6,16%), 4 (6,10%) e 1 (5,96%).

Na investigação do efeito no escoamento da inclinação das pás no sentido axial do eixo motriz, realizada por ZENG *et al.* (2016), foram obtidos valores de percentual de zonas mortas no intervalo de 3,3% a 3,7%. SOMPECH; CHISTI; SRINOPHAKUN (2012) obtiveram resultados de percentual de zonas mortas entre 0,2% e 6,7% ao estudarem a geometria dos tanques de cultivo com intuito de minimizar a ocorrência de zonas mortas. Em estudo acerca da aplicação de estruturas internas no fundo e nas curvas do tanque de cultivo, HUANG *et al.*, (2015) encontraram percentuais de zonas mortas entre 0,3% e 8%. Assim, os valores encontrados no presente estudo foram compatíveis com o intervalo observado na literatura.

Figura 17 – Variação do percentual de zonas mortas em função do ângulo construtivo (β) para rodas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.

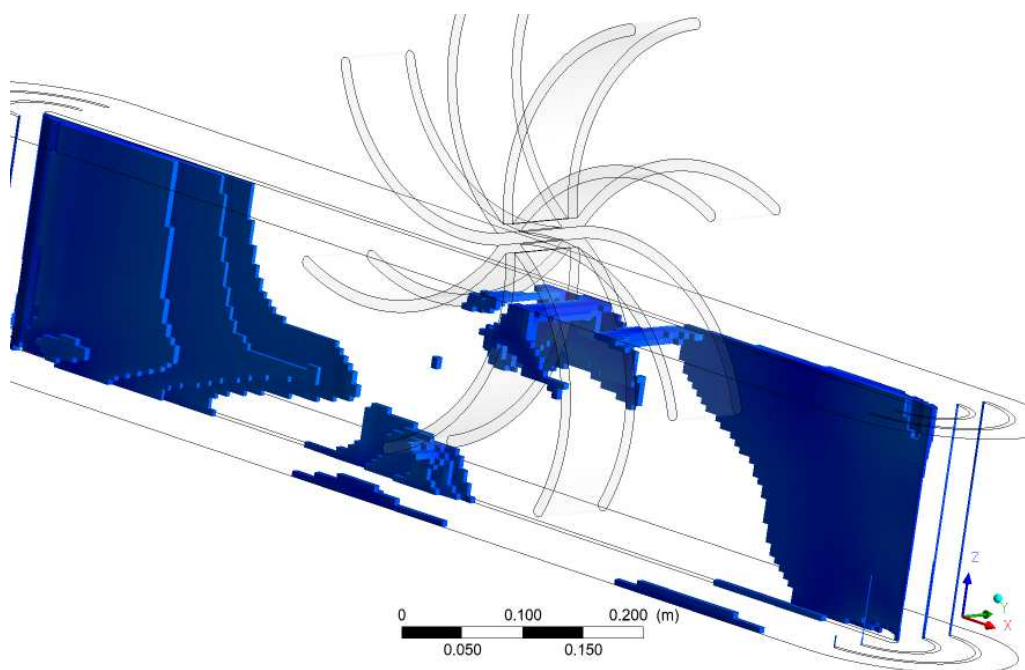


Fonte: Autoria própria

Observou-se que, para β iguais a 60° e 90°, nos casos nos quais a rotação foi 19 rpm, não houve variação expressiva dos percentuais de zonas mortas para as diferentes quantidades de pás testadas. Já para β igual a 45°, o percentual de zonas mortas foi maior no tanque simulado

com roda de oito pás, o que pode ser explicado pela recirculação de fluido entre as pás, visto o menor espaço entre elas, conforme mostrado na Figura 18, que destaca em azul as regiões do tanque com velocidade menor que $0,1 \text{ m s}^{-1}$ no caso 34. Essa ocorrência também justifica os maiores valores percentuais de zonas mortas para os casos com oito pás a 15 e 17 rpm, ambos também para β igual a 45° .

Figura 18 – Regiões de estagnação do escoamento (velocidade menor que $0,1 \text{ m s}^{-1}$) entre as pás no Caso 34 em vista isométrica.



Fonte: Autoria própria

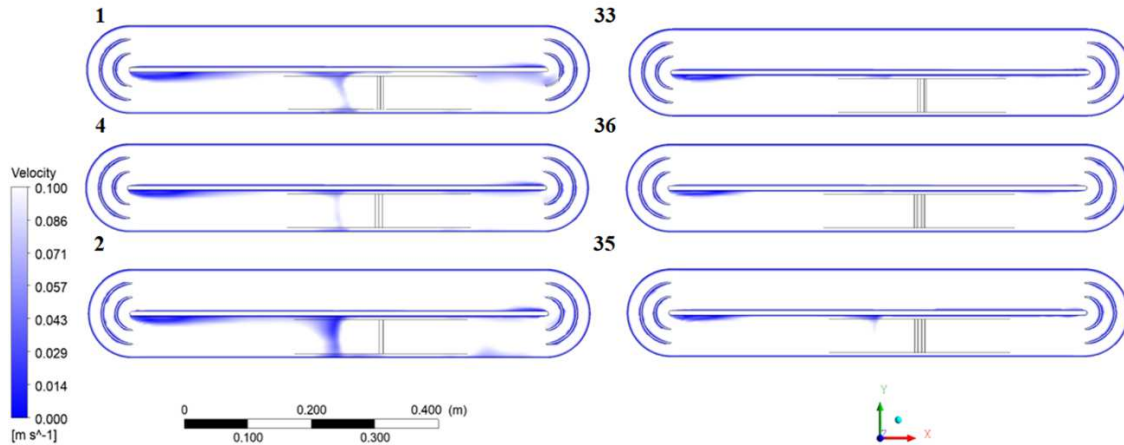
Para os casos nos quais β foi igual a 60° e 90° , os tanques simulados com 4 pás foram aqueles nos quais os percentuais de zonas de estagnação foram maiores, seguido pelas rodas com 6 e 8 pás, nessa ordem. Com menores velocidades médias de escoamento e menor periodicidade de transferência de momento entre pás e fluido, os casos com quatro pás se mostraram mais suscetíveis à ocorrência de zonas mortas.

5.1.4.1. Localização das zonas mortas

A distribuição das zonas mortas no domínio computacional, conforme exibido na Figura 18, se dá de maneira tridimensional. Entretanto, um plano de corte na seção transversal do tanque à 30 mm do fundo exibe a localização das zonas mortas de forma representativa para o restante do domínio. Na Figura 19, é possível observar as posições nas quais as velocidades de

escoamento foram menores que $0,1 \text{ m.s}^{-1}$ para os casos de maior (1, 4 e 2) e menor (33, 36 e 35) percentual de zonas mortas.

Figura 19 – Localização das zonas de estagnação no plano a 30 mm do fundo do tanque em vista superior.



Fonte: Autoria própria

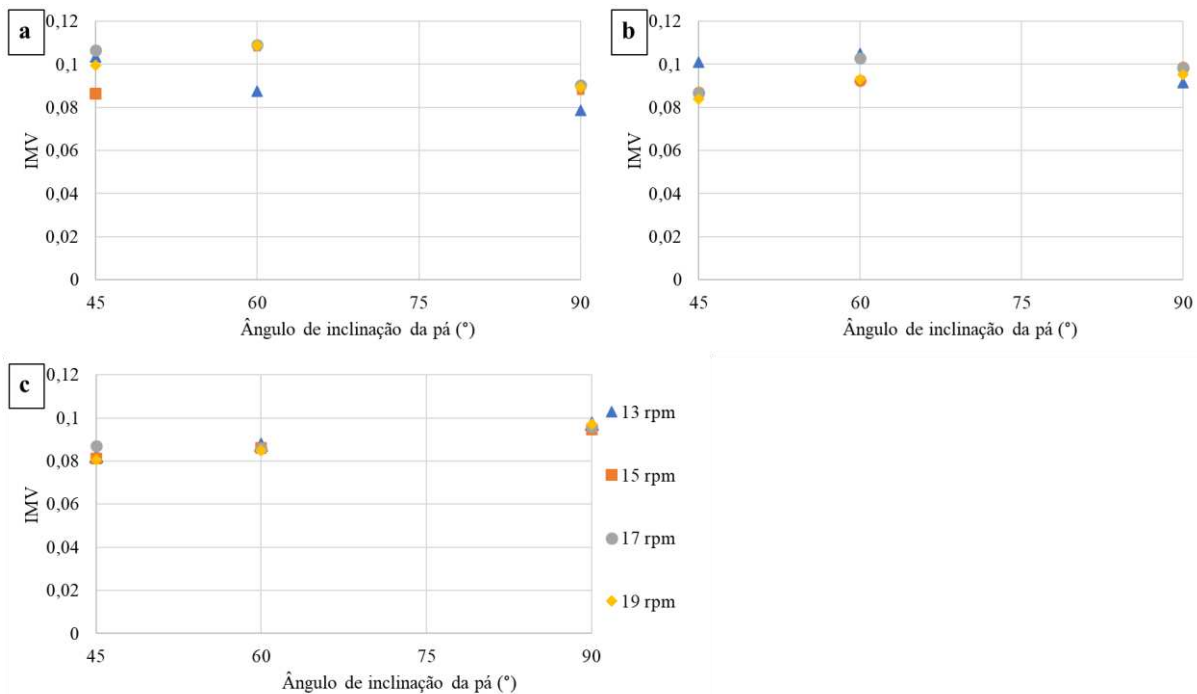
Observou-se que, de forma geral, a ocorrência das zonas de baixa velocidade foi verificada nos mesmos locais para todos os casos. A região com maior volume de fluido abaixo da velocidade crítica para sedimentação foi a porção inicial do canal reto à montante do agitador, logo após a passagem do fluido pela região curva, nas proximidades da divisória central do tanque. Nessa região, a curvatura com baixo raio da geometria do tanque faz com que a velocidade do fluido seja mais baixa, em contraponto à alta velocidade experimentada pela porção fluída que percorre raios maiores durante a curva. Além disso, há o efeito da interação do fluido com a parede do tanque, cuja velocidade é nula e afeta o escoamento, formando uma camada limite de baixa velocidade.

Outra área na qual pôde ser observada a ocorrência de baixas velocidades de escoamento é a região imediatamente abaixo da roda de pás. Nessa região a baixa velocidade está relacionada à recirculação de fluido causada pelo movimento da roda de pás. Contudo, essa condição é momentânea e o escoamento se normalizou com o movimento de passagem da pá subsequente, não representando, dessa forma, um local de provável sedimentação de microalgas durante a operação de um tanque para cultivo.

5.1.5. Velocidade e mistura na direção de atenuação da luz

O Índice de Mistura Vertical foi avaliado para os 36 casos estudados. Conforme exibido na Figura 20, para β igual a 45° , não houve diferença relevante nos resultados das rodas com 4 e 6 pás quando operadas em rotações de 13 e 15 rpm. A roda com 8 pás obteve um desempenho pior, quando comparada às anteriores, no que diz respeito ao IMV. Isso pode ser explicado pelo menor espaço entre as pás para o modelo de oito pás, que impossibilitou uma maior velocidade vertical na região de agitação durante a operação, visto que as próprias pás funcionaram como obstáculo para o escoamento em direção ao fundo do tanque. Além disso, as rodas com oito pás obtiveram maiores velocidades de escoamento no sentido da corrente, fazendo com que a razão do índice fosse menor que nos casos com seis e quatro pás, nos quais essas velocidades foram menores.

Figura 20 – Variação do índice de mistura vertical em função do ângulo construtivo das pás e da rotação para rodas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.



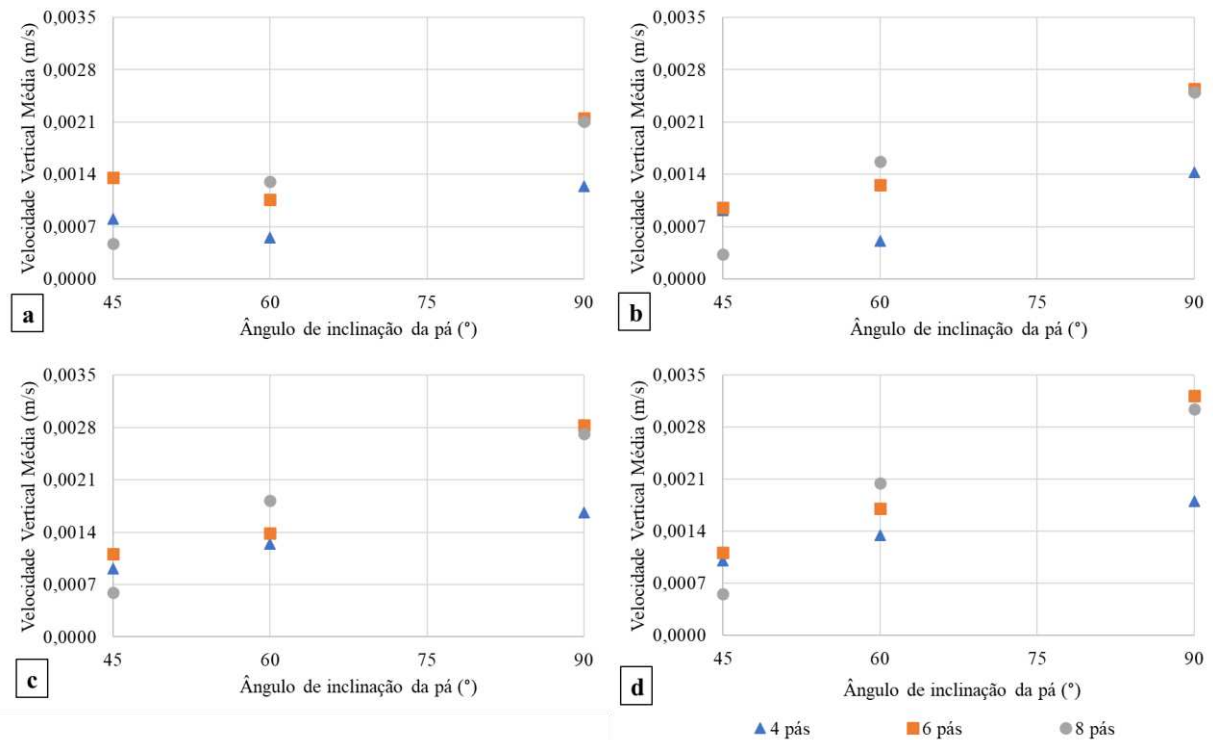
Fonte: Autoria própria

Em oposição ao cenário descrito anteriormente, as rodas com quatro pás permitiram uma maior mobilidade do fluido entre a passagem de uma pá e outra, além de proporcionarem menores velocidades de escoamento no tanque, fatores que justificam seu melhor desempenho

em 50% dos casos avaliados no quesito de mistura vertical. A roda com 4 pás resultou em maiores Índices de Mistura Vertical quando operada a 17 rpm, para todos os ângulos construtivos.

Ainda acerca das rodas construídas com 4 pás, foram observados piores menores valores de IMV para o ângulo β igual a 90° , tanto em comparação com os ângulos de 45° e 60° quanto em comparação às outras configurações de quantidade de pás com o mesmo ângulo de 90° . Esse comportamento é oriundo da maior diferença de velocidade vertical ocorrida quando o tanque foi simulado com pás retas, sendo que as velocidades do fluido no sentido de atenuação da luz foram consideravelmente menores quando comparadas aos casos onde β foi diferente de 90° , conforme exibido na Figura 21. Isso se justifica pelo fato de que, nas pás com β igual a 90° , o efeito das pontas das pás sobre a velocidade é maior que nos demais casos. Assim, conjuntos com maior quantidade de pás transferem maior quantidade de momento para o fluido, fazendo com que as velocidades na direção de atenuação da luminosidade sejam, conseqüentemente, maiores.

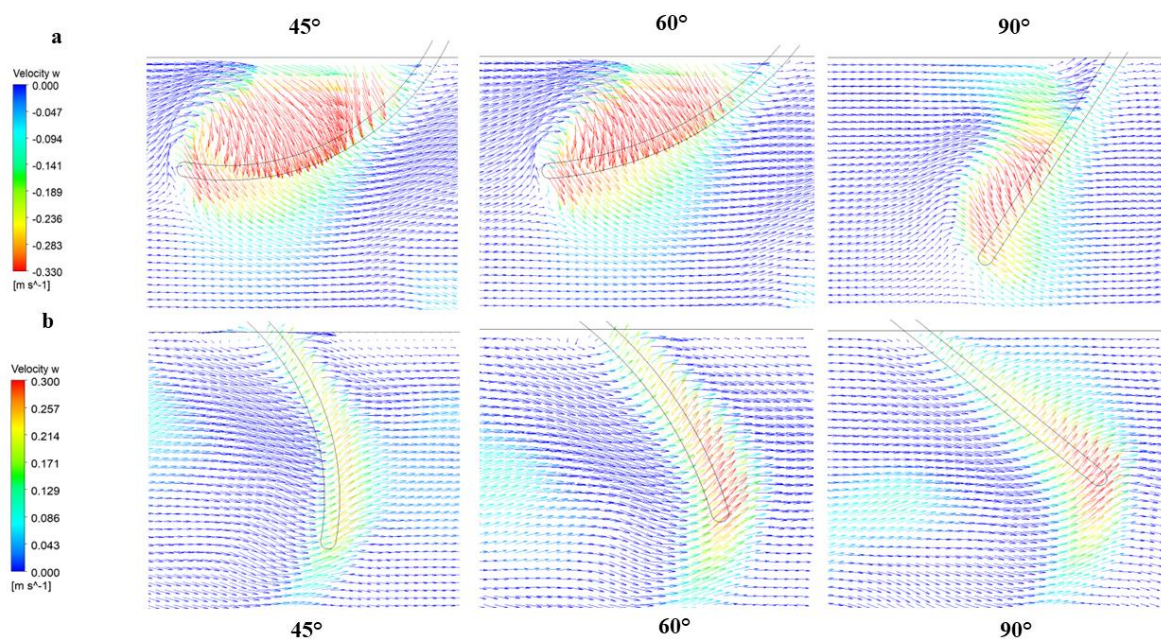
Figura 21 – Variação da velocidade vertical média em função do ângulo construtivo (β) e para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19.



Fonte: Autoria própria

Além disso, na segunda etapa de submersão da pá, aquelas com ângulo construtivo inferior a 90° tem menor contato com o fluido na região da ponta da pá, sendo que nas pás retas há um maior efeito de elevação da massa de fluido na região do *paddlewheel*, justamente devido à ausência de inclinação, o que justifica esse efeito mais exacerbado na diferença de velocidade vertical para as rodas com quatro pás. A Figura 22 apresenta a comparação entre a primeira etapa de submersão das pás para os três ângulos construtivos. Observaram-se maiores velocidades de descida do fluido para as pás com ângulo de 45° , seguidas pelas de 60° e 90° . Já na segunda etapa de submersão das pás, exibida na Figura 22b, as velocidades de ascensão do fluido são maiores para as pás retas, seguidas pelas pás com β igual a 60° e 45° .

Figura 22 – Vista lateral do perfil de velocidades nas regiões de ponta de pá do corte a 50 mm das paredes do canal, para pás retas e inclinadas em 60° , com mapa de cores da escala de velocidades verticais.



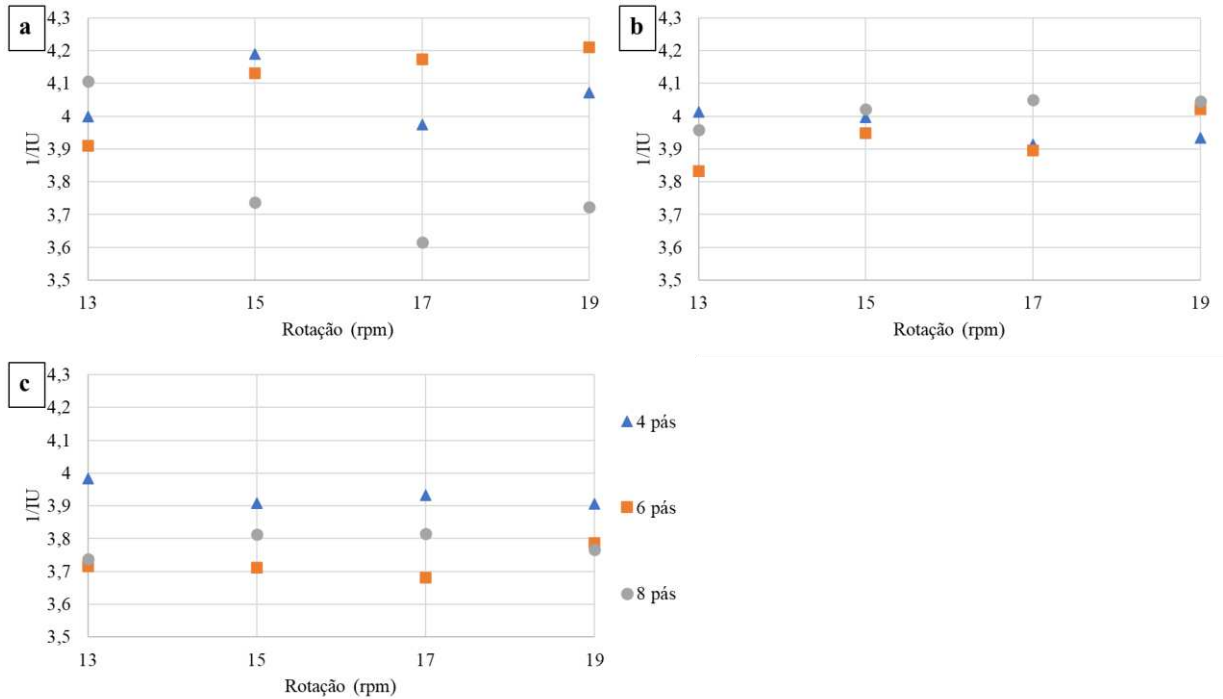
Fonte: Autoria própria

5.1.6. Uniformidade da mistura

Conforme evidenciado na Figura 23, há variação na uniformidade da mistura ao alterar a velocidade de rotação, a quantidade e ângulo construtivo das pás do *paddlewheel*. Para um ângulo construtivo (β) igual a 45° e 8 pás, exibido na Figura 23a, a uniformidade da mistura diminuiu com o aumento da rotação de 13 até 17 rpm. Para a rotação de 19 rpm, a uniformidade de mistura voltou a patamares mais altos. Isso é explicado pelo fato de que a velocidade média

de escoamento no caso da roda com 8 pás com β igual a 45° , operando a 19 rpm, não foi tão acentuada como nos casos com menores inclinações. Dessa forma, as velocidades locais foram mais próximas das velocidades médias, tornando o escoamento mais uniforme.

Figura 23 – Variação do índice de uniformidade em função da rotação para os ângulos construtivos de (a) 45° , (b) 60° e (c) 90° .



Fonte: Autoria própria

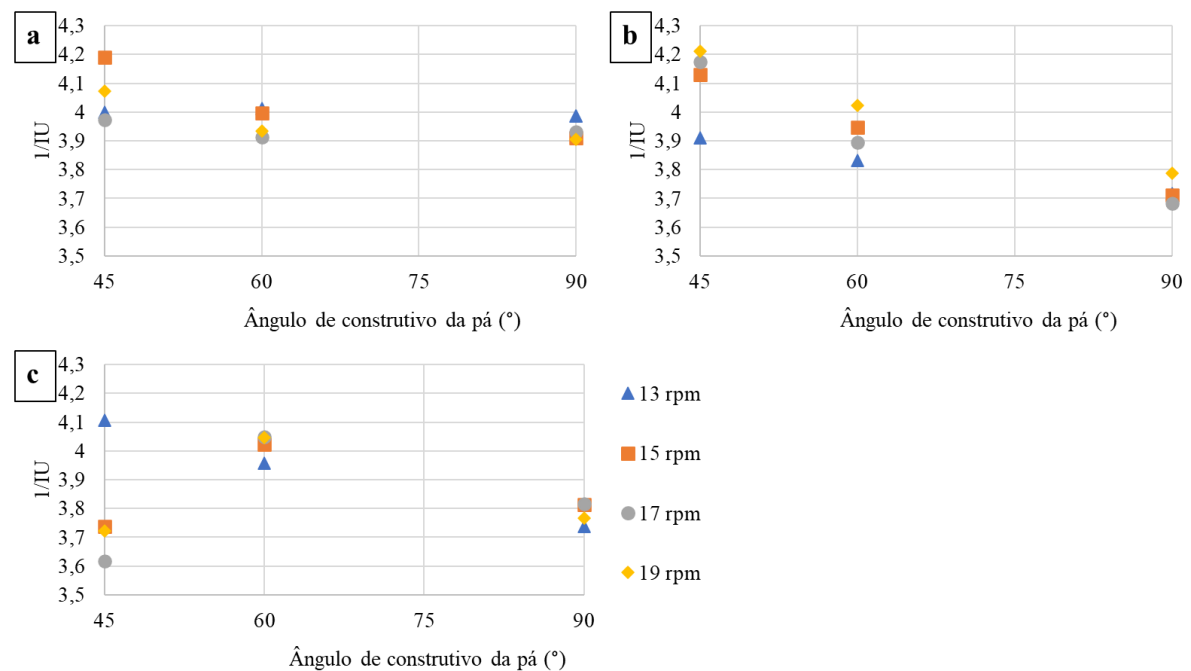
Para o mesmo ângulo construtivo em uma roda de 4 pás, percebeu-se uma discreta variação do IU em torno do valor de 0,245. A roda com 4 pás transferiu momento para o fluido de maneira mais espaçada ao longo do tempo, devido à quantidade diminuta de pás. Por isso, o fluido apresentou uma distribuição mais uniforme dos perfis de velocidade, uma vez que houve mais tempo para estabilização do escoamento entre a ação de uma pá e outra na coluna de líquido, ocorrendo menor perda de carga, visto que esta é proporcional ao quadrado da velocidade de escoamento do fluido. Dessa maneira, as velocidades locais foram mais próximas à velocidade média do tanque.

A roda com 6 pás representa um modelo intermediário entre os dois modelos supracitados: transferiu momento ao fluido com menor periodicidade que a de 8 pás e maior que a de 4 pás. Assim sendo, para a menor rotação, a roda de 6 pás obteve pior desempenho na uniformidade do escoamento no tanque ($IU = 0,258$), visto a maior diferença entre as velocidades locais e a velocidade média do escoamento.

Ao comparar os gráficos mostrados na Figura 23, observou-se o efeito do ângulo construtivo das pás no índice de uniformidade da mistura. Conforme discutido na Seção 5.1.3, para maiores valores de β , maior foi a velocidade média de escoamento. Esse fenômeno justifica o fato de que o desempenho da roda com 8 pás quanto à uniformidade da mistura não é tão acentuado no caso em que $\beta = 45^\circ$ como para os ângulos de 60° e 90° , já que, no caso da roda com 8 pás, quanto maior o ângulo β , maior a velocidade média do escoamento e, conseqüentemente, menor a discrepância entre as velocidades na região próxima ao agitador e as velocidades nas regiões mais distantes do mesmo.

Essa relação entre o ângulo β e o índice de uniformidade foi melhor esclarecida a partir da análise dos gráficos exibidos nas Figura 24. A Figura 24a exibe a tendência à constância do valor de IU para a roda de 4 pás para os ângulos de 60° e 90° para todas as rotações.

Figura 24 – Variação do índice de uniformidade em função do ângulo construtivo (β) para as rodas construídas com (a) 4, (b) 6 e (c) 8 pás.



Fonte: Autoria própria

A Figura 24 evidencia que os menores valores de IU, ou seja, maiores uniformidades de mistura, ocorreram para as pás de 45° para a roda com 4 e 6 pás, quando comparados aos valores obtidos para os ângulos de 60° e 90° , visto as menores velocidades de escoamento e menor disparidade entre os perfis de velocidade na região da roda de pás e no restante do tanque. Enquanto isso, para a roda com 8 pás, houve um comportamento distinto, com os menores

valores de IU ocorrendo para um ângulo construtivo de 60° , já que com esse modelo de pás houve uma distribuição mais uniforme do momento das pás para o fluido.

5.1.7. Número de Courant

A Tabela 4 exibe os resultados encontrados da análise do número de Courant para as simulações. Em simulações de escoamento periódico, que são necessariamente transientes, é recomendável que o número de Courant permaneça abaixo de 1,0 para que os resultados da simulação apresentem convergência e menores erros numéricos associados à discretização dos termos advectivos (XU et al., 2023). O número de Courant menor que 1 significa que as partículas do fluido escoam de uma célula para outra dentro de 1 intervalo de tempo, no máximo. Esse valor sendo maior que 1 indica que as o fluido escoam através de duas ou mais células a cada passo de tempo e isto pode afetar negativamente a convergência do problema, representando uma falha na discretização espaço-temporal.

Entretanto, valores acima de 1,0 foram aceitos no presente estudo, uma vez que as análises mostraram que a ocorrência de valores altos para o número de Courant foram registrados, em grande maioria, nas regiões adjacentes ao *paddlewheel*, enquanto valores mais próximos a 1,0 foram registrados no restante do tanque.

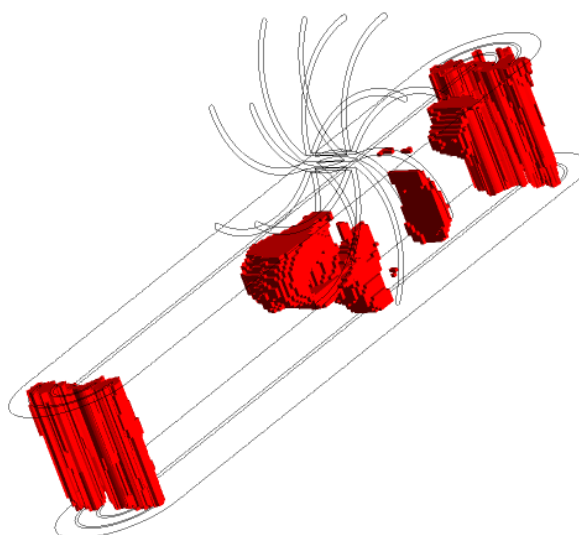
Tabela 4 – Avaliação do Número de Courant nas simulações.

Caso	Courant Abaixo de 1 (%)	Courant Mínimo	Courant Médio	Courant Máximo
1	74,62	0,013	2,1256	40,3516
2	72,71	0,0283	2,1624	20,9204
3	70,06	0,0258	2,1025	25,2964
4	90,96	0,0138	1,3802	22,1991
5	87,79	0,0117	1,5881	19,9934
6	88,05	0,0199	1,5291	22,8776
7	95,98	0,0096	1,759	10,6657
8	94,69	0,0123	1,2551	11,5930
9	94,93	0,0046	1,2322	20,4260
10	76,13	0,0235	2,0918	40,7395
11	46,79	0,0276	2,2205	29,8906
12	65,69	0,0058	2,1692	26,1707
13	91,45	0,0143	1,3912	19,8540
14	89,80	0,0145	1,5665	15,9698
15	86,98	0,0154	1,5582	26,9888
16	96,23	0,0099	0,9897	13,0590
17	94,98	0,0121	1,2619	12,4032
18	94,87	0,0043	1,2438	20,7638
19	74,42	0,0048	2,1208	39,7476
20	72,03	0,0271	2,0492	27,5076
21	68,53	0,0239	2,1168	36,3962
22	91,13	0,0195	1,4091	19,7552
23	87,71	0,0083	1,6003	20,0302
24	86,99	0,0078	1,5577	20,7583
25	95,42	0,0083	1,0000	11,9600
26	94,59	0,0084	1,2696	11,5751
27	94,82	0,0082	1,2475	21,0295
28	73,90	0,0252	2,1402	41,2998
29	69,51	0,0253	2,2656	27,9384
30	65,89	0,0148	2,1686	26,1356
31	91,10	0,0182	1,4111	20,4552
32	88,74	0,0184	1,5973	16,6295
33	86,88	0,0194	1,5716	26,8434
34	95,74	0,0120	1,0374	11,5134
35	95,01	0,0110	1,2631	12,2484
36	94,87	0,0038	1,2405	20,4854

Fonte: Autoria própria

Conforme mostrado na Tabela 4, os valores médios para o número de Courant foram maiores ou iguais a 1,0 para 35 dos 36 casos estudados. Essa média teve seu valor aumentado devido aos altos valores do número de Courant nas proximidades da roda de pás e das curvas do tanque. Esse comportamento pode ser observado na Figura 25, que exibe as regiões do tanque com Courant acima de 1,0, e é explicado pelo fato de que na região da roda de pás a velocidade de escoamento do fluido é alta, pela ação rotativa das pás. O número de Courant é a relação entre o produto da velocidade pela variação temporal e a variação espacial (Equação (5)). Assim, visto que a variação temporal é constante e que a variação de comprimento ao longo do domínio computacional é desprezível, maiores valores de velocidade fizeram com que essa razão (número de Courant) fosse proporcionalmente maior. Esse comportamento se repete nas bordas do tanque, também devido às altas velocidades nessas regiões.

Figura 25 – Localização das regiões com alto Número de Courant no Caso 16 em vista isométrica.



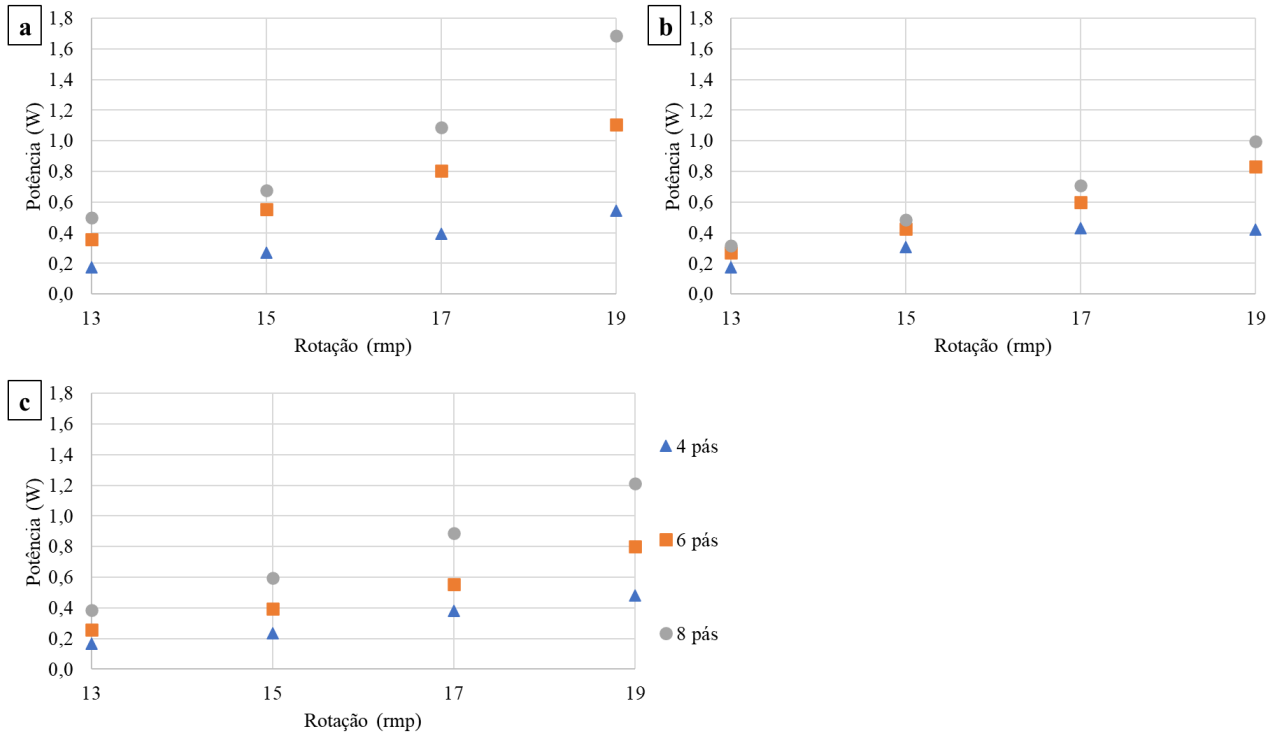
Fonte: Autoria própria

Além disso, conforme mostrado na Tabela 4, foi calculado o percentual do domínio computacional para o qual o valor do número de Courant permaneceu menor que 1,0. Para 26 dos 36 casos esse percentual foi superior a 80%. Em apenas um dos casos (caso 11) esse valor percentual foi inferior a 50%, entretanto o valor médio para o número de Courant não foi discrepante com relação aos outros casos estudados. Além disso, 94,45% do volume total do domínio computacional apresentou valores de Número de Courant de no máximo 3,0, de forma que os resultados foram considerados suficientes para o presente estudo.

5.1.8. Potência consumida

A partir dos dados obtidos nas simulações e dos cálculos realizados, as curvas de potência *versus* rotação da roda de pás foram traçadas e exibidas na Figura 26.

Figura 26 – Variação da potência consumida teórica em função da rotação e da quantidade de pás para os ângulos construtivos (β) de (a) 45° , (b) 60° e (c) 90° .



Fonte: Autoria própria

Observou-se que, para uma mesma rotação e ângulo construtivo, quando comparadas as rodas com 4, 6 e 8 pás, a roda com maior número de pás requisitou a maior potência. Além disso, para maiores rotações, as potências médias também foram maiores, exceto para os casos 20 e 29, nos quais as rotações foram 17 e 19, respectivamente, porém, a potência média permaneceu praticamente constante. Ou seja, de forma geral, quanto maior a quantidade de pás e a rotação do *paddlewheel*, maior a quantidade de energia utilizada pelo sistema de agitação. De fato, a potência é uma grandeza diretamente proporcional à velocidade de rotação, bem como as perdas de energia pelo atrito do fluido com as paredes do tanque também são proporcionais à velocidade de escoamento, sendo essa uma relação quadrática.

Com relação à quantidade de pás, uma maior quantidade de pás significa uma maior quantidade de corpos submersos sob ação da força de resistência ao escoamento da água, logo,

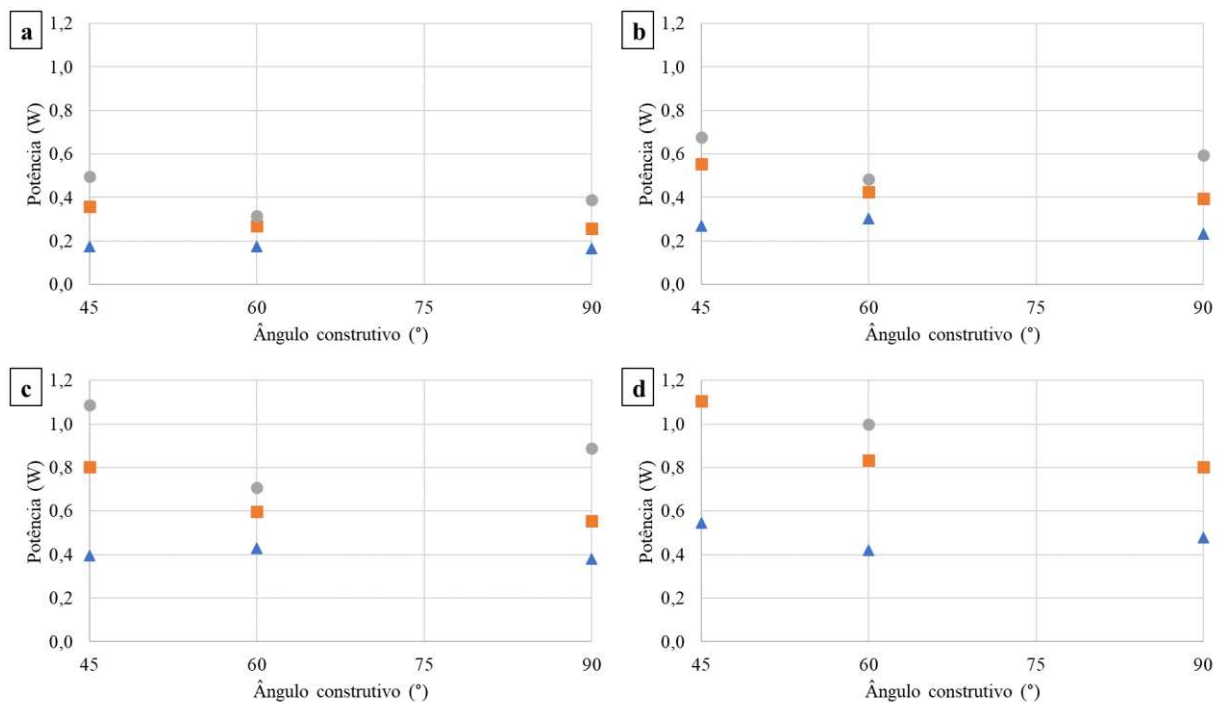
maior será o momento angular gerado no eixo motriz. O momento angular é, também, diretamente proporcional à potência.

A potência teórica mínima de operação para os 36 casos avaliados ocorreu no caso 3 (4 pás, β igual a 90° e rotação de 13 rpm) e a máxima no caso 34 (8 pás, β igual a 45° e rotação de 19 rpm), sendo elas 0,1671 W e 1,6884 W, respectivamente. Quanto maior a potência teórica consumida, menor o valor do indicador de desempenho da mistura, visto que o presente estudo busca uma agitação suficientemente adequada, com o menor consumo de energia possível.

No que diz respeito ao ângulo construtivo das pás, houveram diferentes comportamentos das curvas de potência para cada configuração testada. Conforme observado na Figura 27, a potência consumida apresentou pouca variação, permanecendo praticamente constante, para as variações de β nas rodas de quatro pás em todas as rotações testadas.

No caso das rodas de seis pás, a potência consumida foi maior para o ângulo construtivo igual a 45° , sendo que houve pouca variação entre os ângulos de 60° e 90° . Já no caso das rodas dotadas de oito pás, a potência mínima ocorreu, para todas as rotações avaliadas, para o ângulo de 60° , sendo que a máxima ocorreu quando o ângulo foi de 45° .

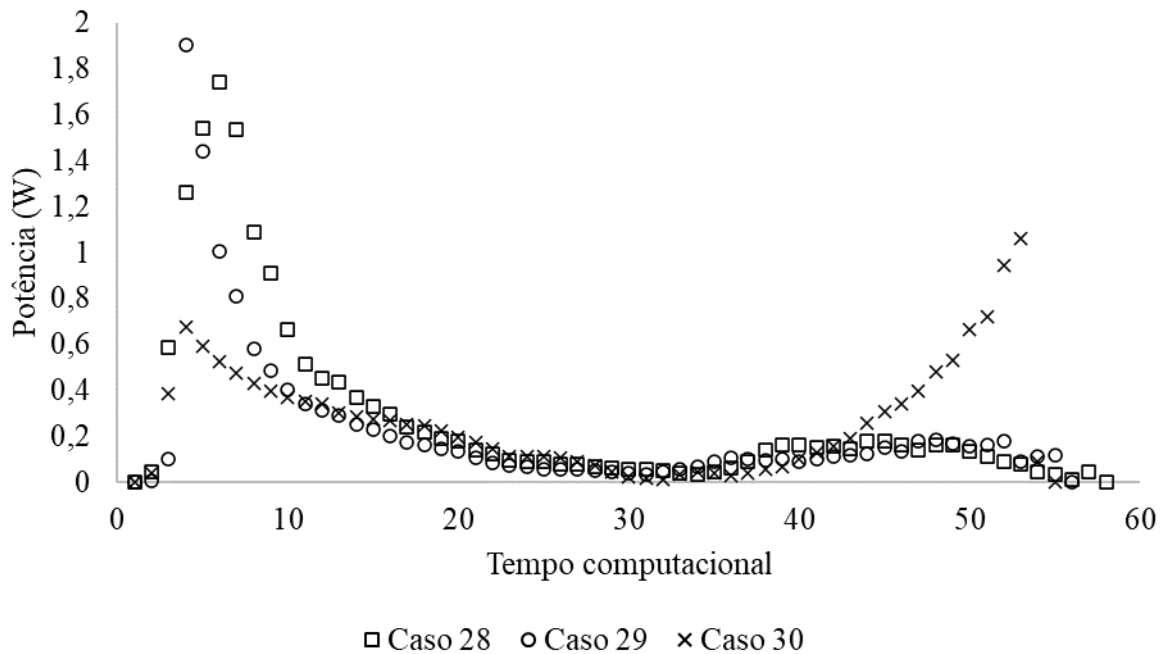
Figura 27 – Variação da potência consumida teórica em função do ângulo construtivo (β) e da quantidade de pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.



Fonte: Autoria própria

A forma como a energia foi demandada para agitar o fluido foi distinta ao se comparar os três diferentes ângulos construtivos das pás. A Figura 23 ilustra o comportamento da potência instantânea de uma pá em contato com o fluido para os casos 28, 29 e 30. O único parâmetro que variou na operação desses 3 casos foi o ângulo construtivo, sendo ele 45° para o Caso 28, 60° para o Caso 29 e 90° para o Caso 30.

Figura 28 – Variação da potência instantânea de uma pá em função do tempo computacional de passagem pela região fluída para os ângulos construtivos (β) de 45° , 60° e 90° .



Fonte: Autoria própria

Na Figura 23, o tempo computacional inicial representa o momento de contato da pá com a superfície fluída. Foram observados altos valores de potência instantânea para os casos nos quais β foi igual a 45° e 60° na região de entrada da pá na região fluída. Isso aconteceu devido à maior área de contato da pá com a superfície do fluido, sendo necessário maior aporte energético nesse instante para vencer a inércia da água.

Enquanto isso, para as pás retas, o contato inicial da pá com a superfície do fluido foi na região da ponta, tornando menor o gasto energético para superar a inércia. No final da primeira e início da segunda etapa de submersão da pá, as potências instantâneas foram semelhantes para todos os três casos, sendo elas as mais baixas no intervalo de tempo avaliado. Entretanto, ao passo que para as pás com β igual a 45° e 60° esses valores permaneceram baixos,

para as pás retas houve um aumento substancial nas potências instantâneas até o final da segunda etapa de submersão da pá. Isso ocorreu devido à geometria das pás com curvatura que, a partir do final da primeira etapa de submersão da pá, têm uma redução acentuada no ângulo de contato com o fluido e, portanto, diminuindo a quantidade de momento repassado à água, enquanto que as pás retas seguem transferindo momento para o fluido com toda a extensão da pá e, para tal, requisitando energia do eixo motriz.

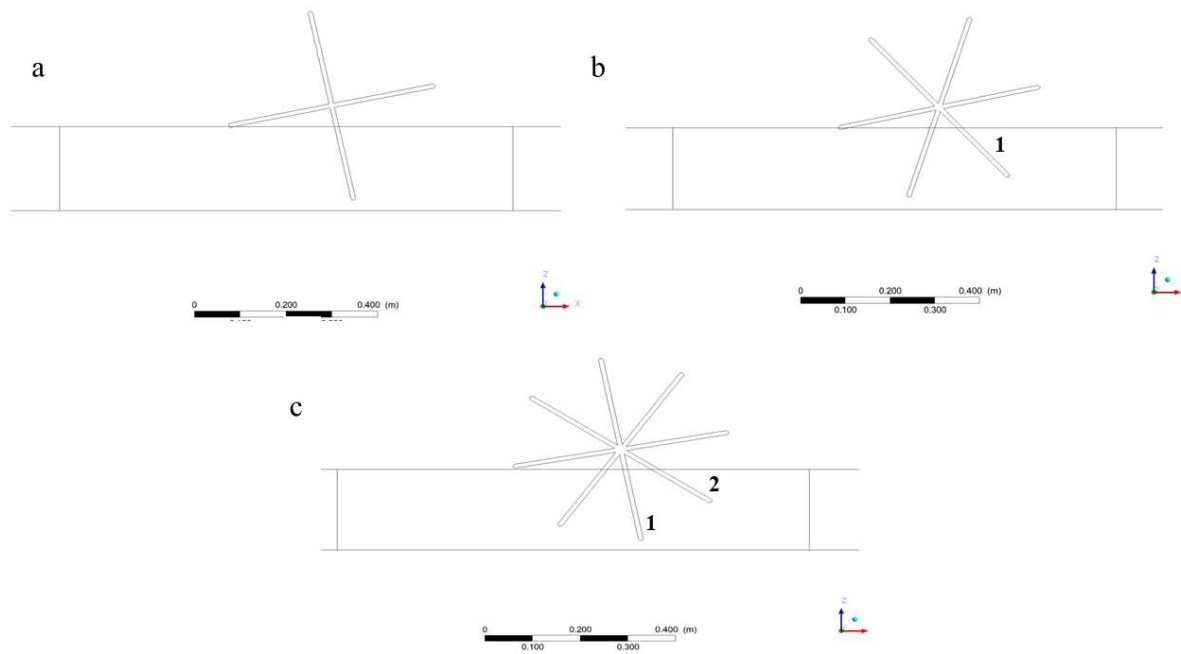
Outra constatação importante feita a partir da análise do gráfico exibido na Figura 28 é que esse perfil de distribuição de potência instantânea está atrelado também ao consumo total de energia pelo conjunto da roda de pás, sendo a fenomenologia que explica o comportamento exibido na Figura 27.

Na roda montada com quatro pás retas, não houve, simultaneamente, mais de uma pá entrando ou saindo da região fluída, conforme exibido na Figura 29. **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** Logo, houve apenas um pico de potência requerida por ciclo, que é igual ao de uma pá rompendo inércia do fluido.

Para a roda dotada de 6 pás retas, houve, conforme exibido na Figura 29b, simultaneamente, uma pá no movimento de entrada e outra pá no movimento de saída, fazendo com que esses picos se sobrepusessem, enquanto que, no caso das pás com ângulo construtivo de 60° e 45° , não houve o pico de potência no movimento de saída. Esse comportamento se repete para a roda com 8 pás, nas quais houve a entrada de uma pá simultaneamente à saída de outras duas, como mostrado na Figura 29c.

Dessa maneira, explica-se o fato de que a potência consumida não variou expressivamente de acordo com o ângulo construtivo para as rodas com quatro pás, enquanto que, para rodas de oito pás, as potências consumidas foram maiores para ângulos de 90° quando comparados aos ângulos de 60° , mesmo que a região de entrada das pás no fluido tenha representado um menor gasto energético para as pás retas que para as inclinadas.

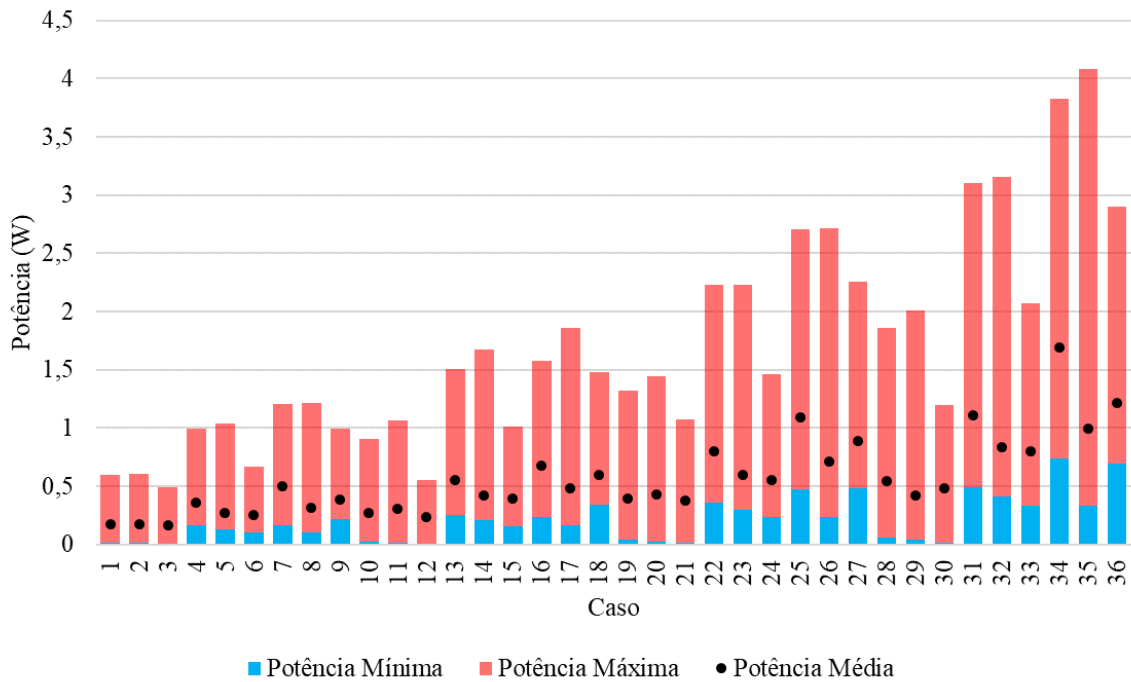
Figura 29 – Comparação do instante de entrada de uma pá na região fluída para rodas com 4, 6 e 8 pás retas



Fonte: Autoria própria

A Figura 30 exibe a variação da potência instantânea teórica mínima, média e máxima para cada um dos 36 casos estudados.

Figura 30 – Variação das potências teóricas mínimas, máximas e médias em função do caso de simulação



Fonte: Autoria própria

A análise dos resultados apresentados na Figura 30 é importante para o processo de dimensionamento de um sistema de agitação para um tanque de cultivo, visto que o acionamento deve considerar o pico de potência e não apenas a potência média requerida para operação. Ao se comparar os casos 34 e 35, por exemplo, foi observada um maior valor de potência média para o caso 34, sendo elas 1,6884 W e 0,9989 W. Entretanto, o pico de potência requerida no caso 35 foi 3,7471 W, enquanto que para o caso 34 esse valor foi de 3,0925.

Os valores de potência teórica máxima foram menores para os casos dotados de pás retas, enquanto as rodas montadas com pás de 45° e 60° tiveram valores similares entre si. As potências mínimas para os casos com velocidade de rotação de 13 rpm foram próximas de zero.

5.1.9. Indicador de Desempenho da Mistura

O cálculo do Indicador de Desempenho da Mistura foi realizado e os resultados organizados na Tabela 5. Visando facilitar a visualização dos parâmetros de cada caso, essas informações também foram inseridas na tabela.

Tabela 5 – Variação do Índice de Desempenho da Mistura (IDM) e relação com os índices de uniformidade, mistura vertical, percentual de zonas mortas e potência consumida.

IDM (W^{-1})	Caso	β ($^{\circ}$)	q	N (rpm)	IU	IMV	%Z _m	P _{ct}
46,12	29	60	4	19	0,2542	0,1087	0,0221	0,4195
45,02	12	90	4	15	0,2558	0,0877	0,0325	0,2343
39,72	1	45	4	13	0,2500	0,1035	0,0596	0,1749
39,14	30	90	4	19	0,2560	0,0894	0,0186	0,4796
35,12	10	45	4	15	0,2387	0,0863	0,0382	0,2695
34,84	11	60	4	15	0,2502	0,1079	0,0406	0,3049
34,70	3	90	4	13	0,2510	0,0786	0,0540	0,1671
33,92	19	45	4	17	0,2516	0,1065	0,0316	0,3949
33,74	21	90	4	17	0,2543	0,0903	0,0277	0,3799
33,14	28	45	4	19	0,2456	0,0994	0,0224	0,5452
32,50	2	60	4	13	0,2492	0,0875	0,0616	0,1754
31,48	20	60	4	17	0,2555	0,1090	0,0316	0,4288
29,82	15	90	6	15	0,2694	0,0985	0,0311	0,3943
28,89	5	60	6	13	0,2609	0,1049	0,0514	0,2708
28,65	6	90	6	13	0,2691	0,0917	0,0463	0,2569
27,92	24	90	6	17	0,2716	0,0983	0,0233	0,5564
26,53	33	90	6	19	0,2641	0,0953	0,0169	0,8029
25,39	8	60	8	13	0,2526	0,0876	0,0433	0,3155
24,81	17	60	8	15	0,2486	0,0862	0,0289	0,4835
24,74	26	60	8	17	0,2469	0,0857	0,0198	0,7085
24,71	14	60	6	15	0,2533	0,0924	0,0347	0,4254
24,71	23	60	6	17	0,2567	0,1030	0,0271	0,5992
23,19	9	90	8	13	0,2676	0,0975	0,0405	0,3879
23,00	32	60	6	19	0,2486	0,0930	0,0195	0,8340
22,78	18	90	8	15	0,2622	0,0946	0,0266	0,5954
20,81	27	90	8	17	0,2621	0,0959	0,0198	0,8878
19,57	35	60	8	19	0,2471	0,0850	0,0176	0,9989
18,07	4	45	6	13	0,2558	0,1012	0,0610	0,3590
17,72	22	45	6	17	0,2396	0,0866	0,0254	0,8029
17,56	36	90	8	19	0,2655	0,0972	0,0172	1,2123
16,99	13	45	6	15	0,2421	0,0869	0,0381	0,5544
16,54	31	45	6	19	0,2375	0,0839	0,0193	1,1068
13,31	7	45	8	13	0,2435	0,0824	0,0511	0,4975
9,75	16	45	8	15	0,2675	0,0813	0,0460	0,6777
7,43	25	45	8	17	0,2765	0,0870	0,0389	1,0891
6,04	34	45	8	19	0,2686	0,0805	0,0294	1,6884

Fonte: Autoria própria

O Caso 29 (4 pás, β igual a 60° e N igual a 19 rpm) foi aquele com maior IDM (46,12 W^{-1}) e, conseqüentemente, foi utilizado como modelo para construção do protótipo. Observou-se que os casos com os doze maiores valores de IDM possuíram quatro pás, enquanto oito casos dos doze menores IDM possuíram 8 pás. Esse resultado é fruto do maior consumo energético na operação das rodas com maior quantidade de pás, enquanto as rodas com 4 pás tiveram uma potência requerida menor.

Nessa etapa do estudo, observou-se a relevância da avaliação da potência consumida pelo dispositivo de agitação em termos de minimizar a quantidade de energia consumida pela operação de mistura, visando viabilizar a aplicação do sistema de cultivo, principalmente a partir da utilização de um sistema *off-grid*. A avaliação hidrodinâmica, desprezando os dados de potência consumida, apontou como mais eficientes os casos 33, 36 e 35. Entretanto, esses casos representam, respectivamente, um aumento 1,91, 2,89 e 2,38 vezes na potência média consumida pelo agitador ao serem comparados com o caso 29, de maior IDM.

5.2. Validação experimental

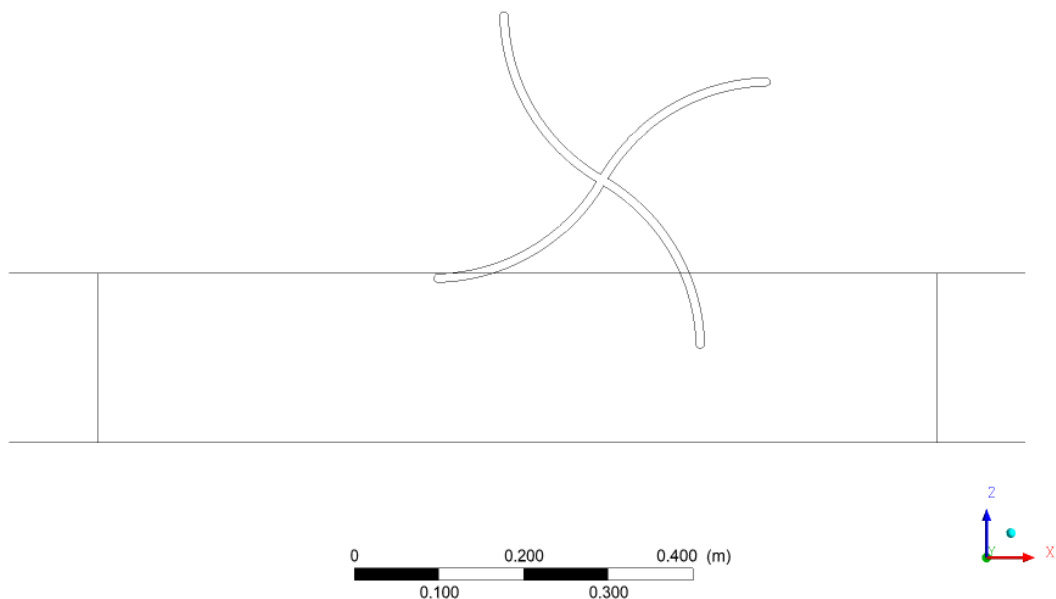
Conforme resultados exibidos nas seções anteriores, o mais alto IDM obtido foi 46,12 para o Caso 29, ou seja, rodas com quatro pás, com ângulo construtivo de 60° e rotação de 19 rpm. Dessa forma, esse modelo foi construído e montado para operação do tanque, bem como a roda com quatro pás retas, para fins de comparação experimental dos modelos.

Durante o funcionamento do tanque protótipo foi observado que o ponto de contato inicial entre as pás e a superfície do fluido é um parâmetro importante para uma adequada operação do sistema. Para a altura de 0,05 m entre o eixo motriz e a superfície, o contato das pás com o fluido ocorreu na região intermediária da pá, a qual possui maior área de contato do que nas pontas. Dessa forma, uma maior força foi realizada para vencer a inércia da água, além de que a entrada dessa região das pás no fluido causou o espalhamento do líquido para fora do tanque.

Outro fenômeno observado na operação do protótipo foi a geração de um escoamento no sentido reverso ao sentido do movimento impulsionado pelas pás. Esse escoamento na direção oposta foi gerado justamente pela geometria das pás. Após a entrada das pás no fluido pela região intermediária, as pontas das pás causaram esse efeito de escoamento reverso ao entrarem na região fluída. O escoamento se normalizou no sentido natural a partir do choque entre as massas fluídas em sentidos opostos. Foi observado que a intensidade desses efeitos se tornou mais severa para rotações mais elevadas.

A correção mais simples para esses efeitos foi a elevação da altura do eixo motriz, fazendo com que a região de entrada das pás no fluido fosse a ponta, conforme exibido na Figura 31. Observou-se que a distância ideal entre eixo e fluido foi 0,11 m. Para avaliar os efeitos dessa alteração nos parâmetros avaliados no presente estudo, foi realizada nova simulação numérica para o caso 29, considerando uma altura de 0,11 m entre o eixo e a superfície da água. Esse caso foi nomeado como Caso 29b e seus resultados serão discutidos na Seção 5.2.5.

Figura 31 – Vista lateral do tanque com a roda de pás com altura aumentada do eixo visando evitar espalhamento de fluido na entrada das pás.



Fonte: Autoria própria

5.2.1. Rotação crítica de sedimentação do cultivo de microalgas

Para comparar a operação das pás retas, mais convencionais, com o modelo proposto pelo Caso 29 (pás com ângulo construtivo de 60°), ambos os modelos foram montados e testados experimentalmente no que diz respeito à capacidade de manter as microalgas em suspensão durante o cultivo. A partir de então, pôde-se construir o gráfico com os dados relacionados ao percentual da absorvância inicial em função da velocidade de rotação das pás e observar a ascensão do percentual de absorvância com a aumento da rotação das pás, até um ponto mínimo aceitável para que o cultivo não sedimentasse.

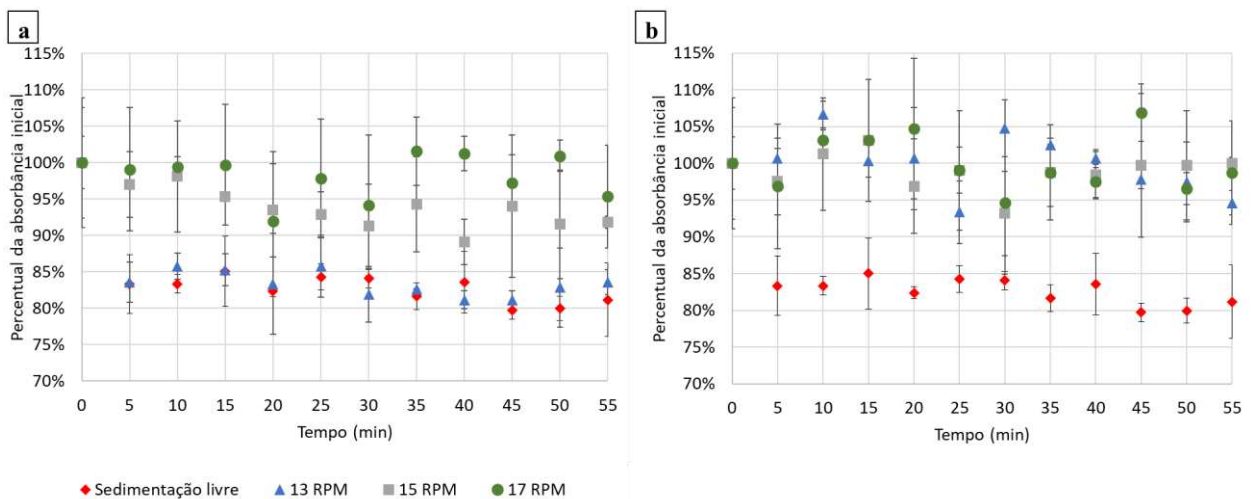
A Figura 32a mostra a curva do percentual da absorvância inicial média ao longo do tempo para um comprimento de onda de 750 nm e pás com ângulo construtivo de 90°. O gráfico evidencia que as pás retas, quando operadas na rotação de 13 rpm, não foram capazes de manter as microalgas em suspensão, sendo o comportamento da sedimentação das células similar ao cultivo sem agitação. No teste de sedimentação livre, a absorvância percentual média após o final da agitação manual foi $82,59 \pm 1,77\%$.

Para o tanque agitado com as pás a 13 rpm, esse valor foi de $83,36 \pm 1,67\%$. Ao passo aumentar a velocidade de rotação das pás, a absorvância aumentou, aproximando-se da absorvância inicial do cultivo 100% agitado. Para a rotação de 15 rpm, a absorvância após o fim da agitação manual e início da agitação por pás foi em média $94,53 \pm 2,63\%$ da inicial, enquanto que para uma rotação de 17 rpm esses valores foram $98,02 \pm 3,12\%$ dos iniciais.

O mesmo procedimento foi replicado para as pás com ângulo construtivo de 60° e os resultados podem ser observados no gráfico da Figura 32b. Diferentemente do resultado obtido pelas pás retas, para a rotação de 13 rpm houve uma diferença significativa nos valores de absorvância quando comparados aos valores do teste de sedimentação livre.

No caso das pás com β igual a 60°, todas as rotações testadas atingiram alto nível de suspensão, sendo que para as rotações de 13, 15 e 17 rpm, respectivamente, a absorvância após o fim da agitação manual e início da agitação por pás foi em média $99,94 \pm 3,98\%$, $98,87 \pm 2,54\%$ e $100\% \pm 3,87\%$ da inicial.

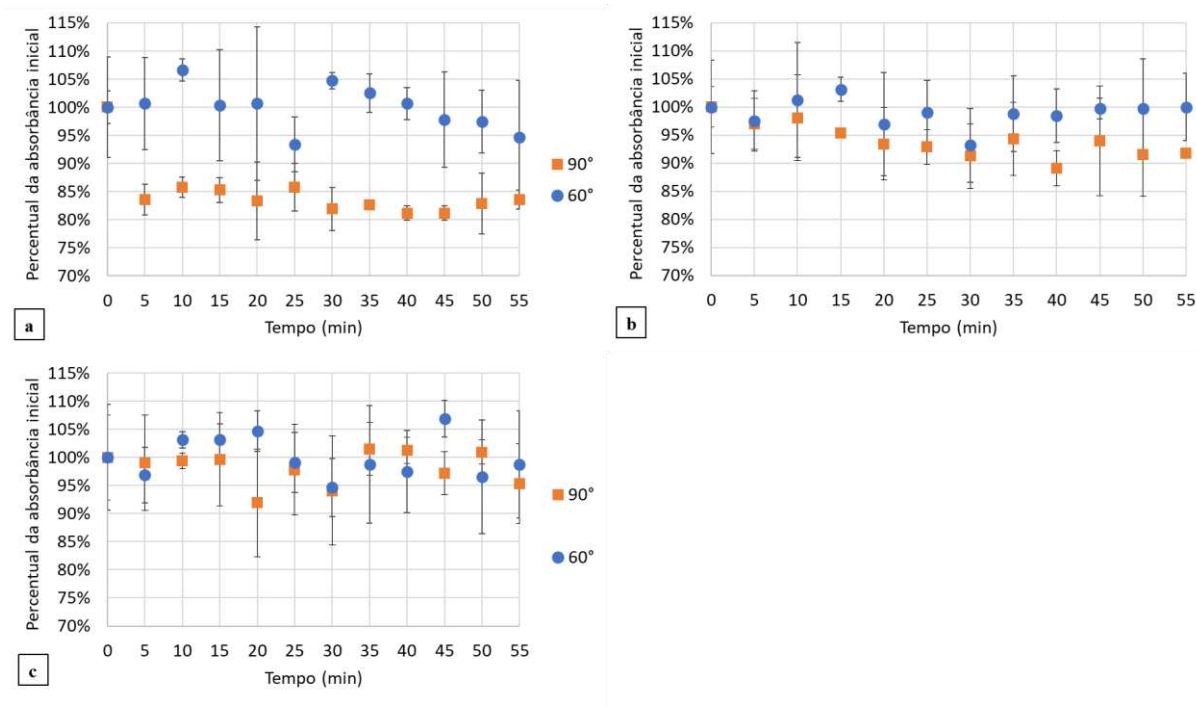
Figura 32 – Percentual da absorvância inicial em função do tempo, para a sedimentação livre e nas rotações de 13, 15 e 17 rpm, com ângulos construtivos (β) iguais a (a) 60° e (b) 90°, utilizando comprimento de onda de 750 nm.



Fonte: Autoria própria

A Figura 33 exibe a variação da absorvância no tempo para cada rotação analisada.

Figura 33 – Variação do percentual da absorvância inicial em função do tempo, para a sedimentação livre com ângulos construtivos (β) iguais a 60° e 90° , nas rotações de (a) 13, (b) 15 e (c) 17 rpm e comprimento de onda de 750 nm



Fonte: Autoria própria

Observou-se que para a rotação de 13 rpm, evidenciada na Figura 33a, houve uma significativa entre os valores de absorvância encontrados nos cultivos agitados com pás retas e inclinadas em 60° , sendo $82,59 \pm 1,77\%$ para as pás retas e $99,94 \pm 3,98\%$ para as pás inclinadas.

Esse comportamento foi menos relevante para as rotações de 15 e 17 rpm, conforme mostrado nas Figuras 33b e c. Para a maioria das amostras coletadas, os valores de absorvância permaneceram dentro da mesma faixa, considerando o desvio padrão. Observaram-se altos valores para o desvio padrão nas medições experimentais. Isso se deve ao fato de que o cultivo analisado possuía alto grau de material particulado em suspensão, causando alta variabilidade na turbidez das amostras.

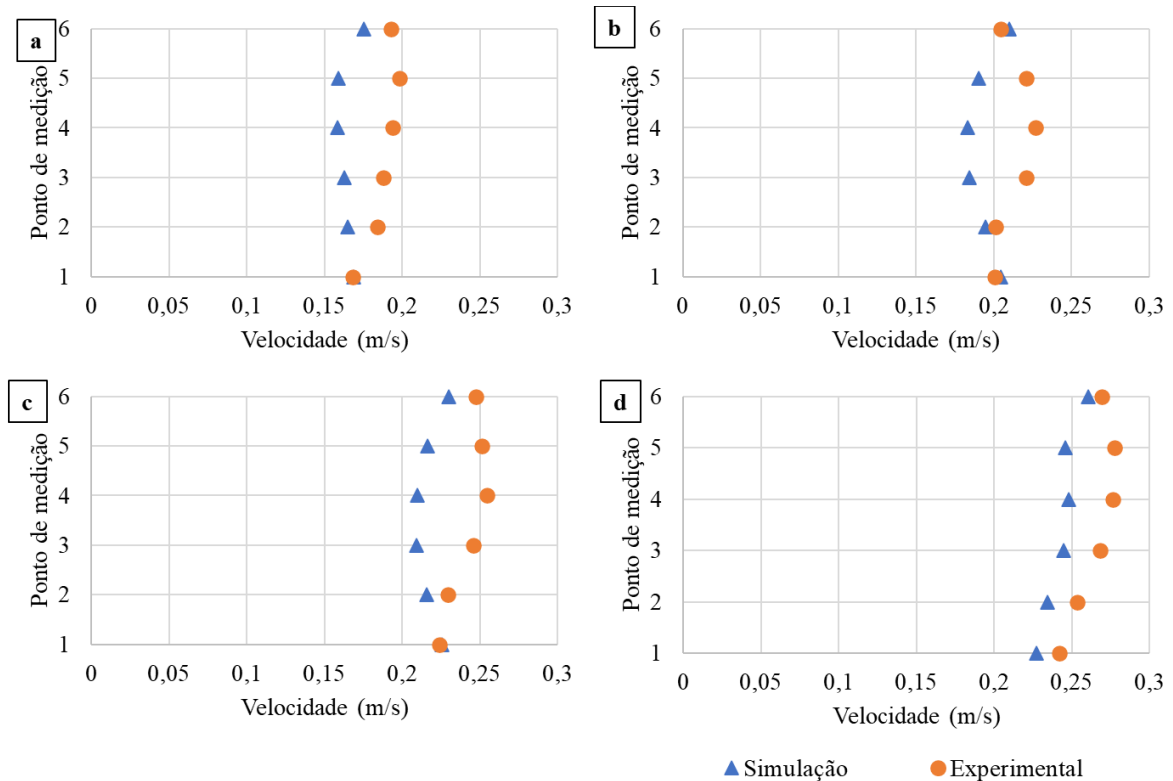
A partir dos dados obtidos nesse procedimento experimental, pode-se comparar a operação do tanque protótipo com pás retas a uma rotação de 13 rpm com o Caso 3, simulado em CFD. A incapacidade do modelo de manter as microalgas em suspensão foi prevista

numericamente, visto que o Caso 3 foi aquele com pior valor de IMV (0,0786) dentre os 36 casos avaliados. Além disso, o Caso 3 apresentou, na simulação, um percentual de Zonas Mortas de 5,4%, sendo esse índice o quarto pior dentre os 36 casos e o segundo pior entre os casos avaliados pelo experimento de absorvência, sendo melhor apenas que o Caso 2 (6,16%).

5.2.2. Comparação das velocidades de escoamento

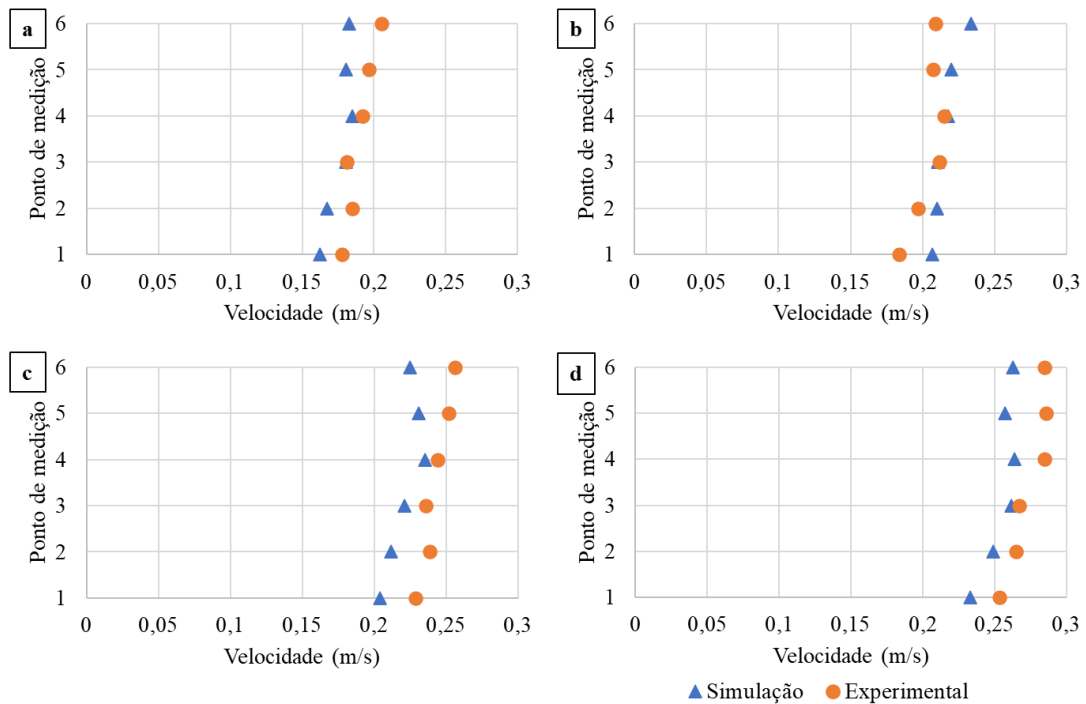
A velocidade de escoamento foi medida em 6 pontos colineares do tanque protótipo e os valores obtidos foram organizados e comparados aos valores calculados numericamente no *Ansys*. A Figura 34 exibe os dados relativos à roda de pás retas, enquanto a Figura 35 está relacionada à roda de pás com ângulo β igual a 60° . O erro padrão para cada ponto não foi exibido nos gráficos, visto que o mesmo teve ordem de grandeza de 1×10^{-4} .

Figura 34 – Variação da velocidade de escoamento simulada *versus* velocidade de escoamento experimental para o ângulo construtivo (β) de 60° em uma roda com 4 pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.



Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Variação da velocidade de escoamento simulada *versus* velocidade de escoamento experimental para o ângulo construtivo (β) de 90° em uma roda com 4 pás para as rotações de (a) 13, (b) 15, (c) 17 e (d) 19 rpm.



Fonte: Autoria própria

Observou-se que, de maneira geral, houveram divergências entre os valores de velocidade calculados numericamente para os obtidos via medição experimental no tanque protótipo. Essas variações ocorreram pelo fato de que a modelagem não previu a ondulação da camada superficial, além de não ter considerado a formação de ondas no sentido oposto ao do escoamento e o movimento pulsante do escoamento, causado pelo aumento substancial de torque requerido no momento no qual as pás atuam contra a tensão superficial da coluna fluída. Esses efeitos foram mais acentuados para os casos nos quais β igual a 60° .

Nas medidas experimentais para as pás com ângulo construtivo de 60° , observou-se a queda da velocidade de escoamento no ponto 6 quando comparado ao ponto 5. Isso se explica pela ocorrência, no modelo experimental, de um fluxo no sentido oposto ao escoamento, gerado pela onda de choque da pá com a superfície do fluído. Essa onda causou a diminuição das velocidades superficiais no sentido do escoamento nas regiões próximas às placas defletoras.

A Tabela 6 exibe a diferença percentual entre as velocidades medidas experimentalmente e aquelas obtidas na simulação em CFD.

Tabela 6 – Detalhamento do Índice de Desempenho da Mistura.

Diferença da velocidade obtida na simulação e por medidas experimentais								
Ponto	$\beta = 60^\circ$				$\beta = 90^\circ$			
	13 rpm	15 rpm	17 rpm	19 rpm	13 rpm	15 rpm	17 rpm	19 rpm
1	0,42%	1,91%	0,78%	-6,22%	-8,78%	12,45%	-10,81%	-8,05%
2	-10,61%	-3,41%	-6,13%	-7,54%	-9,53%	6,60%	-11,36%	-5,99%
3	-13,29%	-16,42%	-14,78%	-8,79%	-0,05%	-0,54%	-6,37%	-2,08%
4	-13,22%	-19,14%	-17,67%	-10,20%	-3,60%	1,26%	-3,60%	-7,52%
5	-19,92%	-13,76%	-13,95%	-11,27%	-7,98%	6,18%	-8,13%	-10,01%
6	-8,93%	2,59%	-7,03%	-3,28%	-11,10%	11,77%	-12,27%	-7,77%

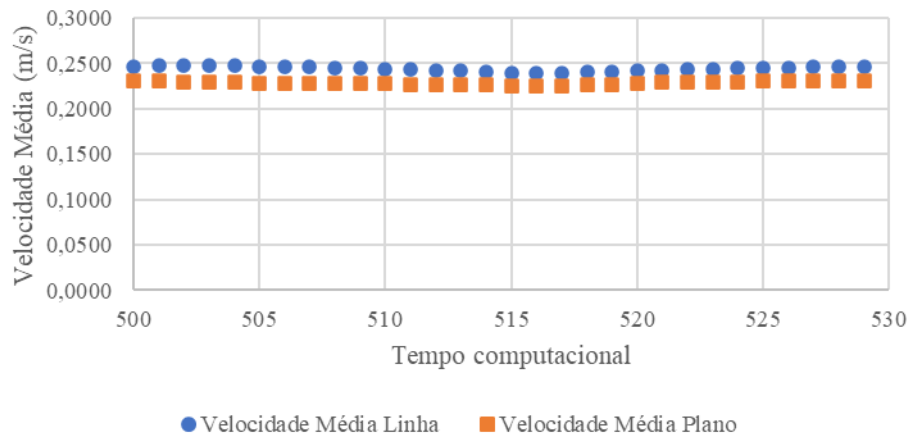
Fonte: Autoria própria

Para o ângulo construtivo de 60° , observou-se maior discrepância entre os resultados para os pontos 3, 4 e 5 em cada rotação, enquanto os demais pontos apresentaram resultados mais próximos. A proximidade dos resultados na camada mais superficial da coluna de líquido pode ser explicada pela redução da velocidade nas proximidades da superfície no protótipo, causada pela onda gerada no sentido oposto ao escoamento. Essa redução das velocidades aproximou os resultados experimentais dos resultados simulados. Enquanto isso, esse mesmo fenômeno causou maior diferença entre os resultados na secção média da coluna de água, visto a recirculação do fluido nessa região, mantendo a conservação da massa.

No fundo do tanque, uma vez ausentes os efeitos supracitados, as velocidades medidas experimentalmente foram próximas às velocidades numericamente calculadas.

A velocidade média na secção avaliada do tanque não sofreu grandes alterações. Para o Caso 29, por exemplo, permaneceu, durante todo o ciclo de simulação de 30 passos de tempo computacional, variando entre 0,2255 e 0,2308, conforme exibido na Figura 36. Os valores de velocidade encontrados ao longo do segmento de reta avaliada diferem em cerca de 6,43% daqueles medidos no plano.

Figura 36 – Variação da velocidade média no plano de corte e no segmento de reta em função do tempo computacional no Caso 29

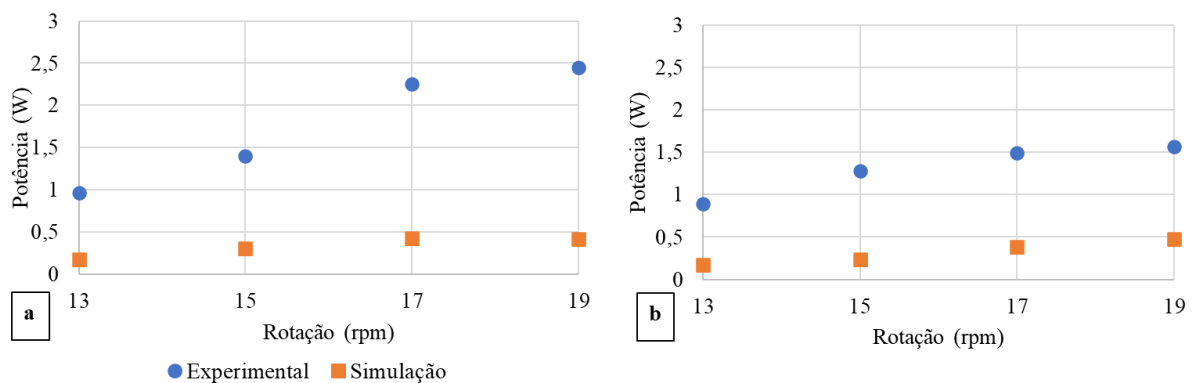


Fonte: Autoria própria

5.2.3. Comparação da potência consumida

A Figura 37a mostra o gráfico comparativo entre as potências das simulações teóricas (numéricas) e experimentais para as pás com β igual a 60° , enquanto a Figura 37b exibe os dados relativos às pás retas.

Figura 37 – Variação das potências teóricas e experimentais em função da rotação para ângulos construtivos (β) de (a) 60° e (b) 90° .



Fonte: Autoria própria

Foram observadas discrepâncias entre os valores calculados a partir da simulação em CFD, e aqueles calculados a partir dos dados de corrente e tensão, mensurados experimentalmente. Essa defasagem nos valores era esperada, visto que, mesmo com a o procedimento de subtração da demanda energética para operação do tanque vazio, ainda são

presentes ineficiências relacionadas à diferença de carga imposta ao motor de acionamento, aos sistemas elétricos e ao acoplamento mecânico em cada caso.

As eficiências energéticas foram calculadas para os casos avaliados experimentalmente, sendo eles os Casos 2, 3, 11, 12, 20, 21, 29 e 30. Os resultados foram exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Eficiência energética do sistema de mistura

Caso	Potência Mensurada (W)	Potência Teórica (W)	η (%)	β (°)	q	N (rpm)
2	0,96	0,1754	18,27	60	4	13
3	0,89	0,1671	18,78	90	4	13
11	1,40	0,3049	21,78	60	4	15
12	1,28	0,2343	18,30	90	4	15
20	2,25	0,4288	19,06	60	4	17
21	1,49	0,3799	25,50	90	4	17
29	2,45	0,4195	17,12	60	4	19
30	1,57	0,4796	30,55	90	4	19

Fonte: Autoria própria

Ao operar um tanque de cultivo com uma roda de 8 pás a 14 rpm, HUANG *et al.* (2015) obtiveram uma eficiência de 1,06%. Ao elevar a rotação para 20 rpm, a eficiência atingida foi de 2,41%. Estudo de CHIARAMONTI *et al.*, (2013a) reporta valores de eficiência da roda de pás entre 4 e 17%. Dessa forma, os valores encontrados no presente estudo foram compatíveis com aqueles encontrados na literatura.

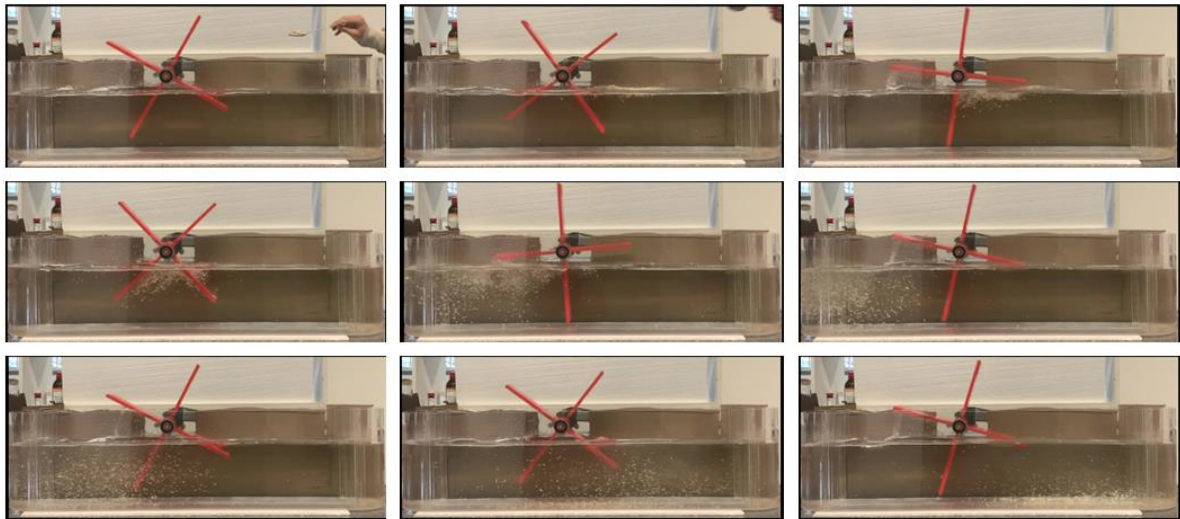
Os baixos valores de eficiência estão relacionados à fatores como escorregamento de acoplamentos e mancais, perdas térmicas nos fios condutores e utilização de motor impróprio para a operação nesse tipo de aplicação. Um cenário ideal é uma ligação direta entre motor e eixo, entretanto isso geralmente não é possível, visto a necessidade de grande redução de rotação entre motor elétrico e roda de pás.

Para o caso de maior IDM, ou seja, o Caso 29, as potências teórica e experimental por unidade de área foram, respectivamente, 1,82 W.m⁻² e 10,63 W.m⁻².

5.2.4. Visualização do perfil de escoamento

A Figura 38 exibe o escoamento com o auxílio de adição de aveia em flocos durante a operação do tanque protótipo com água. Foi possível observar a sedimentação das partículas maiores, enquanto as partículas menores circularam pelo tanque alternando entre as camadas superiores e inferiores do fluido, evidenciando a mistura na direção vertical do tanque. Observou-se que o movimento descendente ocorreu, majoritariamente, no canal reto do tanque, do lado oposto ao sistema de agitação.

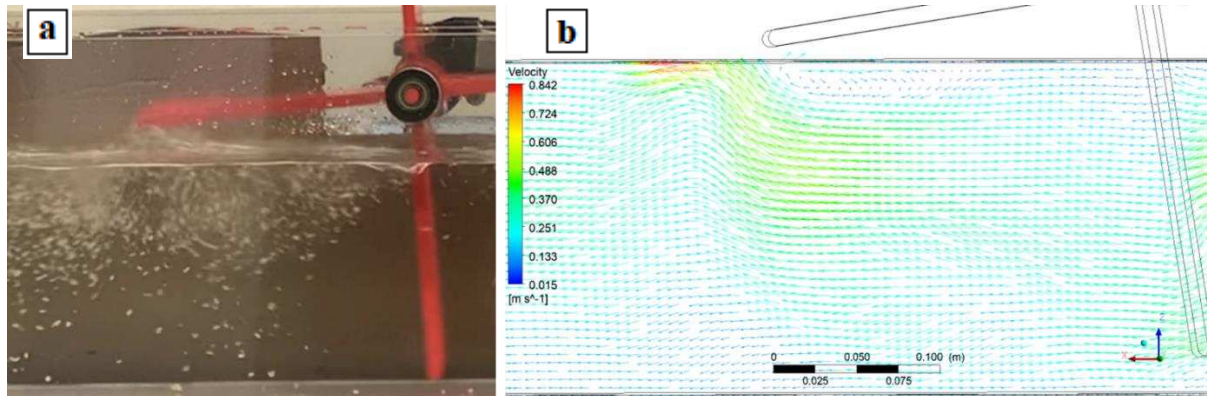
Figura 38 – Observação do escoamento pela adição de aveia em flocos na água com rotação das pás retas de 17 rpm.



Fonte: Autoria própria

A Figura 39 exibe a similaridade entre a fotografia do escoamento com aveia na água (Figura 39a) e o perfil de velocidades simulado (Figura 39b). A formação de um vórtice no momento de saída da pá do fluido foi observada, em concordância com as observações realizadas nas simulações transientes.

Figura 39 – Comparação do perfil de velocidade do escoamento simulado em CFD (Caso 21) com fotografia do escoamento com adição de aveia em flocos.



Fonte: Autoria própria

5.2.5. Avaliação dos efeitos da alteração da posição do eixo motriz

Foi realizada nova simulação para uma altura de eixo motriz de 110 mm para o Caso 29, sendo essa denominada como Caso 29b. A Tabela 8 destaca que houveram alterações nos valores dos indicadores avaliados nesse estudo.

Tabela 8 – Comparação dos indicadores para os casos 29 e 29b

Caso	1/IU	IMV	%ZM	Potência	IDM	IDM x Potência
29	3,93391	0,1087	2,21	0,4195	46,12	19,35
29b	3,247808	0,1007	9,33	0,2500	14,02	3,51

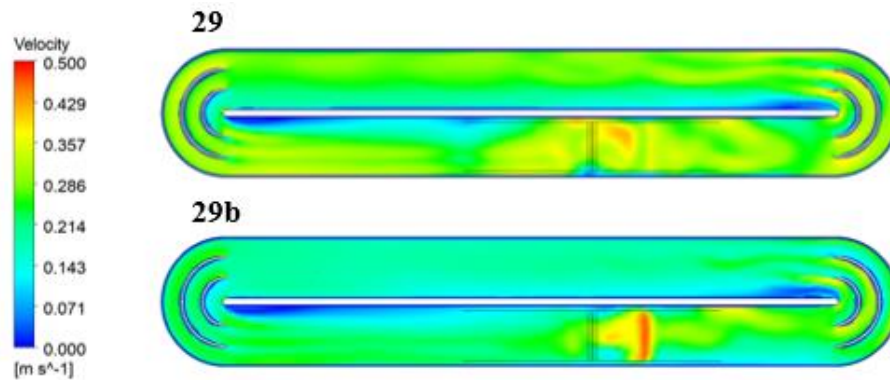
Fonte: Autoria própria

A elevação da altura do eixo causou uma redução na uniformidade da mistura, bem como no índice de mistura vertical. Esses valores foram menores no Caso 29b devido à menor interação das pás com o fluido, havendo menor quantidade de momento transferida das pás para a água. Como consequência, houveram também impactos na potência média consumida e no percentual de zonas mortas. O percentual de zonas mortas aumentou de 2,21% para 9,33% com a alteração de altura do eixo. A potência média necessária para agitação do fluido caiu de 0,4195 W para 0,2500 W. Assim, o IDM foi reduzido em cerca de 70% ao aumentar a altura do eixo motriz do sistema.

A Figura 40 compara a distribuição de velocidades na secção média do tanque nos Casos 29 e 29b. Observou-se que houveram menores velocidades de escoamento para o Caso 29b. É

importante salientar que as pontas das pás ficaram mais próximas à secção central após a elevação da altura do eixo. Com isso, as maiores diferenças dos perfis de velocidade ocorreram mais ao fundo do tanque. A velocidade média do escoamento no Caso 29b foi $0,1860 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 30% menor que no Caso 29.

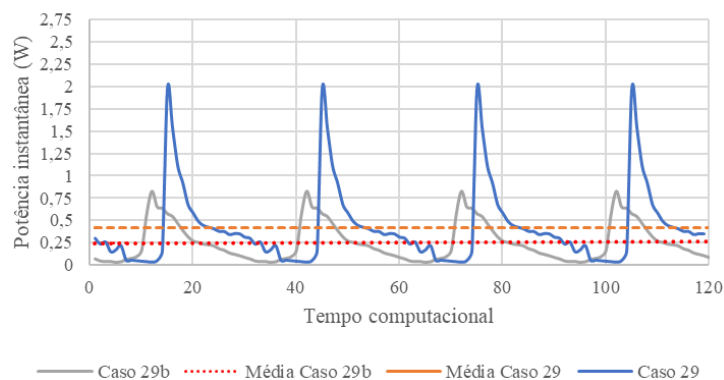
Figura 40 – Distribuição de velocidades de escoamento na secção a 100 mm do fundo do tanque para os Casos 29 e 29b na vista superior.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 41 são apresentadas as curvas de potência instantânea teórica para os casos 29 e 29b. Foram observados picos de potência cerca de 60% menores no Caso 29b. Isso aconteceu justamente pela alteração da região de entrada das pás na região fluída, uma vez que a área na ponta da pá é consideravelmente menor que na região central, diminuindo a potência necessária para romper a tensão superficial da água.

Figura 41 – Variação das potências teóricas instantâneas e médias em função do tempo computacional nos Casos 29 e 29b.



Fonte: Autoria própria

6. CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações para avaliação de 3 variáveis geométricas do sistema de agitação de um tanque *raceway* para cultivo de microalgas, sendo elas a quantidade de pás do *paddlewheel*, o ângulo construtivo pás (β) e a velocidade de rotação. Foram testadas as rotações de 13, 15, 17 e 19 rpm, os ângulos de 45°, 60° e 90° e rodas com 4, 6 e 8 pás, totalizando 36 casos.

Foram elaborados modelos para simulação do escoamento de fluido no tanque *raceway*, sendo esses desenvolvidos no software de CFD ANSYS CFX. Foi realizada discretização dos domínios computacionais com elementos de aresta 6 milímetros, para 40 divisões verticais do tanque.

Para os 36 casos analisados por meio de simulação numérica, foi observado que tanques operados com as rodas com maior quantidade de pás apresentaram velocidades médias mais altas, bem como que quanto maior a velocidade de rotação das pás, maior foi a velocidade média de escoamento do fluido no tanque.

Ademais, foi constatado que as pás retas, com um ângulo de construção de 90°, resultaram nas maiores velocidades médias de escoamento em comparação com ângulos de 60° e 45°, sendo que este último obteve as velocidades médias de escoamento mais baixas em todos os casos. As velocidades médias variaram entre 0,1575 m s⁻¹ (rotação de 13 rpm, 4 pás e ângulo de 45°) como mínimo e 0,2826 m s⁻¹ (rotação de 19 rpm, 8 pás e ângulo de 90°) como máximo.

Em termos de Índice de Mistura Vertical (IMV), as rodas com 8 pás obtiveram desempenhos inferiores em relação às de 4 e 6 pás. As rodas com 4 tiveram melhor desempenho em 50% dos casos avaliados em relação à mistura vertical.

Os maiores valores de Índice de Uniformidade da Mistura foram observados para as pás com ângulo construtivo de 45° nas rodas com 4 e 6 pás.

De forma geral, quanto maior o número de pás e a rotação do *paddlewheel*, maior foi a potência consumida pelo sistema de agitação. A potência teórica mínima de operação para os 36 casos avaliados foi 0,1671 W e ocorreu para a roda com 4 pás, ângulo de 90° e rotação de 13 rpm. Já a potência máxima ocorreu no caso da roda com 8 pás, ângulo de 45° e rotação de 19 rpm, com valor de 1,6884 W. O ângulo construtivo de 60° minimizou a potência consumida para agitação.

O percentual de zonas mortas foi menor para rodas operando em maiores velocidades e com maior quantidade de pás. Além disso, um maior ângulo construtivo proporcionou menores percentuais de zonas mortas.

Para a roda com 4 pás, ângulo de 60° e rotação de 19 rpm, foi observado o maior Índice de Desempenho da Mistura (IDM), sendo ele 46,12 W⁻¹. Portanto, essa configuração foi utilizada como modelo para a construção do protótipo do tanque.

Observou-se que os casos com os doze maiores valores de IDM tinham quatro pás, enquanto oito dos doze casos com os piores resultados de IDM possuíam 8 pás. Isso ocorreu devido à maior potência requerida para o funcionamento das rodas com um maior número de pás, enquanto as rodas com 4 pás consumiram uma potência menor.

Durante o funcionamento do tanque protótipo, observou-se que o ponto de contato inicial entre as pás e a superfície do fluido foi um parâmetro importante para o bom funcionamento do sistema. Para uma altura de 0,005 m entre o eixo motriz e a superfície, o contato das pás com o fluido ocorreu na região intermediária da pá, o que resultou em um maior esforço para vencer a inércia da água devido à maior área superficial. Outro fenômeno observado no funcionamento do protótipo foi a geração de um escoamento no sentido oposto ao natural, impulsionado pelas pontas das pás inclinadas em 60°.

As pás retas, quando operadas na rotação de 13 rpm, foram incapazes de manter as microalgas em suspensão durante a agitação. No teste de sedimentação livre, a absorbância percentual média após o final da agitação manual foi de $82,59 \pm 1,77$. Para a rotação de 15 rpm, a absorbância após o fim da agitação manual e início da agitação por pás foi, em média, de $94,53 \pm 2,63\%$ da inicial, enquanto para uma rotação de 17 rpm esses valores foram de $98,02 \pm 3,12\%$ dos valores iniciais.

No caso das pás inclinadas em 60°, para a rotação de 13 rpm houve diferença significativa nos resultados de absorbância em comparação ao teste de sedimentação livre. No caso das pás com ângulo de 60°, todas as rotações proporcionaram altos níveis de suspensão. Nas rotações de 13, 15 e 17 rpm, a absorbância após o fim da agitação manual e início da agitação por pás foi, em média, de $99,94 \pm 3,98\%$, $98,87 \pm 2,54\%$ e $100\% \pm 3,87\%$ dos valores iniciais, respectivamente.

Observou-se, de maneira geral, divergências entre os valores de velocidade calculados nas simulações e os obtidos por medição experimental no tanque protótipo. Essas variações ocorreram devido à ausência de ondulação da camada superficial e da formação de ondas no sentido oposto ao do escoamento na modelagem computacional, além do movimento pulsante do escoamento causado pelo aumento substancial de torque necessário quando as pás atuaram contra a inércia da coluna de fluido. Devido aos mesmos fatores, foram observadas

discrepâncias entre os valores de potência calculados por meio de CFD e aqueles calculados com base nos dados de corrente e tensão medidos experimentalmente.

No caso com o maior IDM, ou seja, roda com 4 pás, com ângulo construtivo de 60° e velocidade de rotação de 19 rpm, as potências teórica e experimental por unidade de área foram, respectivamente, 1,82 W m⁻² e 10,63 W m⁻².

A elevação da altura do eixo causou uma redução na uniformidade da mistura, assim como no índice de mistura vertical. Consequentemente, houve também impactos na potência média consumida e no percentual de zonas mortas. O percentual de zonas mortas aumentou de 2,21% para 9,33% com o aumento da altura do eixo. A potência média necessária para a agitação do fluido diminuiu de 0,4195 W para 0,2500 W. Assim, o IDM foi reduzido em aproximadamente 70% ao aumentar a altura do eixo motriz do sistema.

A partir dos resultados obtidos no presente estudo, recomenda-se a utilização de pás com ângulo construtivo de 60°, com intuito de reduzir a potência consumida pelo sistema de agitação. Recomenda-se a replicação desse estudo para aplicação em tanques de larga escala.

Conclui-se que os parâmetros geométricos da roda de pás desempenham importante papel na capacidade de agitação de um cultivo de microalgas. Assim, esses fatores influenciam tanto o rendimento de biomassa do cultivo quanto o consumo energético no processo, sendo de grande relevância para a viabilidade da aplicação de microalgas em escala industrial.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI, H.; CHEEMA, T. A.; PARK, C. W. Effect of Paddle-Wheel Pulsating Velocity on the Hydrodynamic Performance of High-Rate Algal Ponds. **Journal of Energy Engineering**, v. 141, n. 4, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000219](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000219)
- ARGYROPOULOS, C. D.; MARKATOS, N. C. Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, n. 2, p. 693–732, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.001>
- ARINA, N.; HIDAYAH, N.; HAZRIN-CHONG, H.; ROZAIMI, M. Algal contribution to organic carbon sequestration and its signatures in a tropical seagrass meadow. **Deep-Sea Research II**, v. 210, p. 105307, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2023.105307>. Acesso em: 2 jul. 2023.
- CALIJURI, M. L.; SILVA, T. A.; MAGALHÃES, I. B.; PEREIRA, A. S. A. de P.; MARANGON, B. B.; ASSIS, L. R. de; LORENTZ, J. F. Bioproducts from microalgae biomass: Technology, sustainability, challenges and opportunities. **Chemosphere**, v. 305, p. 135508, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135508>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- CHIARAMONTI, D.; PRUSSI, M.; CASINI, D.; TREDICI, M. R.; RODOLFI, L.; BASSI, N.; ZITTELLI, G. C.; BONDIOLI, P. Review of energy balance in raceway ponds for

microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. **Applied Energy**, v. 102, p. 101–111, 2013 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.040>

CHIARAMONTI, D.; PRUSSI, M.; CASINI, D.; TREDICI, M. R.; RODOLFI, L.; BASSI, N.; ZITTELLI, G. C.; BONDIOLI, P. Review of energy balance in raceway ponds for microalgae cultivation: Re-thinking a traditional system is possible. **Applied Energy**, v. 102, p. 101–111, 2013 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.040>. Acesso em: 27 set. 2022.

CHOI, H. II; SUNG, Y. J.; HONG, M. E.; HAN, J.; MIN, B. K.; SIM, S. J. Reconsidering the potential of direct microalgal biomass utilization as end-products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 155, n. March 2021, p. 111930, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111930>

CICHOŃSKI, J.; CHRZANOWSKI, G. Microalgae as a Source of Valuable Phenolic Compounds and Carotenoids. **Molecules**, v. 27, n. 24, p. 8852, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27248852>. Acesso em: 2 fev. 2023.

CYANOTECH. **Purpose**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.cyanotech.com/our-purpose/>. Acesso em: 16 ago. 2023.

ELTANAHY, E.; SALIM, S.; VADIVELOO, A.; VERDUIN, J. J.; PAIS, B.; MOHEIMANI, N. R. Comparison between jet and paddlewheel mixing for the cultivation of microalgae in anaerobic digestate of piggery effluent (ADPE). **Algal Research**, v. 35, p. 274–282, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.08.025>

EMALYA, N.; MAIRIZA, L.; BILQIS, P. Z.; SUHENDRAYATNA, S.; MUNAWAR, E.; YUNARDI, Y. Removal of Organic and Nitrogen Compounds from Domestic Landfill Leachate by Microalgae. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 13, n. 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.33263/BRIAC132.131>. Acesso em: 3 fev. 2023.

FRADIQUE, M.; BATISTA, A. P.; NUNES, M. C.; GOUVEIA, L.; BANDARRA, N. M.; RAYMUNDO, A. Isochrysis galbana and Diacronema vlkianum biomass incorporation in pasta products as PUFA's source. **LWT**, v. 50, n. 1, p. 312–319, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.006>

GAROFALO, C.; NORICI, A.; MOLLO, L.; OSIMANI, A.; AQUILANTI, L. Fermentation of Microalgal Biomass for Innovative Food Production. **Microorganisms**, v. 10, n. 10, p. 2069, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10102069>. Acesso em: 2 fev. 2023.

GRIFFITHS, M. J.; GARCIN, C.; VAN HILLE, R. P.; HARRISON, S. T. L. Interference by pigment in the estimation of microalgal biomass concentration by optical density. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2011.02.005>

GROSSHAGAUER, S.; KRAEMER, K.; SOMOZA, V. **The True Value of Spirulina**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b08251>. Acesso em: 3 fev. 2023.

HADIYANTO, H.; ELMORE, S.; VAN GERVEN, T.; STANKIEWICZ, A. Hydrodynamic evaluations in high rate algae pond (HRAP) design. **Chemical Engineering Journal**, v. 217, p. 231–239, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.015>. Acesso em: 2 ago. 2022.

HAN, P.; LU, Q.; FAN, L.; ZHOU, W. A review on the use of microalgae for sustainable aquaculture. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 9, n. 11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9112377>. Acesso em: 10 fev. 2023.

HEREDIA FALCONÍ, J. H.; SOARES, J.; ROCHA, D. N.; GOMES MARÇAL VIEIRA VAZ, M.; MARTINS, M. A. Strain screening and ozone pretreatment for algae farming in wastewaters from sugarcane ethanol biorefinery. **Journal of Cleaner Production**, v. 282, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124522>. Acesso em: 3 fev. 2023.

HREIZ, R.; SIALVE, B.; MORCHAIN, J. Ô.; ESCUDIÉ, R.; STEYER, J.-P. P.; GUIRAUD, P. Experimental and numerical investigation of hydrodynamics in raceway reactors used for algaculture. **Chemical Engineering Journal**, v. 250, p. 230–239, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.03.027>. Acesso em: 2 ago. 2022.

HUANG, J.; QU, X.; WAN, M.; YING, J.; LI, Y.; ZHU, F.; WANG, J.; SHEN, G.; CHEN, J.; LI, W. 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, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.012>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INOSTROZA, C.; SOLIMENO, A.; GARCÍA, J.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; ACIÉN, F. G. Improvement of real-scale raceway bioreactors for microalgae production using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Algal Research**, v. 54, p. 2211–9264, 2021 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102207>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INOSTROZA, C.; SOLIMENO, A.; GARCÍA, J.; FERNÁNDEZ-SEVILLA, J. M.; ACIÉN, F. G. Improvement of real-scale raceway bioreactors for microalgae production using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Algal Research**, v. 54, 2021 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102207>. Acesso em: 2 ago. 2022.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Biofábrica transforma microalgas em operárias**. [s. l.], 2014. Disponível em: <https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=biofabrica-transforma-microalgas-operarias&id=010160141010>. Acesso em: 16 ago. 2023.

JAVED, F. *et al.* Microalgae-based biofuels, resource recovery and wastewater treatment: A pathway towards sustainable biorefinery. **Fuel**, v. 255, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115826>. Acesso em: 3 fev. 2023.

KOWTHAMAN, C. N.; SENTHIL KUMAR, P.; ARUL MOZHI SELVAN, V.; GANESH, D. A comprehensive insight from microalgae production process to characterization of biofuel for the sustainable energy. **Fuel**, v. 310, n. PB, p. 122320, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122320>

KUSMAYADI, A.; LEONG, Y. K.; YEN, H. W.; HUANG, C. Y.; CHANG, J. S. Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans – Biotechnological and environmental aspects. **Chemosphere**, v. 271, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129800>. Acesso em: 3 fev. 2023.

KUSMAYADI, A.; PHILIPPIDIS, G. P.; YEN, H. W. 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, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.06.013>. Acesso em: 2 ago. 2022.

- KUSMAYADI, A.; SUYONO, E. A.; NAGARAJAN, D.; CHANG, J. S.; YEN, H. W. Application of computational fluid dynamics (CFD) on the raceway design for the cultivation of microalgae: a review. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology**, v. 47, n. 4–5, p. 373–382, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10295-020-02273-9>. Acesso em: 20 out. 2022.
- LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 269–289, 1974. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- LEE, E. H.; PARK, J.-E.; CHOI, Y.-J.; HUH, K.-B.; KIM, W.-Y. A randomized study to establish the effects of spirulina in type 2 diabetes mellitus patients. **Nutrition Research and Practice**, v. 2, n. 4, p. 295, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.4162/nrp.2008.2.4.295>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- LEVASSEUR, W.; PERRÉ, P.; POZZOBON, V. A review of high value-added molecules production by microalgae in light of the classification. **Biotechnology Advances**, v. 41, p. 107545, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107545>
- LI, S.; LI, X.; HO, S. H. Microalgae as a solution of third world energy crisis for biofuels production from wastewater toward carbon neutrality: An updated review. **Chemosphere**, v. 291, p. 132863, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132863>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- LI, Y.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; WU, X.; CONG, W. Evaluation of power consumption of paddle wheel in an open raceway pond. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 37, n. 7, p. 1325–1336, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1103-3>
- LIFFMAN, K.; PATERSON, D. A.; LIOVIC, P.; BANDOPADHAYAY, P. 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, 2013 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.08.007>
- LIFFMAN, K.; PATERSON, D. A.; LIOVIC, P.; BANDOPADHAYAY, P. 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, 2013 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2012.08.007>. Acesso em: 28 set. 2022.
- LIMA, A.; MARINHO, B.; MORAIS, T. **Hydrodynamic analysis of flow in raceway ponds for algae cultivation under versatile conditions**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10499-020-00606-0>
- LIRA, R. A.; MARTINS, M. A.; MACHADO, M. F.; CORRÊDO, L. P.; MATOS, A. T. As Microalgas como Alternativa à Produção de Biocombustíveis. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 20, n. 5, p. 389–403, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/1414-3984.v20n05a01>
- MOLINA-MIRAS, A.; LÓPEZ-ROSALES, L.; CERÓN-GARCÍA, M. C.; SÁNCHEZ-MIRÓN, A.; GARCÍA-CAMACHO, F.; CONTRERAS-GÓMEZ, A.; MOLINA-GRIMA, E. A new approach to finding optimal centrifugation conditions for shear-sensitive microalgae. **Algal Research**, v. 44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101677>. Acesso em: 10 fev. 2023.

- MOLINA GRIMA, E.; BELARBI, E. H.; ACIÉN FERNÁNDEZ, F. G.; ROBLES MEDINA, A.; CHISTI, Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. **Biotechnology Advances**, v. 20, n. 7–8, p. 491–515, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0734-9750\(02\)00050-2](https://doi.org/10.1016/S0734-9750(02)00050-2). Acesso em: 9 fev. 2023.
- NICODEMOU, A.; KALLIS, M.; KOUTINAS, M. Biorefinery development for the production of polyphenols, algal biomass and lipids using olive processing industry waste. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 32, p. 2352–5541, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.100998>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- PANDEY, R.; 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, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-016-1712-8>
- PARK, S.; LI, Y. 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, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bit.25509>
- PRUSSI, M.; BUFFI, M.; CASINI, D.; CHIARAMONTI, D.; MARTELLI, F.; CARNEVALE, M.; TREDICI, M. R.; RODOLFI, L. Experimental and numerical investigations of mixing in raceway ponds for algae cultivation. **Biomass and Bioenergy**, v. 67, p. 390–400, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.024>
- PRUVOST, J.; POTTIER, L.; LEGRAND, J. Numerical investigation of hydrodynamic and mixing conditions in a torus photobioreactor. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 14, p. 4476–4489, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.02.027>
- RANGANATHAN, P.; KUMAR PANDEY, A.; SIROHI, R.; HOANG, A. T.; KIM, S.-H. Recent advances in computational fluid dynamics (CFD) modelling of photobioreactors: Design and applications. **Bioresource Technology**, v. 350, p. 126920, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126920>. Acesso em: 11 fev. 2023.
- ROCHA, D. N.; MARTINS, M. A.; SOARES, J.; VAZ, M. G. M. V.; DE OLIVEIRA LEITE, M.; COVELL, L.; MENDES, L. B. B. Combination of trace elements and salt stress in different cultivation modes improves the lipid productivity of *Scenedesmus* spp. **Bioresource Technology**, v. 289, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121644>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- RODRÍGUEZ-PALACIO, M. C.; CABRERA-CRUZ, R. B. E.; ROLÓN-AGUILAR, J. C.; TOBIÁS-JARAMILLO, R.; MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ, M.; LOZANO-RAMÍREZ, C. The cultivation of five microalgae species and their potential for biodiesel production. **Energy, Sustainability and Society**, v. 12, n. 1, p. 1–6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00337-5>. Acesso em: 3 fev. 2023.
- ROSELLO SASTRE, R.; CSÖGÖR, Z.; PERNER-NOCHTA, I.; FLECK-SCHNEIDER, P.; POSTEN, C. Scale-down of microalgae cultivations in tubular photo-bioreactors-A conceptual approach. **Journal of Biotechnology**, v. 132, n. 2, p. 127–133, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2007.04.022>. Acesso em: 10 fev. 2023.
- SAJJADI, B.; CHEN, W. Y.; RAMAN, A. A. A.; IBRAHIM, S. Microalgae lipid and biomass for biofuel production: A comprehensive review on lipid enhancement strategies and

their effects on fatty acid composition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 200–232, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.050>. Acesso em: 3 fev. 2023.

SAWANT, S. S.; GOSAVI, S. N.; KHADAMKAR, H. P.; MATHPATI, C. S.; PANDIT, R.; LALI, A. M. Energy efficient design of high depth raceway pond using computational fluid dynamics. **Renewable Energy**, v. 133, p. 528–537, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.016>

SINGHA, N. B.; KUMAR DEB, U.; SHAHRIAR, M. Investigation of Flow Dynamics for a Microalgae Suspension in an Open Pond System. **American Journal of Computational Mathematics**, v. 7, p. 195–207, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajcm.2017.73018>. Acesso em: 2 ago. 2022.

SOMPECH, K.; CHISTI, Y.; SRINOPHAKUN, T. Design of raceway ponds for producing microalgae. **Biofuels**, v. 3, n. 4, p. 387–397, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.4155/bfs.12.39>. Acesso em: 10 fev. 2023.

TERASHIMA, M.; GOEL, R.; KOMATSU, K.; YASUI, H.; TAKAHASHI, H.; LI, Y. Y.; NOIKE, T. CFD simulation of mixing in anaerobic digesters. **Bioresource Technology**, v. 100, n. 7, p. 2228–2233, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.069>

THUY LAN CHI, N.; MATHIMANI, T.; MANIGANDAN, S.; SHANMUGAM, S.; THI HA, N.; CAM NHUNG, T.; ALI ALHARBI, S.; CHINNATHAMBI, A.; BRINDHADEVI, K.; CHANASUT, U.; WHANGCHAI, K. Small scale photobioreactor, outdoor open pond cultivation of *Chlorella* sp. and harvesting at log and stationary growth phase towards lipids and methyl ester production. **Fuel**, v. 319, n. March, p. 123813, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123813>

TORRES-TIJI, Y.; FIELDS, F. J.; MAYFIELD, S. P. Microalgae as a future food source. **Biotechnology Advances**, v. 41, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107536>. Acesso em: 3 fev. 2023.

VIEIRA, B. B.; SOARES, J.; AMORIM, M. L.; BITTENCOURT, P. V. Q.; DE CÁSSIA SUPERBI, R.; DE OLIVEIRA, E. B.; DOS REIS COIMBRA, J. S.; MARTINS, M. A. Optimized extraction of neutral carbohydrates, crude lipids and photosynthetic pigments from the wet biomass of the microalga *Scenedesmus obliquus* BR003. **Separation and Purification Technology**, v. 269, p. 1383–5866, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118711>. Acesso em: 3 fev. 2023.

XU, B.; LI, P.; WALLER, P. Study of the flow mixing in a novel ARID raceway for algae production. **Renewable Energy**, v. 62, p. 249–257, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.049>. Acesso em: 20 out. 2022.

XU, B.; LIU, T.; XIA, Y.; LI, W.; HUO, X.; GAO, H.; CHEN, Z.; LIU, H. Computational fluid dynamics prediction of the aerodynamic difference between stationary and moving trains. **Alexandria Engineering Journal**, v. 70, p. 685–699, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.022>. Acesso em: 22 maio. 2023.

YANG, Z.; CHENG, J.; YE, Q.; LIU, J.; ZHOU, J.; CEN, K. 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, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.094>

YUSOF, S. N. A.; ASAKO, Y.; SIDIK, N. A. C.; MOHAMED, S. B.; JAPAR, W. M. A. A. A short review on rans turbulence models. **CFD Letters**, v. 12, n. 11, p. 83–96, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.37934/cfdl.12.11.8396>

ZEINALIAN, R.; FARHANGI, M. A.; SHARIAT, A.; SAGHAFI-ASL, M. The effects of *Spirulina Platensis* on anthropometric indices, appetite, lipid profile and serum vascular endothelial growth factor (VEGF) in obese individuals: A randomized double blinded placebo controlled trial. **BMC Complementary and Alternative Medicine**, v. 17, n. 1, p. 1–8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12906-017-1670-y>. Acesso em: 3 fev. 2023.

ZENG, F.; HUANG, J.; MENG, C.; ZHU, F.; CHEN, J.; LI, Y. 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, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00449-015-1501-9>

ZHAO, Q.; HAN, F.; YOU, Z.; HUANG, Y.; SHE, X. Evaluation of the relationship of wastewater treatment and biodiesel production by microalgae cultivated in the photobioreactor. **Fuel**, v. 350, p. 128750, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128750>. Acesso em: 2 jul. 2023.

APÊNDICE A – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DO CASO 35

This run of the CFX 2019 R2 Solver started at 11:29:50 on 23 Mar 2023
by user gabri on DESKTOP-ISUKFE7 (intel_xeon64.sse2_winnt) using the
command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v194\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch  
-ccl runInput.ccl -fullname "Fluid Flow CFX_001"
```

2019 R2

Point Releases and Patches installed:

ANSYS, Inc. Products 2019 R2

SpaceClaim 2019 R2

AIM 2019 R2

Live (includes SpaceClaim) 2019 R2

Autodyn 2019 R2

LS-DYNA 2019 R2

CFX (includes CFD-Post) 2019 R2

Chemkin 2019 R2

EnSight 2019 R2

FENSAP-ICE 2019 R2

Fluent (includes CFD-Post) 2019 R2

Forte 2019 R2

Polyflow (includes CFD-Post) 2019 R2

TurboGrid 2019 R2

ICEM CFD 2019 R2

Aqwa 2019 R2

Icepak (includes CFD-Post) 2019 R2

ACIS Geometry Interface 2019 R2

AutoCAD Geometry Interface 2019 R2
 Catia, Version 4 Geometry Interface 2019 R2
 Catia, Version 6 Geometry Interface 2019 R2
 Creo Elements/Direct Modeling Geometry Interface 2019 R2
 Creo Parametric Geometry Interface 2019 R2
 Inventor Geometry Interface 2019 R2
 JTOpen Geometry Interface 2019 R2
 NX Geometry Interface 2019 R2
 Parasolid Geometry Interface 2019 R2
 Solid Edge Geometry Interface 2019 R2
 SOLIDWORKS Geometry Interface 2019 R2
 ANSYS, Inc. License Manager 2019 R2

Setting up CFX Solver run ...

```

+-----+
|                                     |
|           CFX Command Language for Run           |
|                                     |
+-----+
  
```

LIBRARY:

MATERIAL: Water

Material Description = Water (liquid)

Material Group = Water Data, Constant Property Liquids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Liquid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 997.0 [kg m⁻³]

Molar Mass = 18.02 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 0.6069 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 1.0 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

THERMAL EXPANSIVITY:

Option = Value

Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K⁻¹]

END

END

END

END

FLOW: Flow Analysis 1

SOLUTION UNITS:

Angle Units = [rad]

Length Units = [m]

Mass Units = [kg]

Solid Angle Units = [sr]

Temperature Units = [K]

Time Units = [s]

END

ANALYSIS TYPE:

Option = Transient

EXTERNAL SOLVER COUPLING:

Option = None

END

INITIAL TIME:

Option = Automatic with Value

Time = 0 [s]

END

TIME DURATION:

Option = Total Time

Total Time = 16 [s]

END

TIME STEPS:

Option = Timesteps

Timesteps = 0.01316 [s]

END

END

DOMAIN: Default Domain

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Fluid

Location = B102

BOUNDARY: Default Domain Default

Boundary Type = WALL

Location = \

F104.102,F105.102,F106.102,F107.102,F108.102,F109.102,F110.102,F111.1\
02,F112.102,F113.102,F114.102,F115.102,F116.102,F117.102,F118.102,F11\
9.102,F120.102,F121.102,F122.102,F123.102,F124.102,F125.102,F126.102,\
F127.102,F128.102,F129.102,F130.102,F131.102,F132.102,F133.102,F134.1\
02,F135.102,F136.102

BOUNDARY CONDITIONS:

MASS AND MOMENTUM:

Option = No Slip Wall

```
END
WALL ROUGHNESS:
  Option = Smooth Wall
END
END
END
BOUNDARY: top
  Boundary Type = WALL
  Location = top
BOUNDARY CONDITIONS:
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Free Slip Wall
  END
END
END
DOMAIN MODELS:
  BUOYANCY MODEL:
    Option = Non Buoyant
  END
  DOMAIN MOTION:
    Option = Stationary
  END
  MESH DEFORMATION:
    Option = None
  END
  REFERENCE PRESSURE:
    Reference Pressure = 1 [atm]
  END
END
```

FLUID DEFINITION: Fluid 1

Material = Water

Option = Material Library

MORPHOLOGY:

Option = Continuous Fluid

END

END

FLUID MODELS:

COMBUSTION MODEL:

Option = None

END

HEAT TRANSFER MODEL:

Option = None

END

THERMAL RADIATION MODEL:

Option = None

END

TURBULENCE MODEL:

Option = k epsilon

END

TURBULENT WALL FUNCTIONS:

Option = Scalable

END

END

INITIALISATION:

Option = Automatic

INITIAL CONDITIONS:

Velocity Type = Cartesian

CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:

```
Option = Automatic with Value
U = 0 [m s^-1]
V = 0 [m s^-1]
W = 0 [m s^-1]
END
STATIC PRESSURE:
Option = Automatic with Value
Relative Pressure = 1 [atm]
END
TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:
Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
DOMAIN: Pas
Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Immersed Solid
Location = B601
BOUNDARY: Pas Default
Boundary Type = WALL
Location = \
F602.601,F603.601,F604.601,F605.601,F606.601,F607.601,F608.601,F609.6\
01,F610.601,F611.601,F612.601,F613.601,F614.601,F615.601,F616.601,F61\
7.601,F618.601,F619.601,F620.601,F621.601,F622.601,F623.601,F624.601,\
F625.601,F626.601,F627.601,F628.601,F629.601,F630.601,F631.601,F632.6\
01,F633.601,F634.601,F635.601
END
DOMAIN MODELS:
```

DOMAIN MOTION:

Angular Velocity = 19 [rev min⁻¹]

Option = Rotating

AXIS DEFINITION:

Option = Two Points

Rotation Axis From = 0.595 [m], -0.015 [m], 0.25 [m]

Rotation Axis To = 0.595 [m], -0.25 [m], 0.25 [m]

END

END

END

END

OUTPUT CONTROL:

MONITOR OBJECTS:

MONITOR BALANCES:

Option = Full

END

MONITOR FORCES:

Option = Full

END

MONITOR PARTICLES:

Option = Full

END

MONITOR POINT: Monitor Point Channel

Cartesian Coordinates = 0.7 [m], 0.05 [m], 0.045 [m]

Coord Frame = Coord 0

Option = Cartesian Coordinates

Output Variables List = Velocity

MONITOR LOCATION CONTROL:

Interpolation Type = Nearest Vertex

END

POSITION UPDATE FREQUENCY:

Option = Initial Mesh Only

END

END

MONITOR POINT: Monitor Point Pas

Cartesian Coordinates = 0.7 [m], -0.05 [m], 0.045 [m]

Coord Frame = Coord 0

Option = Cartesian Coordinates

Output Variables List = Velocity

MONITOR LOCATION CONTROL:

Interpolation Type = Nearest Vertex

END

POSITION UPDATE FREQUENCY:

Option = Initial Mesh Only

END

END

MONITOR RESIDUALS:

Option = Full

END

MONITOR TOTALS:

Option = Full

END

END

RESULTS:

File Compression Level = Default

Option = Standard

END

TRANSIENT RESULTS: Results

File Compression Level = Default
Option = Smallest
OUTPUT FREQUENCY:
Option = Every Timestep
END
END
END
SOLVER CONTROL:
Turbulence Numerics = First Order
ADVECTION SCHEME:
Option = High Resolution
END
CONVERGENCE CONTROL:
Maximum Number of Coefficient Loops = 10
Minimum Number of Coefficient Loops = 1
Timescale Control = Coefficient Loops
END
CONVERGENCE CRITERIA:
Residual Target = 1.E-4
Residual Type = RMS
END
IMMERSED SOLID CONTROL:
BOUNDARY MODEL:
Option = None
END
END
INTERRUPT CONTROL:
Option = Any Interrupt
CONVERGENCE CONDITIONS:

```
    Option = Default Conditions
END
END
TRANSIENT SCHEME:
    Option = Second Order Backward Euler
TIMESTEP INITIALISATION:
    Option = Automatic
END
END
END
COMMAND FILE:
    Version = 19.4
    Results Version = 19.4
END
SIMULATION CONTROL:
EXECUTION CONTROL:
EXECUTABLE SELECTION:
    Double Precision = No
    Large Problem = No
END
INTERPOLATOR STEP CONTROL:
    Runtime Priority = Standard
MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
END
END
PARALLEL HOST LIBRARY:
    HOST DEFINITION: desktopisukfe7
```

Remote Host Name = DESKTOP-ISUKFE7

Host Architecture String = winnt-amd64

Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%v\CFX

END

END

PARTITIONER STEP CONTROL:

Multidomain Option = Automatic

Runtime Priority = Standard

MEMORY CONTROL:

Memory Allocation Factor = 1.0

END

PARTITION SMOOTHING:

Maximum Partition Smoothing Sweeps = 100

Option = Smooth

END

PARTITIONING TYPE:

MeTiS Type = k-way

Option = MeTiS

Partition Size Rule = Automatic

END

END

RUN DEFINITION:

Run Mode = Full

Solver Input File = Fluid Flow CFX.def

Solver Results File = \

C:/CFD-aula/Arquivo35_pending/dp0_CFX_1_Solution_1/Fluid Flow \

CFX_001.res

END

SOLVER STEP CONTROL:

Runtime Priority = Standard

MEMORY CONTROL:

Memory Allocation Factor = 1.0

END

PARALLEL ENVIRONMENT:

Number of Processes = 1

Start Method = Serial

END

END

END

END

```
+-----+
|                                     |
|           Solver                    |
|                                     |
+-----+
```

```
+-----+
|                                     |
|           ANSYS(R) CFX(R) Solver   |
|                                     |
| 2019 R2                             |
| Build 19.4 2019-04-08T23:34:08.549000 |
| Tue Apr 9 01:56:35 GMTDT 2019     |
```

```

|
|           Executable Attributes           |
|
|           single-64bit-int32-archfort-optimised-std-lcomp           |
|
| (C) 1996-2019 ANSYS, Inc.                |
|
| All rights reserved. Unauthorized use, distribution or duplication |
| is prohibited. This product is subject to U.S. laws governing     |
| export and re-export. For full Legal Notice, see documentation.   |
+-----+

```

```

+-----+
|           Job Information at Start of Run           |
+-----+

```

Run mode: serial run

Host computer: DESKTOP-ISUKFE7 (PID:9596)

Job started: Thu Mar 23 11:29:51 2023

```

+-----+
|           License Information           |
+-----+

```

License Cap: ANSYS CFX Solver (Max 512K Nodes)

License ID: DESKTOP-ISUKFE7-SISTEMA-15684-038113

INFO: Your license enables 4-way parallel execution.

For faster simulations, please start the application with the appropriate parallel options.

```

+-----+
| Memory Allocated for Run (Actual usage may be less) |
+-----+
  
```

	Real	Integer	Character	Logical	Double
Mwords	113.81	30.78	7.84	0.12	1.21
Mbytes	434.16	117.41	7.48	0.46	9.22

```

+-----+
| Host Memory Information (Mbytes) |
+-----+
| Host | System | Allocated | % |
+-----+
| DESKTOP-ISUKFE7 | 16106.79 | 568.72 | 3.53 |
+-----+
  
```

```

+-----+
| Topology Simplification |
  
```

```

+-----+
+-----+
|          ***** Warning *****          |
|                                          |
| Topology simplification is activated with the following |
| restrictions:                               |
|                                          |
| - Mesh regions referenced only within User Fortran and NOT |
|   in the command file will cause the solver to stop.      |
| - The solver will stop during any "Edit Run in Progress" step |
|   if new 2D regions are referenced.                |
+-----+
+-----+
|          Mesh Statistics          |
+-----+
| Domain Name      | Orthog. Angle | Exp. Factor | Aspect Ratio |
+-----+-----+-----+-----+
|          | Minimum [deg] | Maximum    | Maximum    |
+-----+-----+-----+-----+
| Default Domain  | 55.4 OK | 7 ok | 13 OK |
| Pas            | 63.2 OK | 5 OK | 4 OK |
| Global         | 55.4 OK | 7 ok | 13 OK |
+-----+-----+-----+-----+
|          | %! %ok %OK | %! %ok %OK | %! %ok %OK |
+-----+-----+-----+-----+
| Default Domain  | 0 0 100 | 0 <1 100 | 0 0 100 |
| Pas            | 0 0 100 | 0 0 100 | 0 0 100 |

```

```
| Global      | 0  0 100 | 0 <1 100 | 0  0 100 |
+-----+-----+-----+-----+
```

Domain Name : Default Domain

Total Number of Nodes	=	373879
Total Number of Elements	=	342200
Total Number of Prisms	=	1320
Total Number of Hexahedrons	=	340880
Total Number of Faces	=	63870

Domain Name : Pas

Total Number of Nodes	=	51440
Total Number of Elements	=	36114
Total Number of Prisms	=	546
Total Number of Hexahedrons	=	35568
Total Number of Faces	=	30400

Global Statistics :

Global Number of Nodes	=	425319
Global Number of Elements	=	378314
Total Number of Prisms	=	1866

Total Number of Hexahedrons = 376448

Global Number of Faces = 94270

```

+-----+
|           Reference Pressure Information           |
+-----+

```

Domain Group: Default Domain

Pressure has not been set at any boundary conditions.

The pressure will be set to 0.00000E+00 at the following location:

Domain : Default Domain

Node : 1 (equation 1)

Coordinates : (2.38705E-02,-1.28118E-02, 5.00000E-03).

```

+-----+
|           User Defined Monitor Information           |
+-----+

```

Monitor Point: Monitor Point Pas

Domain: Default Domain

User specified location (x,y,z) : 7.000E-01, -5.000E-02, 4.500E-02

Assigned node location (x,y,z) : 6.985E-01, -5.033E-02, 4.500E-02

Assigned node number : 91698

Distance to specified location : 1.555E-03

Valid variables from output variable list:

Velocity

Monitor Point: Monitor Point Channel

Domain: Default Domain

User specified location (x,y,z) : 7.000E-01, 5.000E-02, 4.500E-02

Assigned node location (x,y,z) : 6.985E-01, 5.033E-02, 4.500E-02

Assigned node number : 44469

Distance to specified location : 1.576E-03

Valid variables from output variable list:

Velocity

```

+-----+
|           Average Scale Information           |
+-----+

```

Domain Name : Default Domain

Global Length	= 3.5855E-01
Minimum Extent	= 2.0000E-01
Maximum Extent	= 1.2000E+00
Density	= 9.9700E+02
Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04
Velocity	= 0.0000E+00

Domain Name : Pas

Global Length	= 1.1436E-01
Minimum Extent	= 8.0000E-02
Maximum Extent	= 4.6122E-01

```

+-----+
|           Checking for Isolated Fluid Regions           |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
|           The Equations Solved in This Calculation           |
+-----+

```

Equations are given two labels: the individual name and a combined name used for combining residuals together. Residuals for multidomain problems are combined provided the domains are connected together and have the same domain type (solid or fluid/porous). If there are multiple groups of the same domain type, then the group residual is identified by the name of the first domain in the connected group.

The individual and combined equation names are given below.

Subsystem : Momentum and Mass

U-Mom-Default Domain	--> U-Mom
V-Mom-Default Domain	--> V-Mom
W-Mom-Default Domain	--> W-Mom
P-Mass-Default Domain	--> P-Mass

Subsystem : TurbKE and Diss.K

K-TurbKE-Default Domain --> K-TurbKE
E-Diss.K-Default Domain --> E-Diss.K

CFD Solver started: Thu Mar 23 11:29:53 2023

APÊNDICE B – CÓDIGO DA SIMULAÇÃO DO CASO 1

This run of the CFX 2019 R2 Solver started at 18:55:55 on 29 Mar 2023
by user gabri on DESKTOP-ISUKFE7 (intel_xeon64.sse2_winnt) using the
command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v194\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch  
-ccl runInput.ccl -fullname "Fluid Flow CFX_002"
```

2019 R2

Point Releases and Patches installed:

ANSYS, Inc. Products 2019 R2

SpaceClaim 2019 R2

AIM 2019 R2

Live (includes SpaceClaim) 2019 R2

Autodyn 2019 R2

LS-DYNA 2019 R2

CFX (includes CFD-Post) 2019 R2

Chemkin 2019 R2

EnSight 2019 R2

FENSAP-ICE 2019 R2

Fluent (includes CFD-Post) 2019 R2

Forte 2019 R2

Polyflow (includes CFD-Post) 2019 R2

TurboGrid 2019 R2

ICEM CFD 2019 R2

Aqwa 2019 R2

Icepak (includes CFD-Post) 2019 R2

ACIS Geometry Interface 2019 R2
 AutoCAD Geometry Interface 2019 R2
 Catia, Version 4 Geometry Interface 2019 R2
 Catia, Version 6 Geometry Interface 2019 R2
 Creo Elements/Direct Modeling Geometry Interface 2019 R2
 Creo Parametric Geometry Interface 2019 R2
 Inventor Geometry Interface 2019 R2
 JTOpen Geometry Interface 2019 R2
 NX Geometry Interface 2019 R2
 Parasolid Geometry Interface 2019 R2
 Solid Edge Geometry Interface 2019 R2
 SOLIDWORKS Geometry Interface 2019 R2
 ANSYS, Inc. License Manager 2019 R2

Setting up CFX Solver run ...

```

+-----+
|                                     |
|           CFX Command Language for Run           |
|                                     |
+-----+

```

LIBRARY:

MATERIAL: Water

Material Description = Water (liquid)

Material Group = Water Data, Constant Property Liquids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Liquid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 997.0 [kg m⁻³]

Molar Mass = 18.02 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 0.6069 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 1.0 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

THERMAL EXPANSIVITY:

Option = Value

Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K⁻¹]

END

END

END

END

FLOW: Flow Analysis 1

SOLUTION UNITS:

Angle Units = [rad]

Length Units = [m]

Mass Units = [kg]

Solid Angle Units = [sr]

Temperature Units = [K]

Time Units = [s]

END

ANALYSIS TYPE:

Option = Transient

EXTERNAL SOLVER COUPLING:

```
Option = None
END
INITIAL TIME:
Option = Automatic with Value
Time = 0 [s]
END
TIME DURATION:
Option = Total Time
Total Time = 25 [s]
END
TIME STEPS:
Option = Timesteps
Timesteps = 0.03846 [s]
END
END
DOMAIN: Default Domain
Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Fluid
Location = B102
BOUNDARY: Default Domain Default
Boundary Type = WALL
Location = \
F104.102,F105.102,F106.102,F107.102,F108.102,F109.102,F110.102,F111.1\
02,F112.102,F113.102,F114.102,F115.102,F116.102,F117.102,F118.102,F11\
9.102,F120.102,F121.102,F122.102,F123.102,F124.102,F125.102,F126.102,\
F127.102,F128.102,F129.102,F130.102,F131.102,F132.102,F133.102,F134.1\
02,F135.102,F136.102
BOUNDARY CONDITIONS:
MASS AND MOMENTUM:
```

```
    Option = No Slip Wall
END
WALL ROUGHNESS:
    Option = Smooth Wall
END
END
BOUNDARY: top
    Boundary Type = WALL
    Location = top
BOUNDARY CONDITIONS:
    MASS AND MOMENTUM:
        Option = Free Slip Wall
    END
END
DOMAIN MODELS:
    BUOYANCY MODEL:
        Option = Non Buoyant
    END
    DOMAIN MOTION:
        Option = Stationary
    END
    MESH DEFORMATION:
        Option = None
    END
    REFERENCE PRESSURE:
        Reference Pressure = 1 [atm]
    END
```

END

FLUID DEFINITION: Fluid 1

Material = Water

Option = Material Library

MORPHOLOGY:

Option = Continuous Fluid

END

END

FLUID MODELS:

COMBUSTION MODEL:

Option = None

END

HEAT TRANSFER MODEL:

Option = None

END

THERMAL RADIATION MODEL:

Option = None

END

TURBULENCE MODEL:

Option = k epsilon

END

TURBULENT WALL FUNCTIONS:

Option = Scalable

END

END

INITIALISATION:

Option = Automatic

INITIAL CONDITIONS:

Velocity Type = Cartesian

CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:

Option = Automatic with Value

$U = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

$V = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

$W = 0 \text{ [m s}^{-1}\text{]}$

END

STATIC PRESSURE:

Option = Automatic with Value

Relative Pressure = 1 [atm]

END

TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:

Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio

END

END

END

END

DOMAIN: Pas

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Immersed Solid

Location = B249

BOUNDARY: Pas Default

Boundary Type = WALL

Location = \

F250.249,F251.249,F252.249,F253.249,F254.249,F255.249,F256.249,F257.249,
F258.249,F259.249,F260.249,F261.249,F262.249,F263.249,F264.249,F265.249,
F266.249,F267.249

END

DOMAIN MODELS:

DOMAIN MOTION:

Angular Velocity = 13 [rev min⁻¹]

Option = Rotating

AXIS DEFINITION:

Option = Two Points

Rotation Axis From = 0.595 [m], -0.015 [m], 0.25 [m]

Rotation Axis To = 0.595 [m], -0.25 [m], 0.25 [m]

END

END

END

END

OUTPUT CONTROL:

MONITOR OBJECTS:

MONITOR BALANCES:

Option = Full

END

MONITOR FORCES:

Option = Full

END

MONITOR PARTICLES:

Option = Full

END

MONITOR POINT: Monitor Point Channel

Cartesian Coordinates = 0.7 [m], 0.05 [m], 0.045 [m]

Coord Frame = Coord 0

Option = Cartesian Coordinates

Output Variables List = Velocity

MONITOR LOCATION CONTROL:

Interpolation Type = Nearest Vertex

END

POSITION UPDATE FREQUENCY:

Option = Initial Mesh Only

END

END

MONITOR POINT: Monitor Point Pas

Cartesian Coordinates = 0.7 [m], -0.05 [m], 0.045 [m]

Coord Frame = Coord 0

Option = Cartesian Coordinates

Output Variables List = Velocity

MONITOR LOCATION CONTROL:

Interpolation Type = Nearest Vertex

END

POSITION UPDATE FREQUENCY:

Option = Initial Mesh Only

END

END

MONITOR RESIDUALS:

Option = Full

END

MONITOR TOTALS:

Option = Full

END

END

RESULTS:

File Compression Level = Default

Option = Standard

END

TRANSIENT RESULTS: Results

File Compression Level = Default

Option = Smallest

OUTPUT FREQUENCY:

Option = Every Timestep

END

END

END

SOLVER CONTROL:

Turbulence Numerics = First Order

ADVECTION SCHEME:

Option = High Resolution

END

CONVERGENCE CONTROL:

Maximum Number of Coefficient Loops = 10

Minimum Number of Coefficient Loops = 1

Timescale Control = Coefficient Loops

END

CONVERGENCE CRITERIA:

Residual Target = 1.E-4

Residual Type = RMS

END

IMMERSED SOLID CONTROL:

BOUNDARY MODEL:

Option = None

END

END

INTERRUPT CONTROL:

Option = Any Interrupt

CONVERGENCE CONDITIONS:

Option = Default Conditions

END

END

TRANSIENT SCHEME:

Option = Second Order Backward Euler

TIMESTEP INITIALISATION:

Option = Automatic

END

END

END

END

COMMAND FILE:

Version = 19.4

Results Version = 19.4

END

SIMULATION CONTROL:

EXECUTION CONTROL:

EXECUTABLE SELECTION:

Double Precision = No

Large Problem = No

END

INTERPOLATOR STEP CONTROL:

Runtime Priority = Standard

MEMORY CONTROL:

Memory Allocation Factor = 1.0

END

END

PARALLEL HOST LIBRARY:

HOST DEFINITION: desktopisukfe7

Remote Host Name = DESKTOP-ISUKFE7

```
Host Architecture String = winnt-amd64
Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%v\CFX
END
END
PARTITIONER STEP CONTROL:
Multidomain Option = Automatic
Runtime Priority = Standard
MEMORY CONTROL:
Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARTITION SMOOTHING:
Maximum Partition Smoothing Sweeps = 100
Option = Smooth
END
PARTITIONING TYPE:
MeTiS Type = k-way
Option = MeTiS
Partition Size Rule = Automatic
END
END
RUN DEFINITION:
Run Mode = Full
Solver Input File = Fluid Flow CFX.def
Solver Results File = \
C:/CFD-aula/Arquivo3_pending/dp0_CFX_1_Solution_1/Fluid Flow \
CFX_002.res
INITIAL VALUES SPECIFICATION:
INITIAL VALUES CONTROL:
Use Mesh From = Solver Input File
```

```
    Continue History From = Workbench Initial Values
END
INITIAL VALUES: Workbench Initial Values
    Option = Results File
    File Name = Fluid Flow CFX_001.res
END
END
END
SOLVER STEP CONTROL:
    Runtime Priority = Standard
MEMORY CONTROL:
    Memory Allocation Factor = 1.0
END
PARALLEL ENVIRONMENT:
    Number of Processes = 1
    Start Method = Serial
END
END
END
END
```