Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Ismail Abdallah Ismail Hassan

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LAGOAS DE ALTA TAXA

Campo Grande, MS
Dezembro 2020

Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais

Ismail Abdallah Ismail Hassan

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LAGOAS DE ALTA TAXA

CAMPO GRANDE–MS
Dezembro 2020

Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
Programa de Pós Graduação em Tecnologias Ambientais

Ismail Abdallah Ismail Hassan

COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO EM LAGOAS DE ALTA TAXA

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, área de concentração:
Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Marc Arpad Boncz

Aprovada em:

Banca Examinadora

Marc Arpad Boncz
Presidente

Johannes Gerson Janzen
UFMS / FAENG / PGTA

Mayara Leite Serejo
IFMS - Aquidauana

Campo Grande, MS
Dezembro/2020

RESUMO

O tratamento de efluentes com microalgas está sendo amplamente estudado atualmente em razão de vantagens, como por exemplo, a grande produção de biomassa para geração de bioenergia, e maior eficiência na remoção de nutrientes, se comparado aos processos tradicionais. Entretanto, o processo necessita de condições adequadas para seu funcionamento. Dentro das condições, temos a transferência de calor, oxigênio e dióxido de carbono, e a entrada de luz solar, sendo estes todos processos de transporte, resultando na necessidade da otimização da sua fluidodinâmica. Logo, é proposto um estudo com o objetivo de modelar a fluidodinâmica em lagoas de alta taxa (*High Rate Algal Ponds*; HRAPs), um tipo de biorreator costumeiramente usado para processos com microalgas, e analisar sua eficiência, através de simulação computacional, comparando com modelos de estudos existentes. Esta análise deve permitir a seleção de um modelo que pode proporcionar a melhor autenticidade e, como consequência, contribuir para futuros estudos adicionais visando outros parâmetros. Com a modelagem computacional também é possível analisar os efeitos do *paddlewheel* na fluidodinâmica do HRAP e extrair dados sobre a termodinâmica do mesmo. Fazendo o uso do software FLUENT e aplicando noções da Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) foi construido um modelo de um biorreator tipo HRAP, simulando a fluidodinâmica dentro do mesmo, validando os resultados com um reator HRAP em escala de bancada, de forma a manter valores próximos a realidade. Comparando as medições neste reator, com as simulações feitas no modelo *Transition SST* (*Shear Stress Transport Transition*; modelo de transporte transiente de tensão de cisalhamento), obtémos um erro percentual máximo de 8,6%. Logo, usando a ferramenta computacional e quantificando a influência dos diferentes parâmetros que envolvem a fluidodinâmica do HRAP, é possível construir um modelo válido e com melhor eficiência que modelos existentes, e usar este modelo para otimizar a configuração do reator.

Palavras-chave: Fluidodinâmica Computacional; Microalgas; Aeradores; Termodinâmica; Paddlewheel; HRAP.

SUMÁRIO

RESUMO **5**

SUMÁRIO **6**

LISTA DE FIGURAS **7**

1. INTRODUÇÃO **9**

2. OBJETIVOS **11**

2.1. OBJETIVO GERAL 11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 11

3. METODOLOGIA **12**

3.1. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL 12
3.1.1. Modelagem no Software *12*
3.1.2. Modelagem da Malha *12*
3.1.3. Modelagem de Fluxo *16*
3.1.4. Modelo para Fluxos Multifásicos *19*
3.1.5. Método de Resolução do Modelo *22*
3.1.6. Condições de Calculo *24*
3.1.7. Validação *26*
3.2. SISTEMA DE ESCALA LABORATORIAL 29
3.2.1. Tanque de Tratamento *29*
3.2.2. Paddlewheel *30*

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO **33**

4.1. MODELO DE TURBULÊNCIA *K-E* 33
4.2. MODELO TRANSITION SST 33
4.3. ESCOLHA DO MODELO PRINCIPAL 34
4.4. UTILIZAÇÃO DO MODELO 37
4.5. TRANSFERÊNCIA DE GASES 40
4.6. INVERSÃO DE FLUXO 41
4.7. DEFLETORES DE FLUXO 43

5. CONCLUSÕES **45**

6. REFERÊNCIAS **46**

ANEXO 1 ..... **48**

PRECISÃO MICRO MOLINETE **48**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Malha 3D modelada para representar o paddlewheel. 13
Figura 2: Malha 3D modelada para representar o fluido, sendo o bloco retangular a representação do ar atmosférico.....14
Figura 3: Malha completa, vista frontal. 15
Figura 4: Malha completa, vista superior. 15
Figura 5: Malha completa, vista lateral esquerda. 16
Figura 6: Imagem indicando a área de canal aberto, indicada pela cor vermelha, e sua região de contato com o paddlewheel, indicado pela cor amarela. 22
Figura 7: Imagem que mostra as resoluções usadas no método acoplado. 24
Figura 8: Esquema indicando profundidades de amostragem a partir do Raio Hidráulico (RH). 26
Figura 9: Equipamento de medição de vazão, micromolinete. 27
Figura 10: Esquema indicando pontos de amostragem de velocidade. 29
Figura 11: Design do tanque (Hadiyanto et al., 2013). 29
Figura 12: Geometria do tanque, planta. 30
Figura 13: Visão 3D do tanque, indicando a altura das paredes externas. 30
Figura 14: Modelo de dimensões das pás. 31
Figura 15: Eixo do paddlewheel com suas dimensões. 32
Figura 16: Modelo do paddlewheel montado. 32
Figura 17: Linhas de velocidade na altura de 0,135 m, representando o modelo k-ε. 33
Figura 18:: Linhas de velocidade na altura de 0,135 m, representando o modelo Transition SST. 34
Figura 19: Velocidade em decorrer da distância da reta, Linha Inferior. 35
Figura 20: Velocidade em decorrer da distância da reta, Linha Superior. 36
Figura 21: Curva comportamental de velocidade do Modelo SST Transition. 37
Figura 22: Volume morto com escala de velocidade até 0,01m/s. 38
Figura 23: Sedimentos de fundo no protótipo. 39
Figura 24: Velocidade de fundo do sistema. 39

Figura 25: Velocidades do sistema vista em 3 perfis.....40
Figura 26: Linhas de velocidade na altura 0,135m, para fluxo inverso. 42
Figura 27: Velocidade do sistema de fluxo invertido, vista em 3 perfis.....43
Figura 28: Linhas de velocidade na altura 0,135m, para defletores de fluxo. 44
Figura 29: Velocidade do sistema com defletores de fluxo, vista em 3 perfis. 45

1. INTRODUÇÃO

A seleção de sistemas de rotação para lagoas de alta taxa (*High Rate AlgalPond*; HRAP) é uma etapa importante por estar atrelado à fluidodinâmica e, em alguns casos, sendo a única forma de agitação. Agitação a qual, além de manter a biomassa em suspensão, tem influência nas taxas de transferência de oxigênio e de CO_2, as quais influenciam o crescimento dos micro-organismos aeróbios e o crescimento das microalgas. Como consequência, a eficiência da agitação influencia também a redução da demanda biológica de oxigênio (DBO) e a redução das concentrações de nutrientes, como nitrogênio e fósforo.

Neste tipo de sistema também se têm a presença do processo de fotossíntese, no qual as algas presentes no tratamento utilizam a energia solar para a realização da síntese de compostos orgânicos. Consequentemente, nestes sistemas biológicos de tratamento, a penetração da luz é um parâmetro relevante, e desta forma a seleção da profundidade e geometria do HRAP se tornam parâmetros importantes. Sendo assim, quando tratamos de um sistema de tratamento biológico envolvendo a fotossíntese, como o caso dos processos envolvendo microalgas, é preciso definir tais parâmetros.

Para um projeto eficiente de um HRAP, vários parâmetros tem importância. Dentro dos parâmetros a serem determinados estão: tempo de detenção hidraulica (TDH), lâmina da água (profundidade), razão entre comprimento e largura, configuração das curvas, presença de baffles, e os tipos de aeradores junto com as condições hidráulicas do sistema. Os estudos devem avaliar a influência de variações destes parâmetros no tratamento de efluentes, de forma prática e rápida, sempre visando resultados satisfatórios no efluente final. Tendo ciência de quais parâmetros otimizar, busca-se realizar este tipo de trabalho de maneira que não haja complicações na implantação e operação destes sistemas. Desta maneira, tem-se a opção do uso de ferramentas computacionais, a fim de testar diversas possibilidades e condições, como demonstram por exemplo Baker, Roy, & Kelso (1994), ao realizar estimativas qualitativas do fluxo de ar verticais em simulações com uso de fluidodinâmica computacional (CFD).

Dado a necessidade de embasar melhor os estudos práticos, surge a tendência de reproduzir projetos de sistemas existentes em ferramentas de CFD. No caso das HRAPs, diversos estudos tendem a usar CFD para a determinação de seus designs, junto com a ação das pás *(paddlewheel*). Por exemplo, Ali, Cheema, & Park (2015)

estuda o design das HRAPs, e como a alteração de *paddlewheel* reflete na velocidade e na fluidodinâmica dos sistemas. No entanto, uma quantificação da influência de aeradores na taxa de oxigenação de culturas de microalgas, só é vista em estudos laboratoriais, como o de Mendoza et al. (2013).

Modelar a continuidade de sistemas com a ação de *paddlewheel* se torna necessário, principalmente quando podemos observar a fundo sua fluidodinâmica, detalhando a circulação de água e como o movimento de *paddlewheel* pode afetar toda a comunidade biológica a partir de sua agitação.

Para Ali et al. (2015), a circulação da água é importante em lagoas areadas. O forte movimento de água longe de um aerador fornece uma maior zona de oxigenação da água e evita uma eficiência reduzida do aerador, aumentando a concentração de OD no reator como um todo. Durante a aeração com *paddlewheel*, as correntes de água aumentam conforme o *paddlewheel* aumenta a velocidade ou quando a profundidade da ponta da pá é aumentada.

Ali et al. (2015) também diz que aeradores do tipo *paddlewheel* configurados em alta rotação pode ser prejudicial às estruturas celulares das algas, enquanto baixa velocidade resulta em um alto volume de zonas mortas. Além disso, as dimensões da lagoa também afetaram significativamente o desempenho hidrodinâmico dos HRAPs. Portanto, um estudo detalhado de otimização de lagoas é proposto para superar a situação comprometida. As características de turbulência podem ser aprimoradas modificando o design da roda de pás ou a seção transversal do canal. Esses dispositivos de mixagem são necessários para criar turbulência, de tal modo que possa aumentar a produção do sistema.

Mendoza et al. (2013) mostrou a eficiência do uso de difusores de gás quando analisada a taxa de transferência de massa. Além disso, determinou que a velocidade do fluxo é diretamente proporcional ao coeficiente de transferência de massa, tanto no uso de *paddlewheel* como no uso de difusores de gás. Também apresentou que a redução da produtividade das microalgas foi maior quando se utiliza CO_2 puro em vez de simulações de gases de combustão.

Mortuza, Kommareddy, Gent, & Anderson (2011), também analisou a hidrodinâmica do fluxo de gás-líquido dos difusores de gás em foto biorreatores através da simulação de CFD. Onde mostrou que a transferência de massa tem uma relação linear com a velocidade superficial dos gases e o tamanho das bolhas. Mostrando que o uso de simulações computacionais pode determinar condições para

melhorar a taxa de transferência de gases em sistemas de tratamento de esgoto.

Outro parâmetro apresentado em estudos existentes é a intensidade da luz que é fornecida às microalgas e sua atuação conforme a profundidade do sistema. Por exemplo, Yang et al. (2016), fala de possíveis estudos sobre a investigação da profundidade do fluido para melhor otimização de sistemas que fazem uso de iluminação artificial.

Entretanto, os estudos envolvendo a modelagem CFD de HRAPs usam modelos simples e com validações feitas sem a existência de protótipos ou simulações laboratoriais para comparação. O que não apresenta uma confiabilidade alta nos modelos resultantes, principalmente quando comparados os estudos, por apresentarem muitas discrepâncias nas fluidodinâmicas apresentadas. Além também de deixar em aberto estudos de diferentes profundidades do sistema, que pode afetar a passagem de radiação, assim como o uso de defletores no sistema para que haja redução de zonas mortas. Tornando então, como objetivo desta pesquisa, proporcionar a busca de um modelo mais complexos e valida-lo conforme seu protótipo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Modelar um reator tipo HRAP com uso de CFD e validar com protótipo laboratorial, buscando modelos mais complexos que os existentes.

2.2. Objetivos Específicos

- Testar o modelo turbulência k-ε e o modelo *Transition SST*, modelos presente no sistema ANSYS, buscando o que melhor representa a realidade;
- Validar os modelos obtidos através de amostras de linha de velocidade e sedimentos de fundo em sistemas de escala laboratorial;
- Analisar a possibilidade de uso do modelo final e como o mesmo se comporta em comparação com outros modelos utilizados em variados estudos;
- Analisar o comportamento sobre a mistura do sistema com uso do modelo final variando a direção de fluxo;
- Avaliar o uso de defletores e sua relação com a presença de zonas mortas, através do uso do modelo final.

3. METODOLOGIA

3.1. Fluidodinâmica Computacional

A modelagem do sistema com uso da fluidodinâmica computacional foi feita a partir de dois modelos, mudando apenas o modelo de fluxo. Primeiramente, foi usado o modelo usado por grande parte dos trabalhos existentes sobre o tema, o modelo de turbulência *k-ε*. Para o segundo modelo, foi usado um modelo que tem precisão quando o problema estudado é caracterizado por variação dos resultados pelo tempo percorrido e que ao mesmo tempo não tem uma quantidade muita grande de fórmulas a serem resolvidas, o modelo *Transition SST*.

3.1.1. MODELAGEM NO SOFTWARE

Para o estudo, usamos o software comercial ANSYS Fluent. Este software é baseado no método de resolução de elemento finito, com suporte para resolver os modelos de turbulência *k-ε* e *Transition SST*. Assim, serão feitos dois modelos baseados nestes métodos de modelagem de fluxo, modelando um fluido com características da água, onde o método de melhores resultados foi utilizado para realização de modelos alterando a direção de fluxo e o raio hidráulico.

3.1.2. MODELAGEM DA MALHA

Para que seja feita a modelagem do sistema, temos inicialmente, de preparar a malha definindo sua quantidade de elementos e também como será separada para que possa ser definida as condições de operação. Mas para que seja definida a malha, começamos analisando alguns critérios de como será o funcionamento mecânico do sistema para que a malha seja definida de forma que concorde com tal.

Ressaltamos que o número de elementos da malha será definido de forma que não passe o limite permitido pela licença do software usado e forneça bons resultados na interação do sistema por trabalharmos no formato 3D. O software utilizado fornece um limite de 512 000 elementos para a licença de estudante, e vamos basear toda modelagem de malha neste limite de elementos.

Como o sistema de HRAP funciona com um rotor, chamado *paddlewheel*, partiremos a modelagem da malha daqui. O rotor funciona a partir de movimento circular constante em um eixo fixo, logo, a malha para o *paddlewheel*, que chamaremos de malha PW, deverá cobrir toda esta área cilíndrica formada pela

rotação das pás. A malha PW também serve para mostrar que este tipo de modelo deve funcionar no formato 3D, pois estamos trabalhando com um fluxo iniciado a partir de rotações de pás, tendo uma leve variação da velocidade nos pontos iniciais de fluxo e atuação fluidodinâmica em todo sistema e não só em sua superfície. A partir desta ideia temos a malha PW demonstrada na Figura 1.Figura 1: Malha 3D modelada para representar o *paddlewheel*.

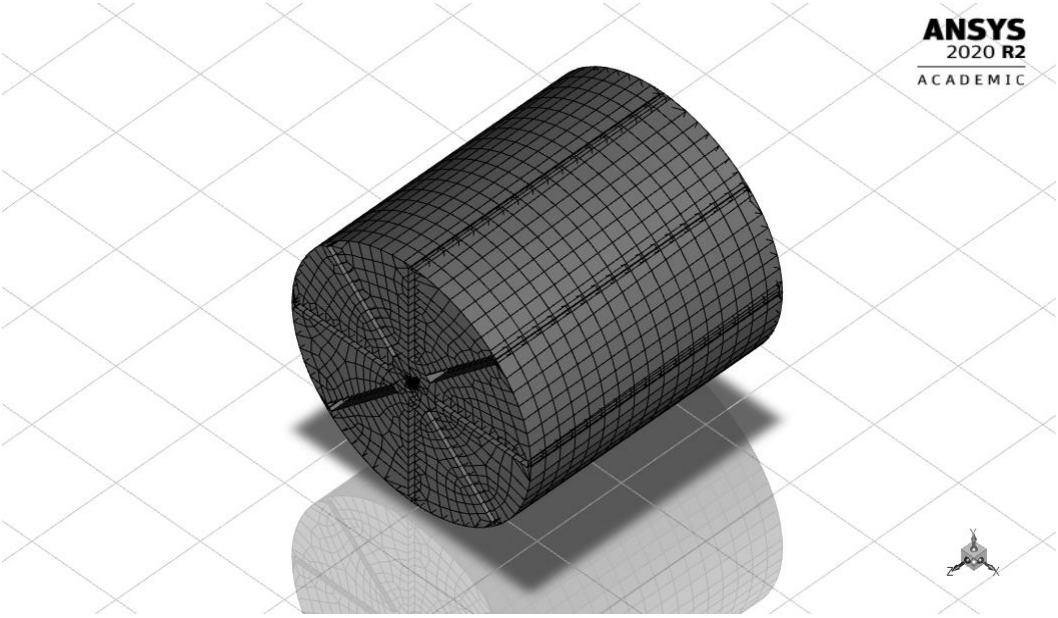


Figura 1: Malha 3D modelada para representar o *paddlewheel*.

Seguimos para a modelagem da malha da lagoa, e para tal malha devemos lembrar que o sistema de HRAP é um sistema aberto com interação do fluido da lagoa e o ar atmosférico. Para grande parte da malha não precisamos modelar essa interação pois a tensão superficial do fluido da lagoa impede essa circunstância. Entretanto na área onde temos a malha PW, temos a quebra da tensão superficial pela rotação, isso nos leva a necessidade de quando modelarmos a malha da lagoa, considerarmos a área da provável interação com o ar atmosférico. Neste caso definimos a malha da lagoa como a malha do tanque junto a malha de uma pequena área que será usada para modelar a entrada e saída de ar atmosférico como um canal aberto, o que pode ser visto na Figura 2.

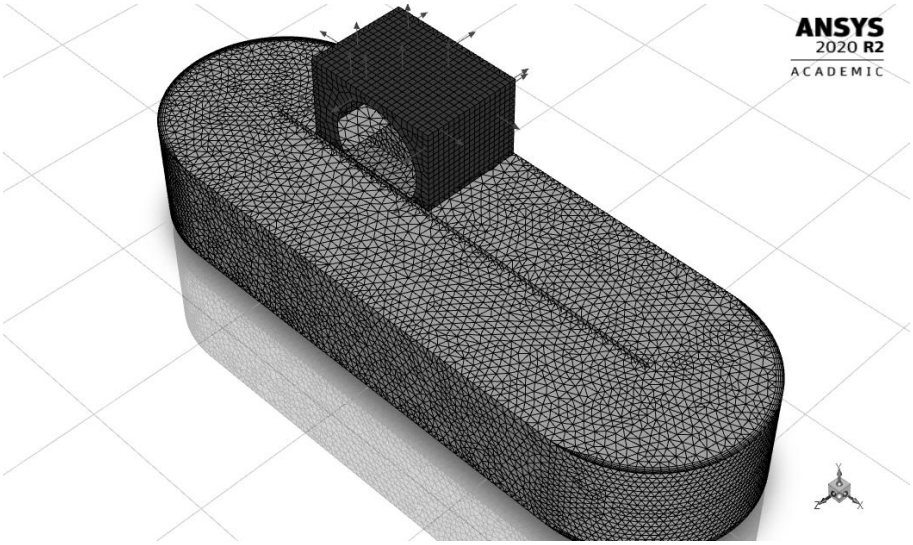


Figura 2: Malha 3D modelada para representar o fluido, sendo o bloco retangular a representação do ar atmosférico.

Com as condições e definições feitas, temos a malha final separada em duas sub-malhas, conforme já explicado. A primeira malha, malha PW, é feita com as mesmas medidas do sistema de escala laboratorial, contendo em sua formação 116 386 elementos distribuídos conforme o software. Enquanto a segunda malha, definida como malha da lagoa, apresenta 305 798 elementos, também distribuídos pelo software. Formando então a malha completa apresentada pelas 3 vistas nas Figura 3, Figura 4 e Figura 5.

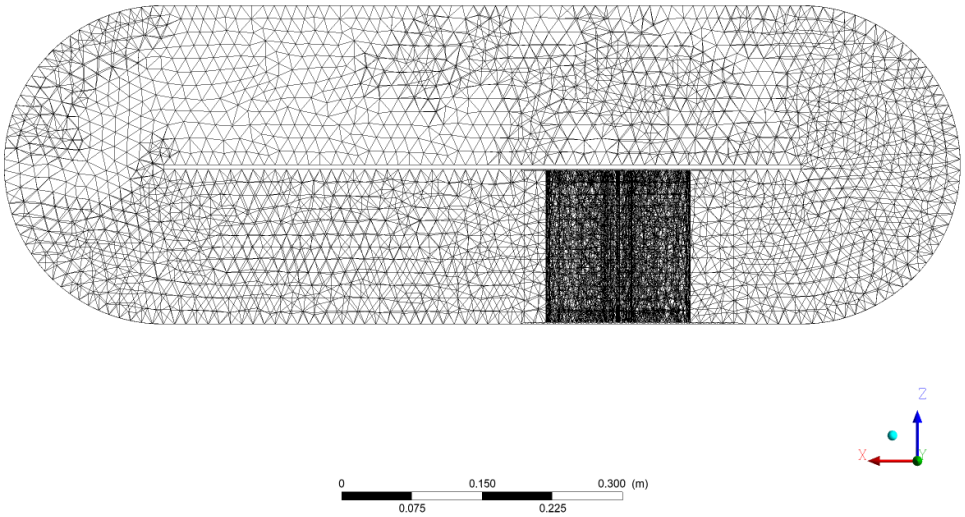


Figura 4: Malha completa, vista superior.

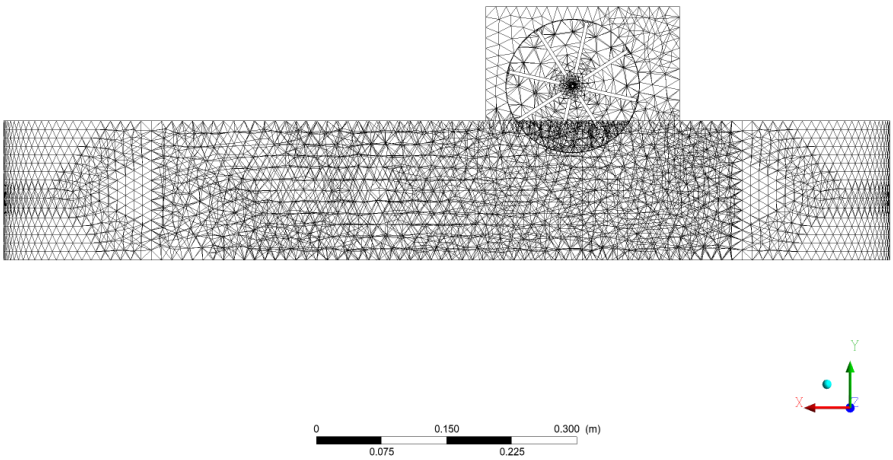


Figura 3: Malha completa, vista frontal.

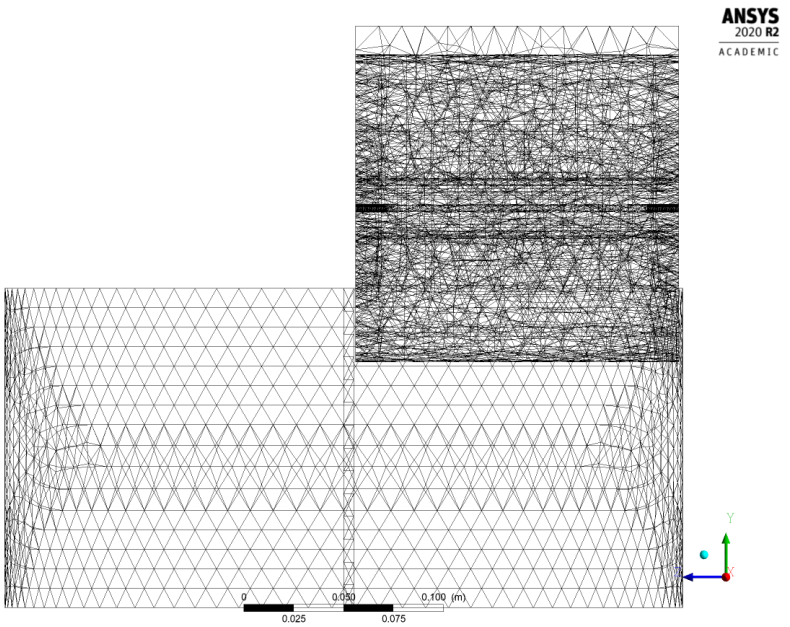


Figura 5: Malha completa, vista lateral esquerda.

3.1.3. MODELAGEM DE FLUXO

3.1.3.1. Modelo de turbulência k-ε

O primeiro modelo a ser testado tem seu uso em vários trabalhos com a mesma proposta que este. No sistema HRAP comum, graças a presença dos aeradores, teremos um fluxo turbulento perto do *paddlewheel*, podendo ter regiões laminares mais distantes deste. Logo, o estudo de Ali et al. (2015), diz que essa turbulência na lagoa pode ser modelada usando o método Navier-Stokes (RANS), dado como:

$$\rho\frac{\partial V}{\partial t}+\rho(V\cdot\nabla V)+\rho(v'\otimes v')=-\nabla P+\nabla\cdot\mu\left[\nabla V+(\nabla V)^{T}\right] \tag{3.1}$$

$$\rho(\nabla\cdot V)=0 \tag{3.2}$$

onde ν’ é a velocidade de flutuação, ρ é a densidade, P é pressão, V velocidade média e ⊗ é o produto vetorial.

Outros estudos também utilizam o modelo de turbulência *k-ε*, se mostrando confiável para fluidos de fluxo turbulento. Logo, as equações governamentais para a energia cinética (k) e a taxa de dissipação (ε) para este modelo são:

$$\rho\frac{\delta k}{\delta t}+\rho u_j\frac{\delta k}{\delta x_j}=\tau_{ij}\frac{\delta u_i}{\delta x_j}+\frac{\delta}{\delta x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\delta k}{\delta x_j}\right]-\rho\varepsilon \tag{3.3}$$

$$\rho\frac{\delta\varepsilon}{\delta t}+\rho u_j\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_j}=\frac{\delta}{\delta x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\delta\varepsilon}{\delta x_j}\right]+C_{\varepsilon_1}\frac{\varepsilon}{k}\tau_{ij}\frac{\delta u_i}{\delta x_j}-C_{\varepsilon_2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3.4}$$

Onde, conforme Ali et al. (2015), σ_k e σ_ε são os números turbulentos de Prandtl para energia cinética e taxa de dissipação, respectivamente; e $C_{\varepsilon1}$ e $C_{\varepsilon2}$ são os primeiros e segundo modelo experimental constantes para a taxa de dissipação, respectivamente. Seguindo Ali et al (2015), definimos os seguintes valores para essas constantes foram atribuídos: σ_k = 1,0, σ_ε = 1,3, $C_{\varepsilon1}$ = 1,44, $C_{\varepsilon2}$ = 1,92, e C_μ = 0,09.

Definimos também a viscosidade do modelo de turbulência k-ε, apresentada pela formula:

$$\mu_T=\frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon(\rho a-s)} \tag{3.5}$$

Mesmo sendo um modelo de uso comum, este apresenta confiabilidade e coerência nas pesquisas de CFD, tornando então o um modelo base a ser usado para a comparação ao modelo mais robusto usado em nosso estudo.

3.1.3.2. Modelo Transition SST

O modelo transitório SST é baseado num conjunto de fórmulas, adicionando duas equações de transporte, uma para a intermitência e outra para os critérios de início de transição, análogo ao modelo k-ω. Conforme Langtry & Menter, (2009), o modelo não tenta modelar a física da transição da turbulência, mas sim formar uma estrutura para a implementação de correlações da transição.

O presente modelo de transição considera a transição devido à intensidade da turbulência em fluxo livre e gradientes de pressão e separação. Isto é totalmente compatível com CFD e não afeta negativamente a convergência do método de solução. As limitações atuais do modelo estão em sua instabilidade de fluxo cruzado e na rugosidade, que não estão incluídas nas correlações. (Langtry & Menter, 2009)

A equação de transporte para a intermitência γ é definida como:

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho U_j\gamma)}{\partial x_j}=P_{\gamma_1}-E_{\gamma_1}+P_{\gamma_2}-E_{\gamma_2}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\gamma}\right)\frac{\partial\gamma}{\partial x_j}\right] \tag{3.6}$$

E as fontes de transição são definidas como:

$$P_{\gamma_1} = 2F_{length}\rho S\left[\gamma F_{onset}\right]^{c\gamma z} \quad (3.7^a)$$

$$E_{\gamma_1} = P_{\gamma_1}\gamma \quad (3.7^b)$$

Onde S é a magnitude da taxa de deformação e F_{length} é uma correlação empírica para o comprimento da região de transição. Para as fontes de destruição/relaminarização temos as seguintes equações:

$$\begin{aligned} P_{\gamma 2} &= (2c_{\gamma 1})\rho\Omega\gamma F_{turb} \\ E_{\gamma 2} &= c_{\gamma 2}P_{\gamma 2}\gamma \end{aligned} \quad (3.8)$$

Sabendo que Ω é a magnitude da vorticidade. Para o início da transição temos o seguinte conjunto de equações:

$$\begin{aligned} \mathrm{Re}\,\upsilon &= \frac{\rho\gamma^2 S}{\mu} \\ R_T &= \frac{\rho k}{\mu\omega} \end{aligned} \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} F_{onset1} &= \frac{\mathrm{Re}_\upsilon}{2.193\mathrm{Re}_{\theta c}} \\ F_{onset1} &= \min(\max(F_{onset1}, F^4{}_{onset1}), 2.0) \end{aligned} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned} F_{onset2} &= \max\left(1-\left(\frac{R_T}{2.5}\right)^{3,0}\right) \\ F_{onset} &= \max(F_{onset2} - F_{onset3,0}) \\ F_{turb} &= e^{-\left(\frac{R_T}{r}\right)^4} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$Re_{\theta c}$ é o número de Reynolds crítico em que a intermitência começa a aumentar na camada limite. Isso ocorre a montante do número de Reynolds de transição e a diferença entre os dois deve ser obtida a partir de uma correlação empírica. Para as constantes da equação de intermitência temos os valores de $c_{\gamma 1}$ = 0,03; $c_{\gamma 2}$ = 50; $c_{\gamma 3}$ = 0,5 e σ_γ = 1,0 (Launder B. E. & B., 2013).

No final, a junção do modelo de transição com o modelo de turbulência SST fornece as equações que serão resolvidas pelo software. Sendo essas equações apresentadas pelas equações de 3.12 a 3.17.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \tilde{P}_k - \tilde{D}_k + \frac{\partial}{\partial x_j}\left((\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \tag{3.12}$$

$$\tilde{P}_k = \gamma_{eff} P_k \tag{3.13}$$

$$\tilde{D}_k = \min(\max(\gamma_{eff}, 1.0), 1.0) D_k \tag{3.14}$$

$$\mathrm{R_y} = \frac{(\rho y \sqrt{k})}{\mu} \tag{3.15}$$

$$\mathrm{F_3} = e^{-\left(\frac{R_y}{120}\right)^3} \tag{3.16}$$

$$\mathrm{F_t} = \max\left(F_{1orig}, F_3\right) \tag{3.17}$$

Temos então um modelo que traz melhores resultados, por se tratar de uma mistura do modelo k-ω com o modelo k-ε. Apresentando uma oportunidade de comparação entre resultados.

3.1.4. MODELO PARA FLUXOS MULTIFÁSICOS

Para que a resolução dos modelos de fluxo tenha uma relação precisa com a realidade, precisamos incorporar ao modelo final a interação entre o ar atmosférico e o fluido do tanque. Isso deve ser levado em consideração por se tratar de um tanque aberto, onde parte do *paddlewheel* é preenchida pelo ar atmosférico. Dadas essas características, devemos fazer uso de um modelo para fluxos multifásicos com a presença de duas fases: ar e água.

3.1.4.1. Volume of Fluid (VOF)

O modelo VOF pode modelar dois ou mais fluídos imiscíveis, resolvendo um único conjunto de equações de momento e rastreando a fração de volume de cada um dos fluidos em todo o domínio. As aplicações típicas incluem a previsão de ruptura de jato, movimento de grandes bolhas em líquido, o movimento do líquido após o rompimento de uma barragem e o rastreamento estável ou transitório de qualquer interface líquido-gás (Launder B. E. & B., Spalding 2013). Como explicam Launder e

Spalding (2013), o modelo VOF baseia-se no fato de que dois ou mais fluidos (ou fases), interagem entre si sem estar interpenetrando. Para cada fase adicionada, adiciona-se ao modelo uma variável, sendo a fração de volume na célula da malha, da forma que todas as células da malha apresentem uma fração de cada fase, variando de 0 até 1. Assim, as variáveis e propriedades das células da malha são representadas por uma das fases ou por uma mistura delas, dependendo do valor da fração de volume. Tendo então q^{th} como o fluido presente no tanque e α_q como a fração do fluido, as três condições a baixo estão presentes no modelo:

- $\alpha_q = 0$: A célula está vazia do fluido q^{th};
- $\alpha_q = 1$: A célula está cheia do fluido q^{th};
- $0 < \alpha_q < 1$: A célula contém uma fração do fluido q^{th} e um ou mais fluidos diferentes.

Este modelo é usado geralmente, no ANSYS FLUENT, para soluções dependentes do tempo, ou seja, modelos transitórios. Também precisamos usar o solucionador baseado em pressão, único disponível no software para este modelo.

3.1.4.2. Fração de Volume

O rastreamento da(s) interface(s) entre as fases é realizado pela solução de uma equação de continuidade para a fração de volume de uma (ou mais) das fases (Launder B. E. & B., 2013). Para q^{th}, esta equação é apresentada pela equação 3.18

$$\frac{1}{\rho_q}\left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla.(\alpha_q\rho_q\vec{\upsilon}_q)=S_{\alpha_q}+\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp})\right] \tag{3.18}$$

Entretanto, esta equação não se aplica a fase primária, que em nosso caso será o ar atmosférico. A fração de volume da fase primária será resolvida com base na restrição da equação 3.19

$$\sum_{q=1}^{n}\alpha_q = 1 \tag{3.19}$$

O modelo também apresenta a equação das propriedades das células quando se tem a interação entre os fluidos, para o caso da presença de dois fluidos, condição do nosso sistema, temos a mistura da densidade de cada célula representada por:

$$\rho = \alpha_2\rho_2 + (1-\alpha_2)\rho_1 \tag{3.20}$$

Também devemos escolher o esquema apropriado para a formulação da fração de volume no modelo VOF. No software ANSYS FLUENT temos os esquemas explícitos e implícitos disponíveis.

O esquema implícito apresenta uma formulação onde se busca não o comportamento intermediário na resolução transitória, mas sim a solução final. Em nosso caso, a solução final se encaixa no momento que o tanque apresenta seu fluxo contínuo, tendo um ponto positivo na escolha desse esquema. Também podemos usar este esquema para malhas de baixa qualidade e com escoamentos complexos, além da possibilidade de ser usado passos de tempo maiores quando temos um regime permanente. Ou seja, o esquema implícito se encaixa melhor para as condições da malha que escolhemos e deixa abertura para escolhas de outros parâmetros de resolução.

3.1.4.3. Equação de Momentum e Equações adicionais

Como mostra Launder B. E. & B., (2013), apenas uma equação do momento é resolvida para todo o domínio, não importando o número de fases ou fluidos, e a velocidade resultante é compartilhada entre as fases. A única dependência da equação do momento é com as frações de volume das fases, mostrado na Equação 3.9 por meio das propriedades $\boldsymbol{\rho}$ e $\boldsymbol{\mu}$.

$$\frac{d}{dt}(\rho\vec{v}) + \nabla.(\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla p + \nabla.\left[\mu\left(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^{T}\right)\right] + \rho\vec{g} + \vec{F} \qquad (3.21)$$

Para as outras equações utilizadas na resolução do modelo multifásico, como as equações de transporte e as variáveis de turbulência, o software usa um único conjunto de equações que serve para todas fases em todo domínio do problema.

3.1.4.4. Fluxo de Canal Aberto

A opção de canal aberto presente no software permite a possibilidade de modelar o fluxo em canais que envolvem a existência de um fluido com superfície livre. Geralmente temos esta opção usada para modelar rios, represas e até fluxos em sistemas de drenagem. Mas nosso problema também apresenta um fluxo com superfície livre de contato direto com a atmosfera, podendo então adaptar o uso desta ferramenta para adequar a nossas condições.

Geralmente para o uso desta ferramenta selecionamos duas condições para o modelo, uma condição de entrada e uma condição de saída, podendo ser as duas de

massa ou de pressão. Neste caso, analisamos as condições da malha que criamos e das características do sistema HRAP. Para nosso sistema, a área que irá definir o fluxo de todo sistema é apenas a área onde está o *paddlewheel*, inclusive sabemos que apenas essa região apresentará um fluxo turbulento (pelo fato do movimento das pás).

Nesta região já foi criada uma malha considerando a presença do ar atmosférico, temos então que definir que toda a área envolta do *paddlewheel* é uma saída de fluxo. Fazemos isso pois esta é a área que o modelo deve resolver como a área de canal aberto e de superfície livre, onde o fluxo depende do movimento das pás e como o ar influencia. Entretanto, o ar nessa área é constante, não podendo existir saída de massa, apenas tendo saída de pressão. A partir desta premissa, podemos deixar todo o resto do sistema sem a necessidade de se configurar como canal aberto, pois nestas áreas o fluxo não depende do movimento do *paddlewheel* e seu contato com o ar.

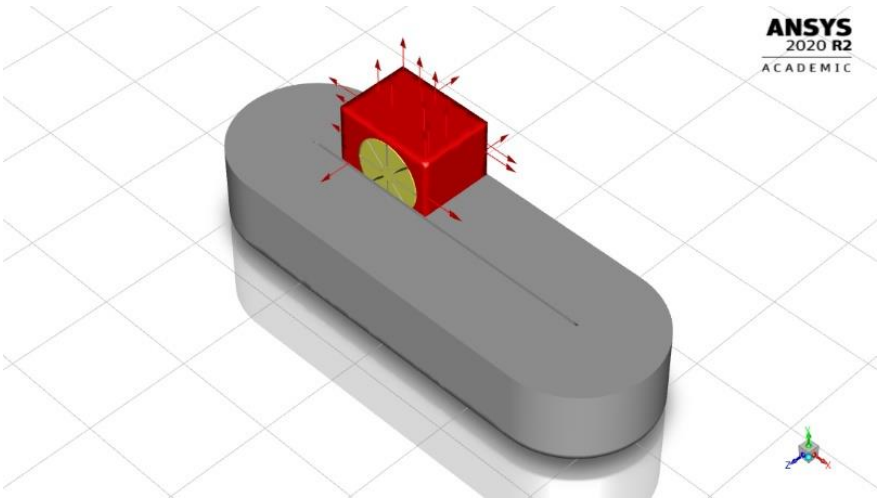


Figura 6: Imagem indicando a área de canal aberto, indicada pela cor vermelha, e sua região de contato com o paddlewheel, indicado pela cor amarela.

3.1.5. MÉTODO DE RESOLUÇÃO DO MODELO

Como dito antes, resolveremos o modelo em questão com um solucionador baseado na pressão, permitindo a resolução do problema de fluxo de forma agregada ou acoplada. Entretanto é de se esperar que o problema seja resolvido de forma transitória, mais explicado a frente.

Conforme Launder B. E. & B., (2013), o método segregado baseado em pressão, resolve a equação de momentum e as equações de pressão separadamente, resultando em convergências mais lentas. Enquanto o algoritmo acoplado resolve as

mesmas equações juntas, além de ser necessário para fluxos transientes quando a qualidade da malha á ruim ou se usamos grandes passos de tempo.

Com base na malha feita anteriormente, temos a necessidade do uso do algoritmo acoplado para a resolução do modelo. Desta forma, conforme Launder B. E. & B., (2013)temos a formação de duas equações discretizadas para a resolução dos problemas, equação do momento (3.22) e equação da continuidade (3.23).

$$\sum_j a_{ij}^{u_k u_k} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{u_k p} p_j = b_i^{u_k} \tag{3.22}$$

$$\sum_k \sum_j a_{ij}^{p u_k} u_{kj} + \sum_j a_{ij}^{pp} p_j = b_i^{p} \tag{3.23}$$

Como resultado, o sistema geral de equações (3.6 e 3.7), depois de transformado é apresentado como:

$$\sum_j [A]_{ij} \vec{X}_j = \vec{B}_i \tag{3.24}$$

Onde temos a representação da influência de uma célula *i* em uma célula *j* indicados em forma de matriz:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{ij}^{pp} & a_{ij}^{pu} & a_{ij}^{pv} & a_{ij}^{pw} \\ a_{ij}^{up} & a_{ij}^{uu} & a_{ij}^{uv} & a_{ij}^{uw} \\ a_{ij}^{vp} & a_{ij}^{vu} & a_{ij}^{vv} & a_{ij}^{vw} \\ a_{ij}^{wp} & a_{ij}^{wu} & a_{ij}^{wv} & a_{ij}^{ww} \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

E por fim os vetores desconhecidos e residuais são apresentados na forma de matriz:

$$\vec{X}_j = \begin{bmatrix} p'_i \\ u'_i \\ v'_i \\ w'_i \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

$$\vec{B}_i = \begin{bmatrix} -r_i^p \\ -r_i^u \\ -r_i^v \\ -r_i^w \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

O algoritmo acoplado no software ANSYS ainda permite a seleção dos

métodos de resolução para as equações, logo a Figura 7 mostra as escolhas de resoluções utilizadas no estudo:

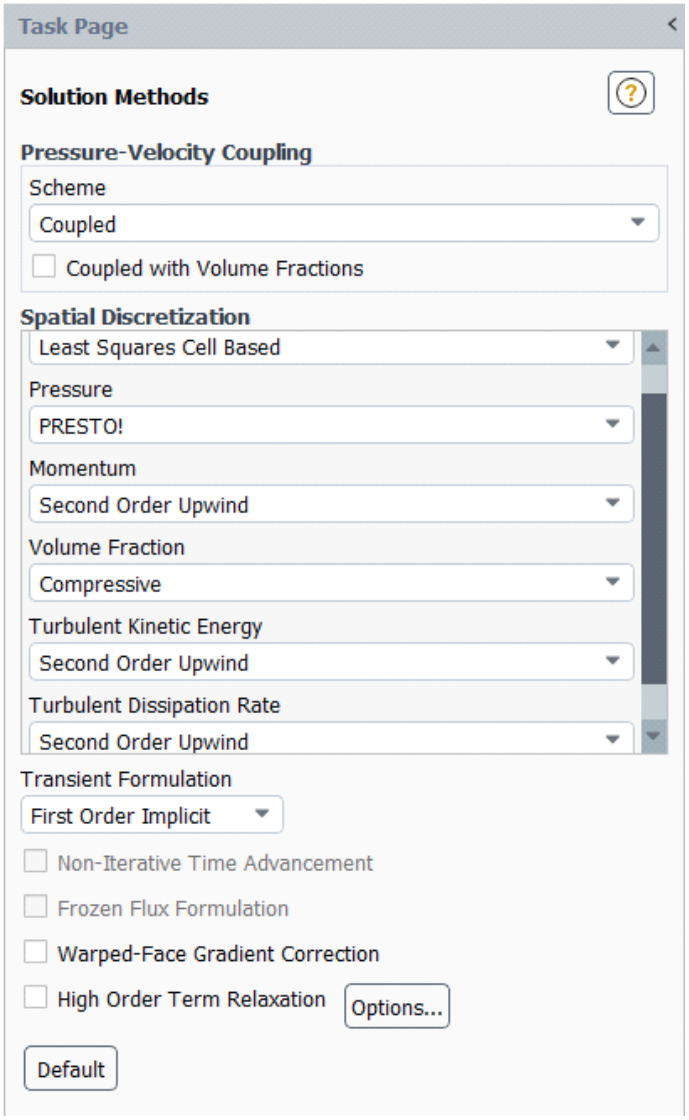


Figura 7: Imagem que mostra as resoluções usadas no método acoplado.

3.1.6. CONDIÇÕES DE CÁLCULO

As situações que enquadram os dois modelos escolhidos para o estudo exigem algumas condições de cálculo para que haja resultados satisfatórios quando comparados à realidade. Dentro dessas condições temos a escolha da quantidade de interações, a escolha do modelo como estacionário ou transitório e a escolha de dados de convergência. Para o caso da escolha de modelo transitório também temos que estipular o tempo total do modelo e o passo do tempo para tal método.

3.1.6.1. Regime Estacionário e Transitório

O uso de modelos estacionários é compreensível quando fazemos uso de problemas que tenham fluxo que não varia conforme o tempo percorrido, por exemplo o fluxo dentro de um cano hidráulico. Mas para o caso estudado, o fluxo tem grande variação conforme o tempo por ser dependente exclusivamente do movimento de rotação do *paddlewheel*. Não sendo suficiente para impedir o uso de regime estacionário, ainda temos a necessidade neste projeto do uso do modelo de fluxos multifásicos, mostrando que a melhor escolha será a de um regime transitório.

Porém, o uso de modelo transitório traz a necessidade de configuração de duas condições. A primeira é o tempo total de modelagem, ou seja, a passagem total do tempo que o tanque estará funcionando, começando de 0 e indo até o tempo final escolhido. A segunda é o passo de tempo, que seria de quantos em quantos segundos o modelo vai calcular até o tempo final. Por exemplo, se definirmos o tempo total de 30 segundos e o passo de tempo de 10 segundos, o software vai fornecer resultados analisando 10 segundos da variação do tempo do problema, resultando 3 gráficos (10 segundos, 20 segundos e 30 segundos).

Quanto menor o passo de tempo, melhor será a refinação do modelo, até chegar a um ponto que mesmo que diminua o tempo de passo o resultado não terá variação. Para o projeto em questão tivemos testes de 1 segundo, 0,1 segundo, 0,03 segundos e 0,01 segundo. Buscando sempre resolver estes passos de tempo para um tempo total de 30 segundos. Sendo estes 30 segundos definidos na observação do tanque de escala laboratorial, onde vemos que após o decorrer deste tempo o fluxo se torna praticamente contínuo.Com o resultado no tempo final desses 30 segundos tem-se o comportamento do sistema, que pode ser considerado independente do período de funcionamento do mesmo.

Após os testes temos então definido o uso de um passo de tempo de 0,03 segundo, com um total de 1.000 passos de tempo, totalizando no final os 30 segundos desejados.

3.1.6.2. Interação e Convergência

Para o projeto, temos uma grande quantidade de equações, sendo resolvidas para uma grande quantidade de elementos e sendo realizadas em uma extensa quantidade de passos de tempo. A definição de um maior número de interações se

torna um empecilho para o trabalho, pois o equipamento disponível para resolução é caseiro e teria uma extrema lentidão na resolução. Sobra então a escolha de um numero de interações padrão, que satisfaça pelo menos o critério de convergência. Portanto realizamos testes de 5, 10 e 20 interações, percebendo que o número de 20 interações sempre se mantém dentro do critério de convergência 1,0 x 10^{-2}, critério utilizado por grande parte da comunidade acadêmica.

3.1.7. VALIDAÇÃO

A validação dos modelos foi feita a partir da coleta de dados em um sistema de escala laboratorial. Os dados coletados são sobre a velocidade, temperatura e avaliação de sólidos sedimentáveis no sistema. Tais dados foram coletados após a realização dos modelos, de forma que os pontos de amostragem escolhidos tenham melhor representatividade para comparação. Porém, por conta da semelhança entre as características físicas entre água e efluentes, e principalmente por conta das barreiras pela situação quando realizado os testes do estudo, o sistema e seus modelos foram feitos utilizando a água como fluido base.

Para a coleta de dados sobre temperatura utilizamos um termômetro convencional, muito utilizado para coleta de dados em campo. Com o termômetro coletamos temperatura em 3 profundidades diferentes, com o fluxo do sistema desligado, conforme o raio hidráulico, sendo elas: na superfície do fluido, no meio do raio hidráulico escolhido e por fim no fundo do sistema, como mostra a Figura 8.

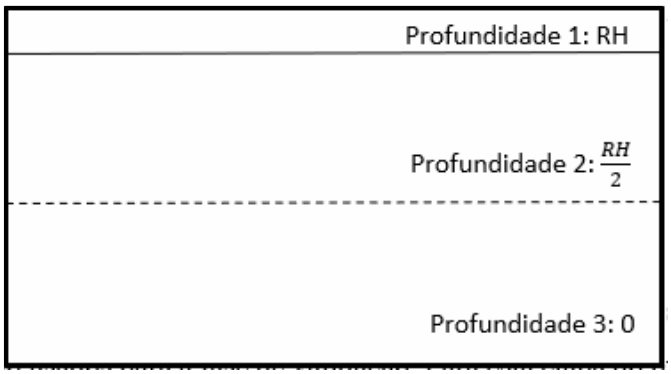


Figura 8: Esquema indicando profundidades de amostragem a partir do Raio Hidráulico (RH).

Para a análise dos sólidos sedimentáveis do sistema utilizamos uma quantidade de 8 000 mg de purpurina metálica, sólido que não se dissolva na água e que tenha uma presença marcante para que possa ser observado no fundo do sistema.

Após adicionar a purpurina metálica, o sistema foi ligado e foi aguardado que o sólido, sedimentado no fundo, se encontrou em um estado estacionário (sem mudar de posição). A partir deste momento era possível analisar, no sistema real, a área onde ocoreram as menores velocidades, assim como as zonas mortas, e comparar estas áreas com as áreas de mesma condição encontradas no modelo.

Finalizando a coleta de dados, foi realizado a determinação de variações da velocidade. Inicialmente esta coleta foi feita usando um micromolinete fluviométrico, capaz de analisar velocidades de fluxo relativamente baixas, como é o nosso caso. O molinete em questão é descrito na Tabela 1 e mostrado na Figura 9.

Descrição do Equipamento	
Tipo de velocímetro	Micromolinete
Marca	HIDROMEC
Número do corpo	8111
Número da hélice	9-151
Diâmetro da hélice (cm)	5

Tabela 1: Descrição do molinete utilizado na coleta de dados laboratoriais.

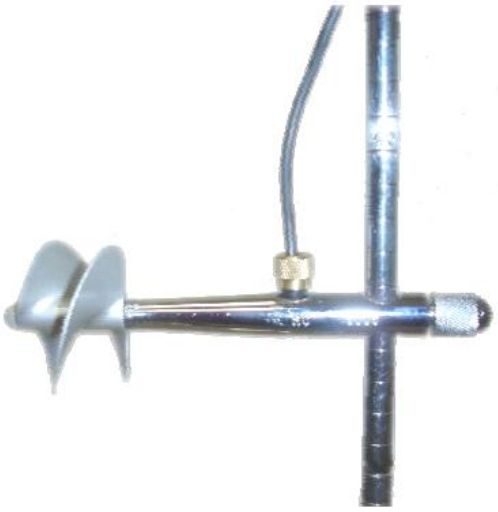


Figura 9: Equipamento de medição de vazão, micromolinete.

Vale ressaltar que o molinete usado teve sua curva de calibração feita através do método Bocal de Calibração, assim obtendo a precisão do aparelho (Anexo 1) e suas equações para o cálculo de velocidade (Equações 3.28 e 3.9).

$$V'\left(m/s\right) = (0{,}2479 \times n) + 0{,}012 \qquad (3.28)$$

n < 0,63 (26 rotações por minuto)

$$V'\left(m/s\right) = (0{,}2606 \times n) + 0{,}004 \tag{3.29}$$

n ≥ 0,63 (26 rotações por minuto)

Por conta do equipamento disponível, a coleta de dados de velocidade tem variações de desvio padrão conforme os pontos de amostragem. Foram obtidos dados mais próximos da realidade em valores de velocidade até 0,48 m/s, entretanto o sistema funciona com velocidades inferiores a esta para que não haja grandes agressões nos organismos presentes. Baseado na rotação do *paddlewheel* sabemos que a velocidade máxima estará próxima dos 0,25 m/s, não podendo o desvio padrão ser menor que 0,9%. Logo para a seleção dos pontos e para a análise dos resultados, selecionamos pontos onde a velocidade se mantenha dentro dos valores encontrados no Anexo 1, mantendo o conhecimento de seu desvio padrão.

Consequentemente os pontos para a coleta de dados acabam se encontrando em duas linhas paralelas às paredes retas exteriores do sistema, onde temos maior facilidade de medição. Tais linhas são separadas em linha inferior e linha superior, sendo a linha inferior a reta de pontos que intercepta com o *paddlewheel* e a linha superior será a reta de pontos oposta. A Figura 10 indica os pontos escolhidos com base em uma vista superior, além de indicar o ponto inicial (0) e o ponto final (65) em centímetros, na indicação dos resultados tem-se apresentado os pontos exatos de coleta no decorrer das linhas.

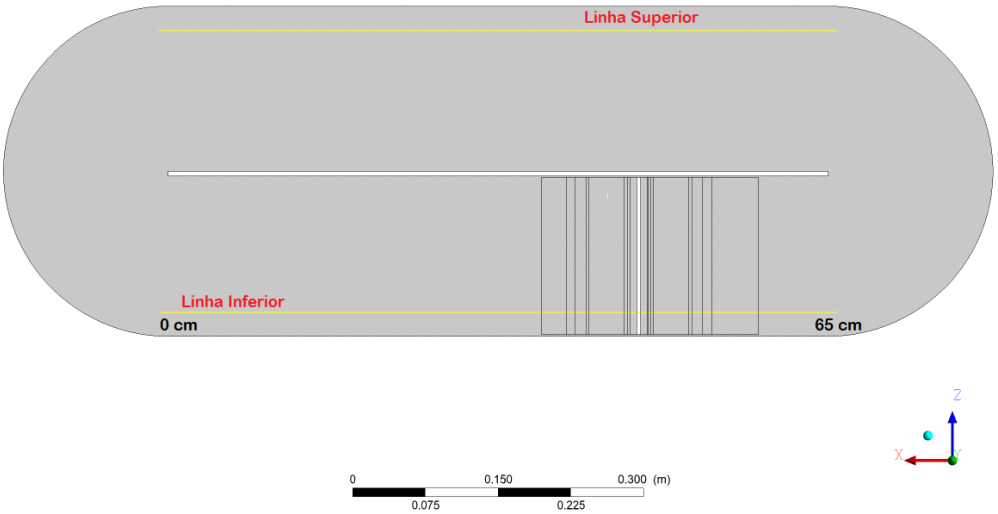


Figura 10: Esquema indicando pontos de amostragem de velocidade.

3.2. Sistema em Escala de Laboratorio

3.2.1. TANQUE DE TRATAMENTO

Com os modelos prontos, partimos para a preparação dos sistemas em escala laboratorial, que serão usados para a fase de validação. Para esta etapa do projeto, usaremos um tanque construído em fibra de vidro, com o design ilustrado na Figura 11.

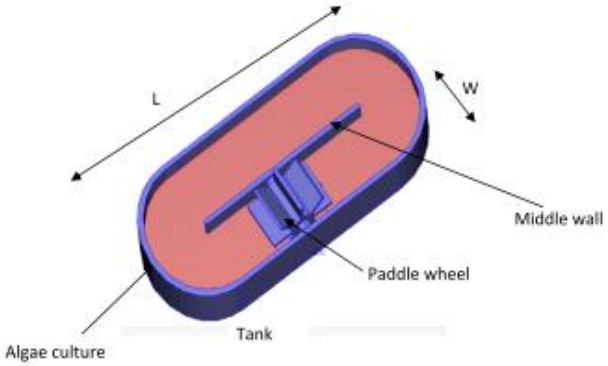


Figura 11: Design do tanque (Hadiyanto et al., 2013).

O tanque terá a estrutura geométrica descrita na Figura 12 e Figura 13, composto por uma parede central 2 cm mais baixo que as paredes exteriores.

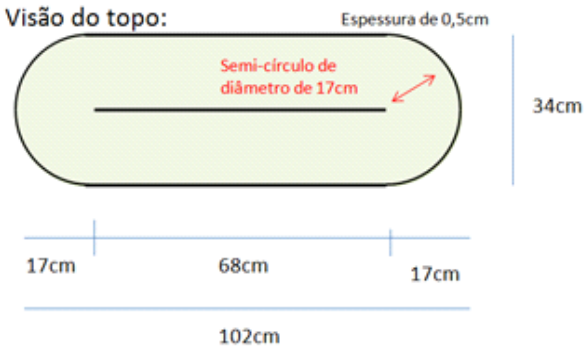


Figura 12: Geometria do tanque, planta.

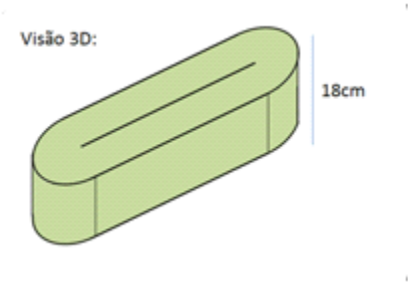


Figura 13: Visão 3D do tanque, indicando a altura das paredes externas.

O tanque será abastecido com água e terá seu fluxo proporcionado pelo sistema de roda de pás, o *paddlewheel*.

3.2.2. PADDLEWHEEL

O processo da montagem do *paddlewheel* utilizado foi dividido em três fases, sendo a primeira fase a escolha do material, a segunda fase a elaboração do projeto das pás e a montagem, e a terceira fase a montagem do eixo de rotação.

Na escolha do material do *paddlewheel*, é indispensável o uso de material que seja resistente as condições do fluido presente no tanque e não se altere conforme o tempo, e que tenha também uma menor interação com o fluido, tornando impossível o uso de madeira, por exemplo. Desta forma, o *paddlewheel* poderia ser elaborado em vidro, metal ou acrílico, sendo pedido orçamento para os dois últimos materiais. Neste caso, o acrílico teve vantagem de ser um material mais maleável e mais fácil de se trabalhar, além de ter menor peso, facilitando a escolha e montagem do eixo e motorização.

Para as pás, escolhemos utilizar um modelo retangular reto, sem presença de calha laterais. Utilizamos este tipo de pá por estar presente em grande parte dos modelos de CFD estudados e por ser suficiente por se tratar de um tanque raso. A

Figura 14 mostra as dimensões de largura e comprimento de cada pá retangular, lembrando que serão feitas 8 pás distribuídas uniformemente em circunferência, todas com espessura igual, a de 4 mm.

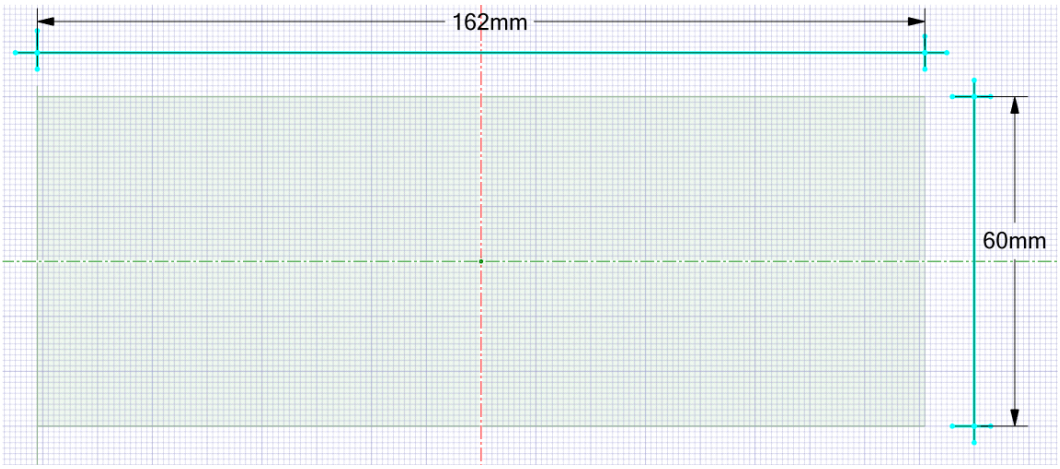


Figura 14: Modelo de dimensões das pás.

Finalizando o *paddlewheel*, temos a produção dos eixos que serão utilizados para sua rotação. Neste caso o uso do acrílico impede a utilização de eixo central circular onde seriam colocadas as pás. Produzimos então duas circunferências com encaixes para as pás, formando um cilindro apenas com suas paredes circulares, e no centro dessas paredes é feita uma abertura no formato do eixo do nosso rotor (eixo em D). Esta abertura inclusive permite uma boa passagem do fluido entre as pás, evitando a retenção do mesmo. A Figura 15 mostra as dimensões do eixo enquanto a Figura 16 ilustra como fica o *paddlewheel* montado.

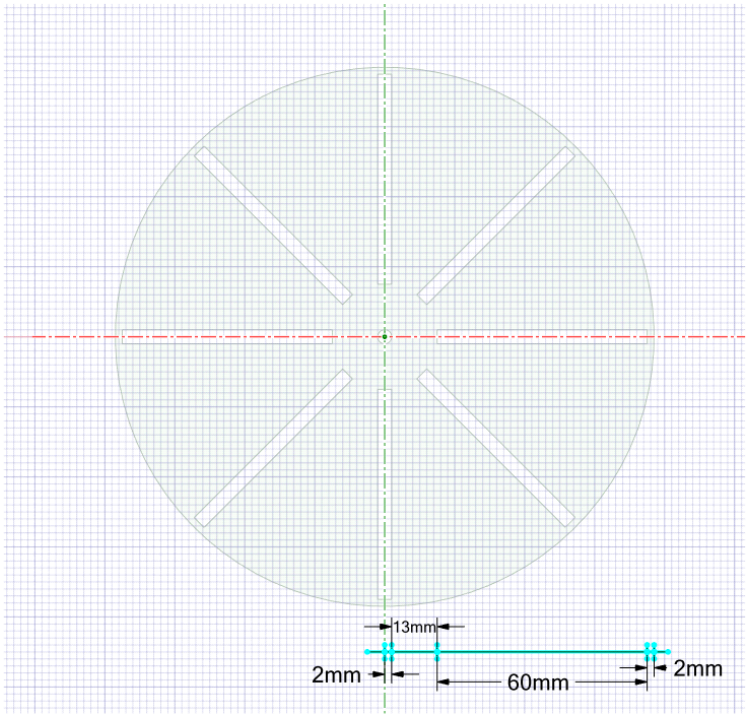


Figura 15: Eixo do paddlewheel com suas dimensões.

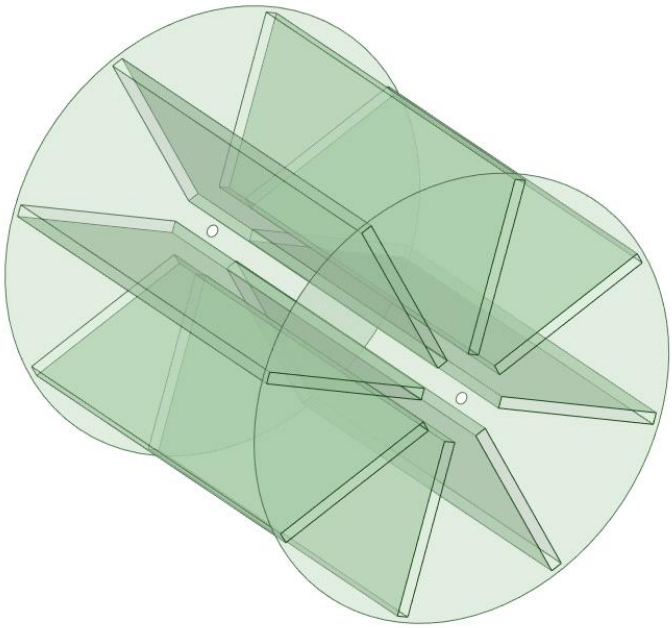


Figura 16: Modelo do paddlewheel montado.

Dessa forma, o projeto montado permite um fluxo constante dentro do tanque, podendo ser escolhida diversas velocidades de rotação, onde foi usado exclusivamente uma velocidade de 30 rpm.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelo de Turbulência *k-ε*

Os resultados do modelo de turbulência *k-ε* apresentaram uma grande diferença quando comparado com outros trabalhos que fazem uso deste modelo. Principalmente pelo fato dos trabalhos não considerarem a entrada de ar e a queda da água proporcionada pelo uso de *paddlewheel* com o sistema e como isso pode afeta-lo. Podemos ver a diferença na Figura 17, onde inicialmente a velocidade logo depois do *paddlewheel* é menor que a velocidade onde tem-se a queda de água.

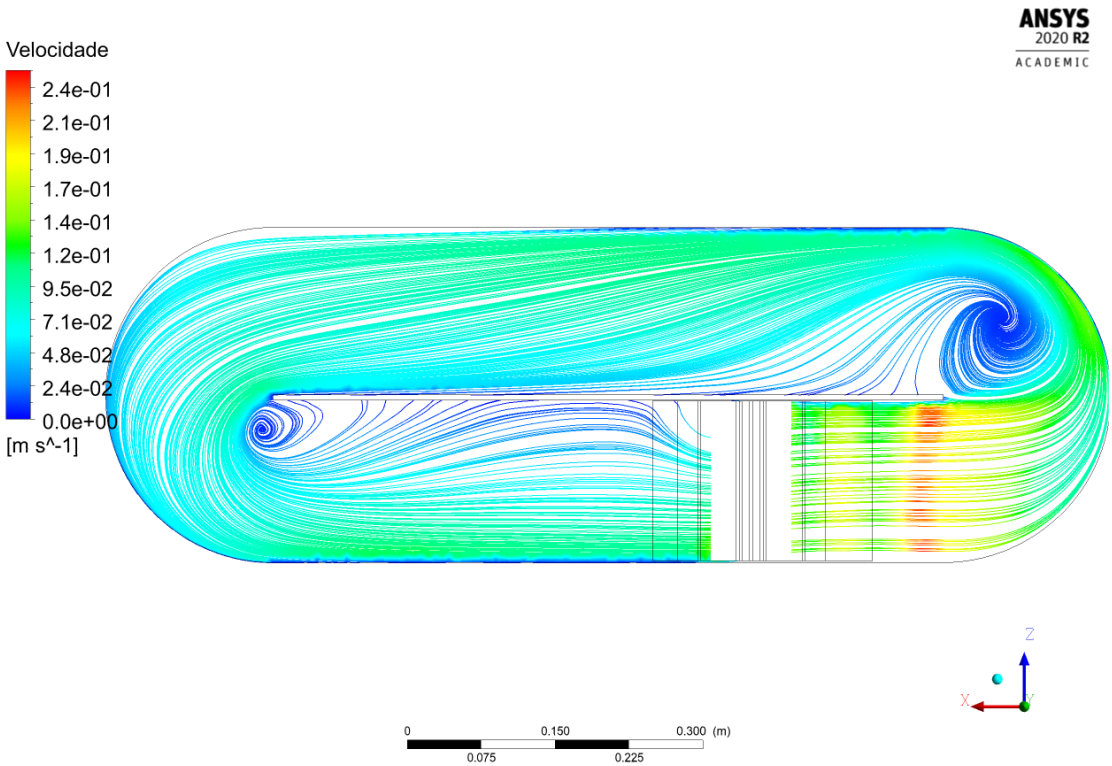


Figura 17: Linhas de velocidade na altura de 0,135 m, representando o modelo k-ε.

Outra diferença está na distribuição da velocidade: podemos observar que a velocidade não se comporta de forma tão linear no início do *paddlewheel*, o inicio da saída do fluxo. Além de que a mesma não apresenta valores maiores do que 0,25 m/s, quando deixamos o sistema a 30 rpm, durante todo o percurso do tanque. Vemos também duas zonas de recirculação, próximas as curvaturas do tanque, mas será discutido mais afundo sobre esse caso na seção 4.4.

4.2. Modelo Transition SST

Os resultados do modelo *Transition SST* têm as mesmas características

apresentadas para o modelo anterior, com exceção de leves diferenças entre os valores de velocidade. Na Figura 18 podemos comparar os dois modelos.

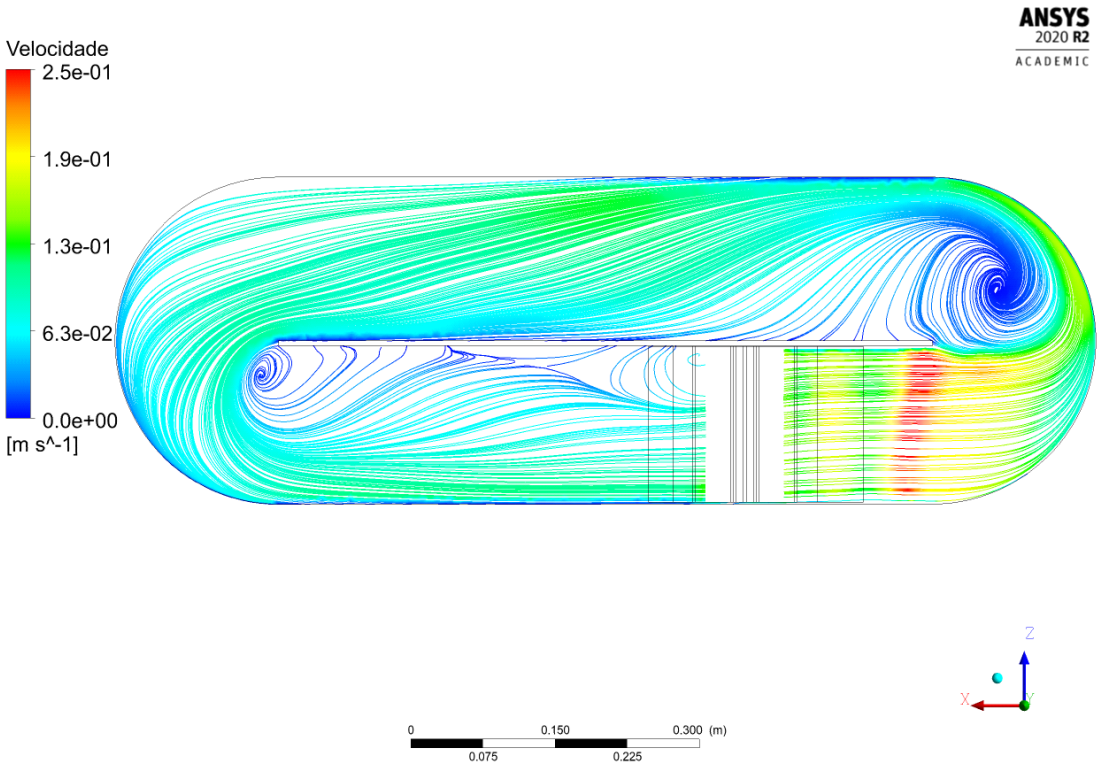


Figura 18:: Linhas de velocidade na altura de 0,135 m, representando o modelo Transition SST.

Podemos ver também que existem zonas de recirculação levemente maiores que o modelo *k-ε*, além de termos regiões com dinâmica turbulenta de velocidade na área central antes do *paddlewheel*. Por fim a diferença final está em como este modelo apresenta uma região com velocidade mais intensa logo na primeira zona de recirculação.

4.3. Escolha do Modelo Principal

Dentro do protótipo foram traçadas duas retas, onde a cada 5 cm ocorreu uma medição da velocidade da correnteza, por meio de uso de um micromolinete. A escolha do modelo principal vai partir da semelhança entre os resultados calculados e os resultados obtidos a partir das medições no protótipo.

É preciso deixar claro que as retas foram traçadas próximas às paredes externas do protótipo devido a uma análise prévia dos modelos (Figura 17 e 18). Como a velocidade da água no sistema mantém uma média baixa (com uma velocidade máxima prevista de 0,25 $m.s^{-1}$), tivemos que escolher uma reta onde as

velocidades estivessem o mais próximo possível do raio de alcance do equipamento de medição utilizado. Logo as retas deviam ser opostas a parede central onde temos valores menores de velocidade e índice de vórtice. A partir destas condições obtemos a Figura 19 e Figura 20.

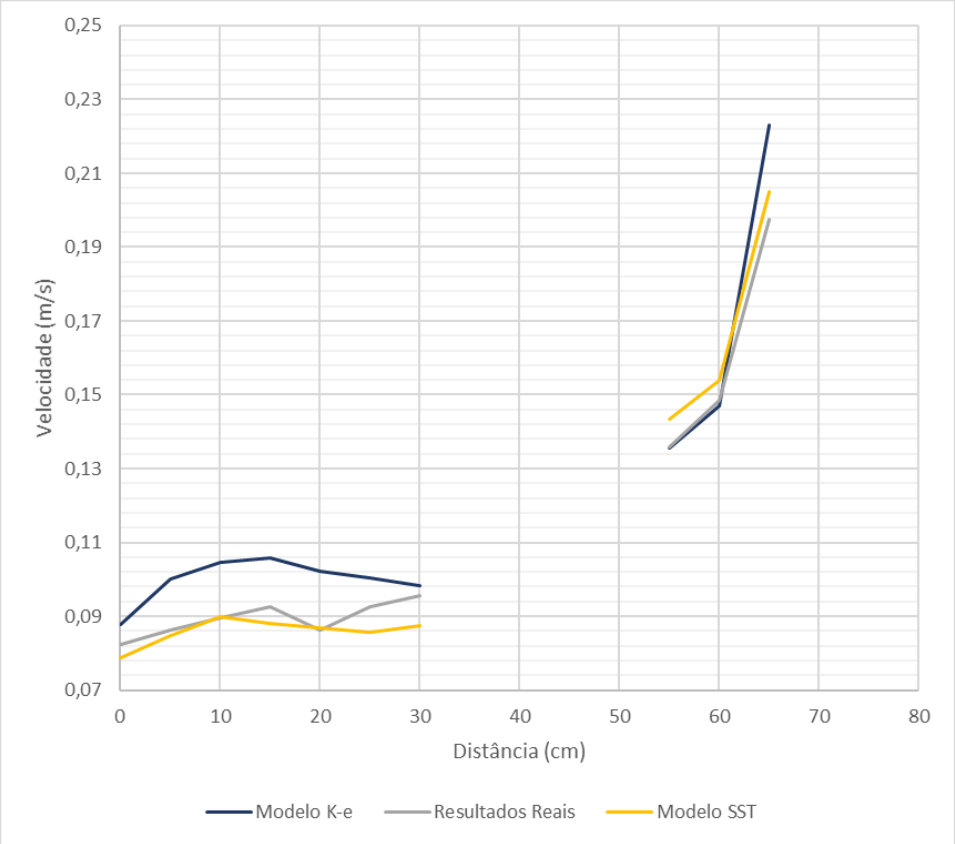


Figura 19: Velocidade em decorrer da distância da reta, Linha Inferior.

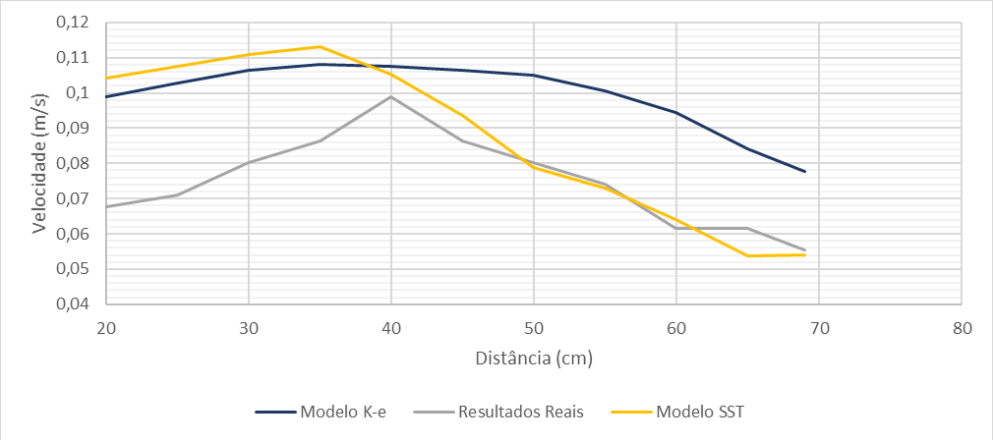


Figura 20: Velocidade em decorrer da distância da reta, Linha Superior.

Inicialmente na Figura 19 é visível como o comportamento dinâmico da curva do Modelo *SST Transition* se aproxima muito ao da realidade. Temos os valores de velocidade menores que 0,1 m/s no início, tendo uma leve aceleração nos primeiros 30 centímetros. Finalizando a reta, a velocidade aumenta rapidamente logo após o *paddlewheel*, indicando o local da queda de água causada pelas pás; aqui os resultados dos dois modelos são bem semelhantes aos dados reais obtidos no protótipo.

No entanto, olhando superficialmente a Figura 20, a semelhança entre os dois modelos e os dados do protótipo é bem menos aparente. Mas ao observar os resultados, é possível perceber dois motivos que indicam o Modelo *SST Transition* como o modelo com maior semelhança com o protótipo. Primeiramente, o Modelo *SST Transition* apresenta melhor aproximação com o protótipo para baixas velocidades, assim como ocorre na Figura 19. Em segundo lugar, o comportamento das curvas: no protótipo começa com velocidade baixa, ocorrendo uma aceleração até os 40 centímetros, e depois novamente uma redução da velocidade, tendencia melhor reproduzida na curva do Modelo *SST Transition*.

Usando o princípio da soma dos quadrados dos erros, $\Sigma(\text{Erro}^2)$, é reprensentado numericamente como o Modelo *SST Transition* é a melhor opção, onde tem-se $\Sigma(\text{Erro}^2)_{k\text{-}\varepsilon} = 8{,}10\text{x}10^{-3}$ e $\Sigma(\text{Erro}^2)_{sst} = 4{,}83\text{x}10^{-3}$. Esse comportamento é notado quando buscamos valores de velocidade dos modelos anteriores aos medidos no

protótipo. A Figura 21 mostra como se comporta a curva de velocidade do Modelo *SST Transition* extraído do software ANSYS Fluent, podendo ver a semelhança com a curva do protótipo.

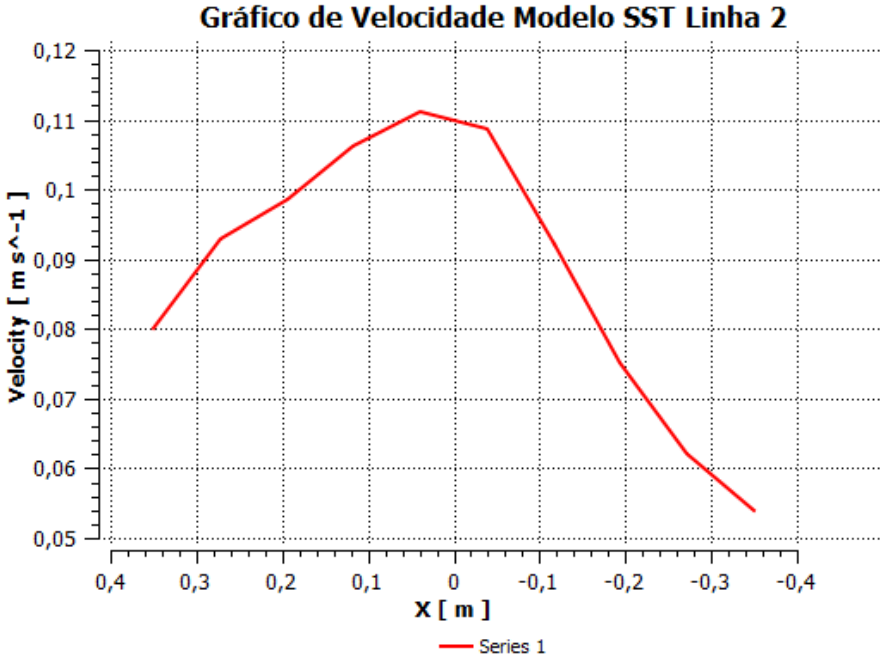


Figura 21: Curva comportamental de velocidade do Modelo SST Transition.

Deste modo, escolhemos o Modelo *SST Transition* como o modelo principal, seguindo as análises feitas nos gráficos das retas. A partir deste momento todos resultados e análises serão feitas com base em resultados obtidos por este modelo.

4.4. Utilização do Modelo

Antes de utilizarmos o modelo precisamos avaliar o erro que o mesmo proporciona quando comparamos com a realidade. Entretanto como visto na Figura 21, o modelo apresenta uma leve divergência na curva de velocidade quando comparamos valores e não seu comportamento. Logo vamos desconsiderar essa divergência e partir do ponto de que avaliaremos o modelo conforme os pontos que ficaram próximos da realidade. A partir deste ponto, temos variação do erro percentual indo de ± 0,27% até ± 8,6%, e vamos considerar esta variação em toda análise do projeto.

A partir do modelo principal podemos analisar parâmetros e condições que não são perceptíveis a olho nu. Por exemplo, com o modelo podemos ver a incidência de vórtices no sistema, ou seja, áreas de recirculação. Nestas áreas temos uma leve zona de mistura, entretanto também temos menores velocidades, tendo como

consequência a sedimentação das algas. Novamente observando a Figura 18, vemos estas áreas de possível sedimentação, possibilitando estratégias para evita-las.

A existência do modelo também nos permite a estimativa do volume que esteja estagnado, ou seja, o volume morto. Para isso vamos adotar que toda partícula do sistema que se mova com uma velocidade inferior à 0,01 m/s, é considerada como volume morto. Com isso, o software fornece a Figura 22, que representa aproximadamente 16% do volume total do sistema, sendo este percentual a soma das partículas que se enquadram nas condições estipuladas.

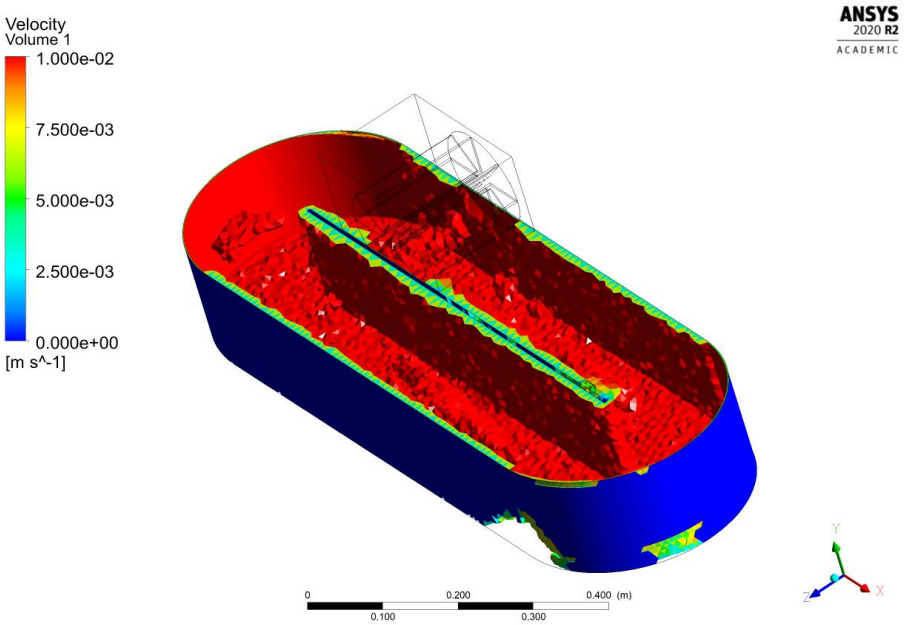


Figura 22: Volume morto com escala de velocidade até 0,01m/s.

Conforme Hadiyanto et al., (2013), existem alguns meios de minimizar o volume morto no sistema: aumentar a rotação do *paddlewheel*, aumentar a relação entre comprimento e largura do canal, e a instalação de defletores de fluxo. Entretanto o protótipo que temos não permite a aumentar a relação de comprimento e largura do canal, além de que o aumento da rotação do *paddlewheel* pode agredir os organismos biológicos. Sobra então o uso de defletores de fluxo, que podem ser testados com o uso do modelo principal e depois implementados, caso exista significância na diminuição do volume morto.

Outra possibilidade com o modelo é a previsão de áreas onde se pode esperar a deposição de sedimentos. Esta previsão pode ser feita a partir dos resultados de velocidade de fundo do modelo, e pode ser verificado com o protótipo feito, usando material que se destaca e que seja sedimentável no protótipo. Para tal, podemos

comparar a Figura 24, que indica a velocidade da água no fundo do modelo com a Figura 23, onde é possível visualizar o local onde o material se sedimentou.

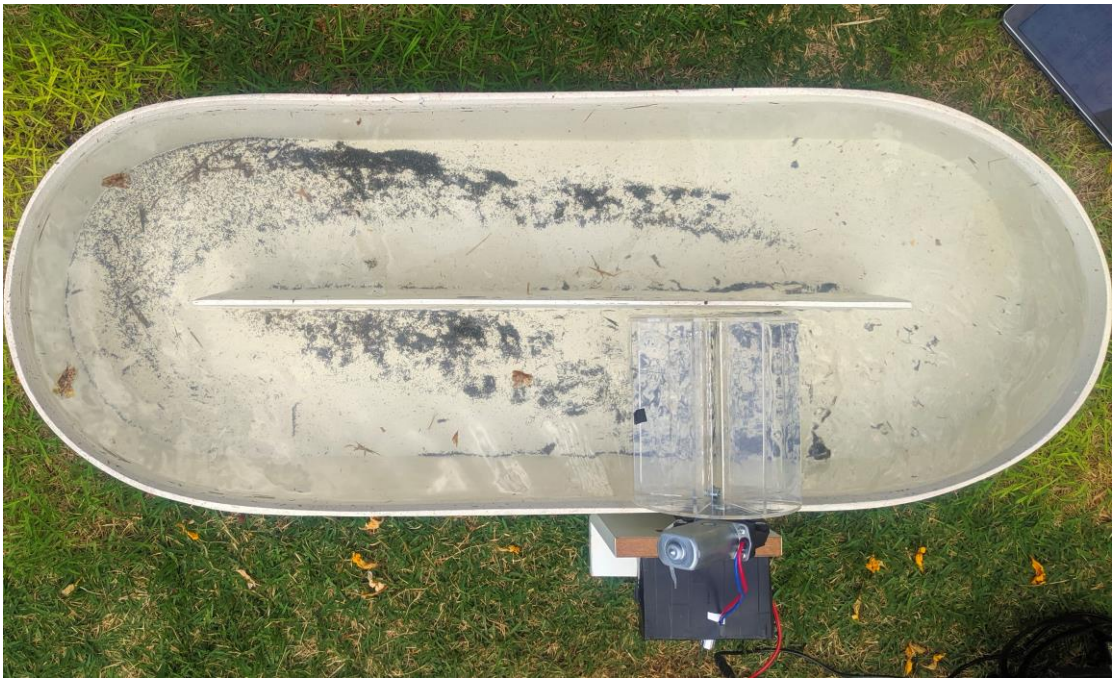


Figura 23: Sedimentos de fundo no protótipo.

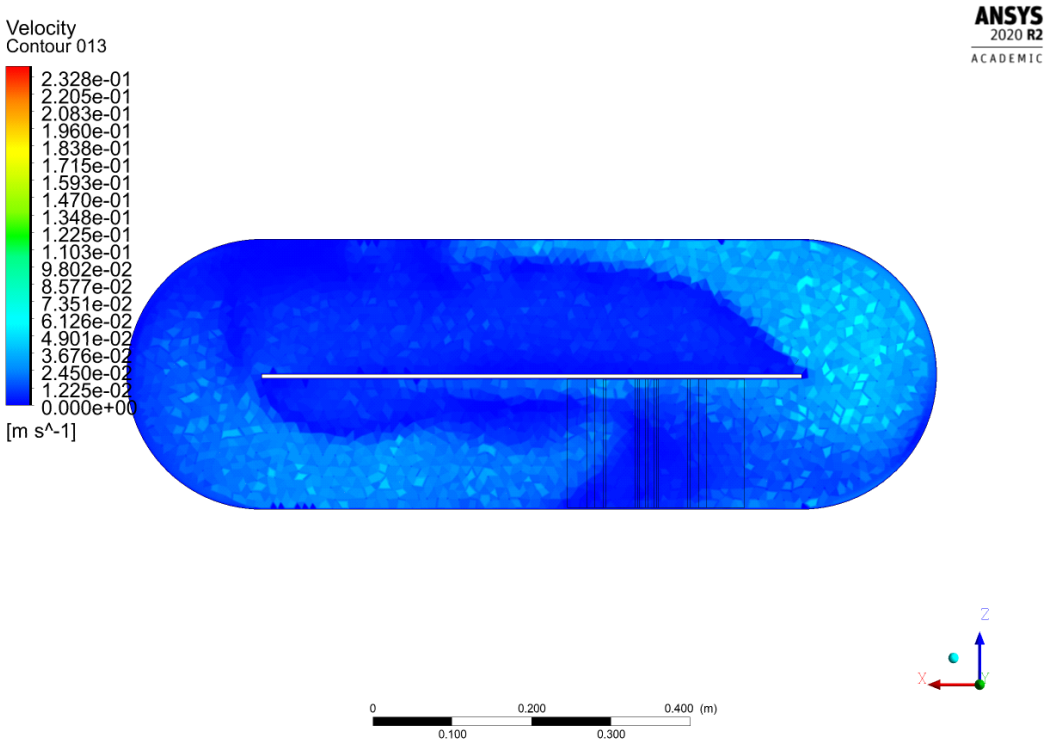


Figura 24: Velocidade de fundo do sistema.

Na seção 4.7 é apresentado um comparativo sobre esses resultados com o uso de defletores para verificar se os mesmos também interferem na velocidade de fundo

do sistema.

Por fim, temos a apresentação da velocidade no sistema como um todo, Figura 25, e como o *paddlewheel* mantém sua influência sobre o fluxo. Fica claro que a velocidade e fluxo do sistema são submissos a superfície, além de que a velocidade não tem um comportamento simétrico pelos canais. Também vemos que as maiores velocidades acontecem pela queda de água proporcionada pela rotação das pás. Mais a frente será modeladas outras possibilidades de fluxo e como isso afeta ao comportamento utilizado no comum.

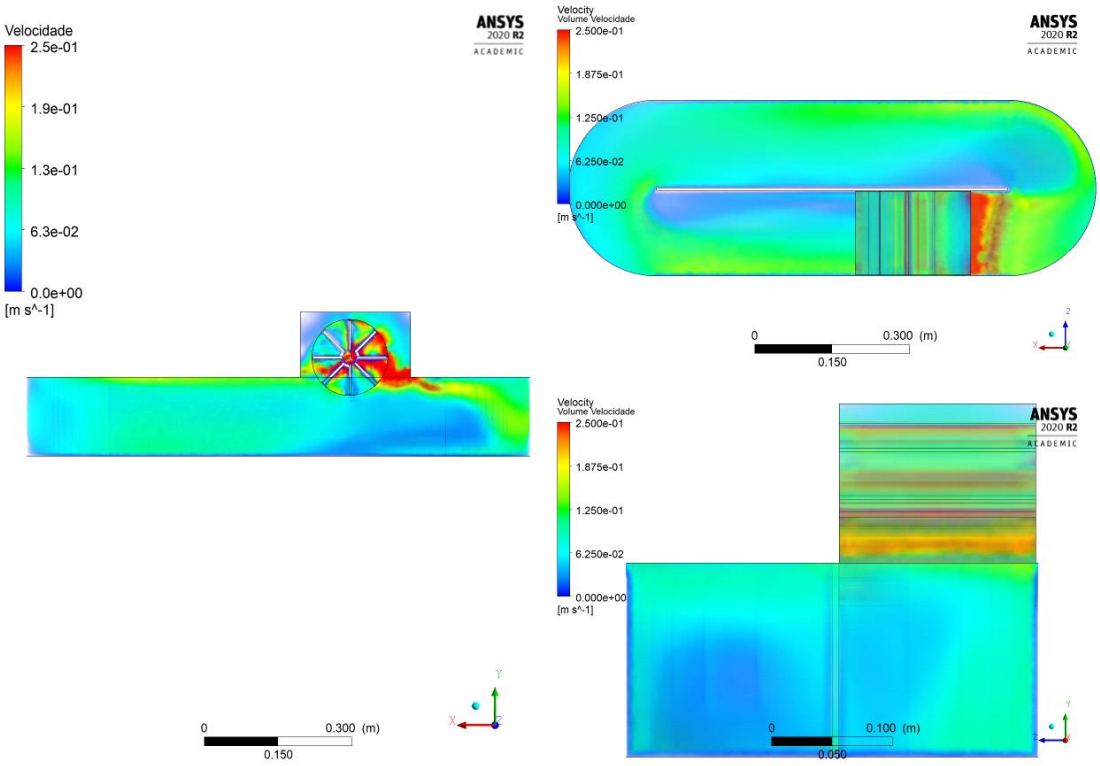


Figura 25: Velocidades do sistema vista em 3 perfis.

4.5. Transferência de Gases

A simulação da transferência de gases nesse modelo tem grande importância por estar se tratando de um sistema de tratamento biológico, principalmente pelo uso da biomassa algal. Logo a captura de gás carbônico do sistema, usado no processo de fotossíntese, é essencial.

Para tal modelo precisamos simular todo o sistema em contato com o ar atmosférico além de adicionar ao modelo atual a transferência de massa entre o ar atmosférico e o fluido. Precisamos também validar tal modelo com quantificação de oxigenação do sistema de escala laboratorial em diferentes zonas. Devido a tal

complexidade, ficaremos apenas na observação da fluidodinâmica do sistema e como ela interage na oxigenação do sistema, sem abranger a complexidade de transferência de massa.

Neste caso, vemos que o modelo apresenta apenas uma região com maior velocidade e interação com o ar atmosférico, devido às condições disponíveis, sendo a região do *paddlewheel*. Inicialmente o *paddlewheel* é utilizado apenas para promover o fluxo no sistema, entretanto vemos que o mesmo tem leve ação na interação do fluido com o ar atmosférico quando temos o modelo multifásico. Assim a partir da Figura 25, percebemos que zonas de mistura no sistema ajudam a homogeneizar melhor a transferência de gases em zonas mais profundas. Mas a melhor proposta para a biomassa algal será o uso de aeradores em regiões de baixa velocidade, próximo a parede central e no fundo, buscando uma homogeneidade não só no fluxo, mas também na oxigenação do sistema.

4.6. Inversão de Fluxo

Com o posicionamento do *paddlewheel* próximo a curva do tanque, temos duas opções variantes de fluxo. A primeira variante, onde o fluxo está no sentido do *paddlewheel* para a curva mais próxima, foi a testada e validada pelo protótipo, onde conseguimos confirmar o modelo feito pelo CFD. Devido à direção do fluxo, temos um leve obstáculo no desenvolvimento da velocidade do fluido, onde o mesmo se encontra diretamente forçado em sua maior velocidade contra as paredes do sistema. Também podemos utilizar uma segunda variante, em que o sentido do fluxo é para o lado oposto, tornando o obstáculo muito mais distante e mantendo um fluxo mais constante na saída do *paddlewheel*.

Sendo assim, com o modelo validado *SST Transition*, basta mudar o sentido do fluxo e podemos comparar os resultados, avaliando a melhor proposta para o funcionamento do sistema. Inicialmente temos os primeiros resultados vistos na Figura 26, onde temos as linhas de velocidade para comparar com as do fluxo anterior.

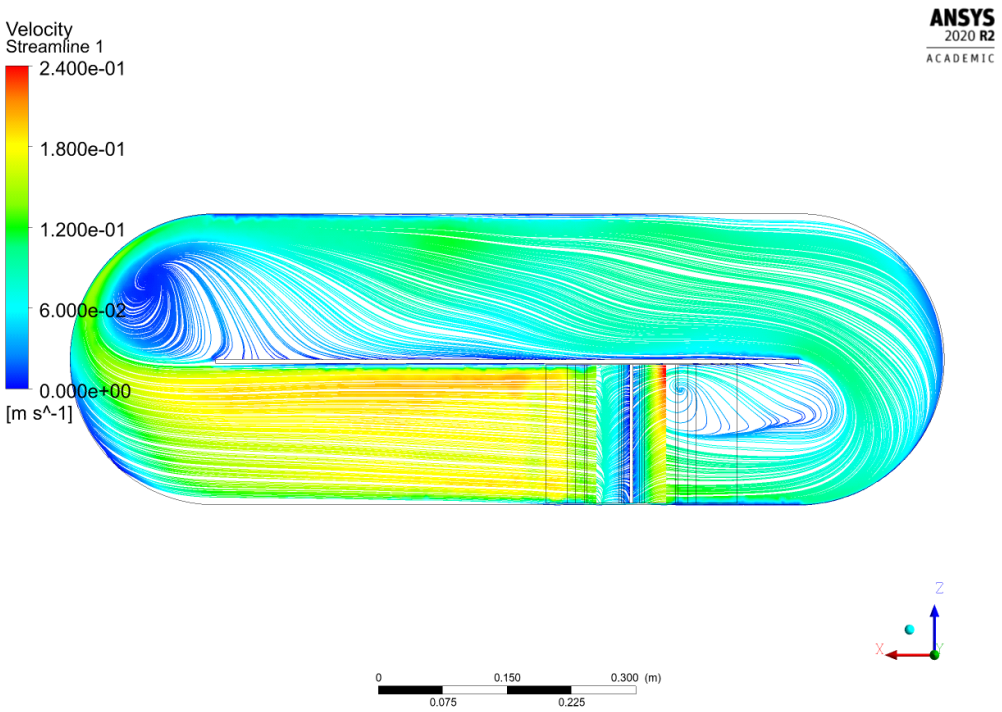


Figura 26: Linhas de velocidade na altura 0,135m, para fluxo inverso.

Comparando com a Figura 18, é possivel chegar a algumas conclusões sobre a inversão do fluxo. Primeiramente, a existência de vórtices nesse tipo de sistema será comum, independente do sentido do fluxo. Estes vórtices tendem a se manter presentes logo após a primeira curva da saída de fluxo. No entanto, onde na Figura 18 é claro a presença de dois vortices bem definidos, na Figura 26, somente um vórtice tem destaque, o segundo vórtice tem efeito bem reduzido. Na entrada do fluido no *paddlewheel* pode ser percebido um fluxo não linear, com a formação de vórtices bem menos intensos.

Mas também temos outras características que se diferem entre os dois sentidos de fluxo, a mais clara é como a velocidade se mantém mais linear na saída do *paddlewheel* quando não se tem um obstáculo logo em seguida. Porém, é possível perceber também que manter a saída de fluxo mais distante das curvas torna mais intenso a presença de velocidades baixas nessas regiões, devido ao fluido chegar com menor intensidade nas curvas. Para obter melhor noção sobre as baixas velocidades e como estas afetam nas zonas mortas, é possível comparar os resultados do volume de fluido com velocidade abaixo de 0,01 m/s. Para nosso fluxo inverso, 15,14% do volume total é considerado zona morta, um valor abaixo do volume aferido para o fluxo definido inicialmente (16%, veja seção 4.4) e tornando este sentido do fluxo uma escolha mais viável para o sistema.

Por fim, a Figura 27 apresenta a velocidade do fluxo inverso vista em 3 perfis, ficando mais claro como a velocidade é distribuída ao longo do sistema.

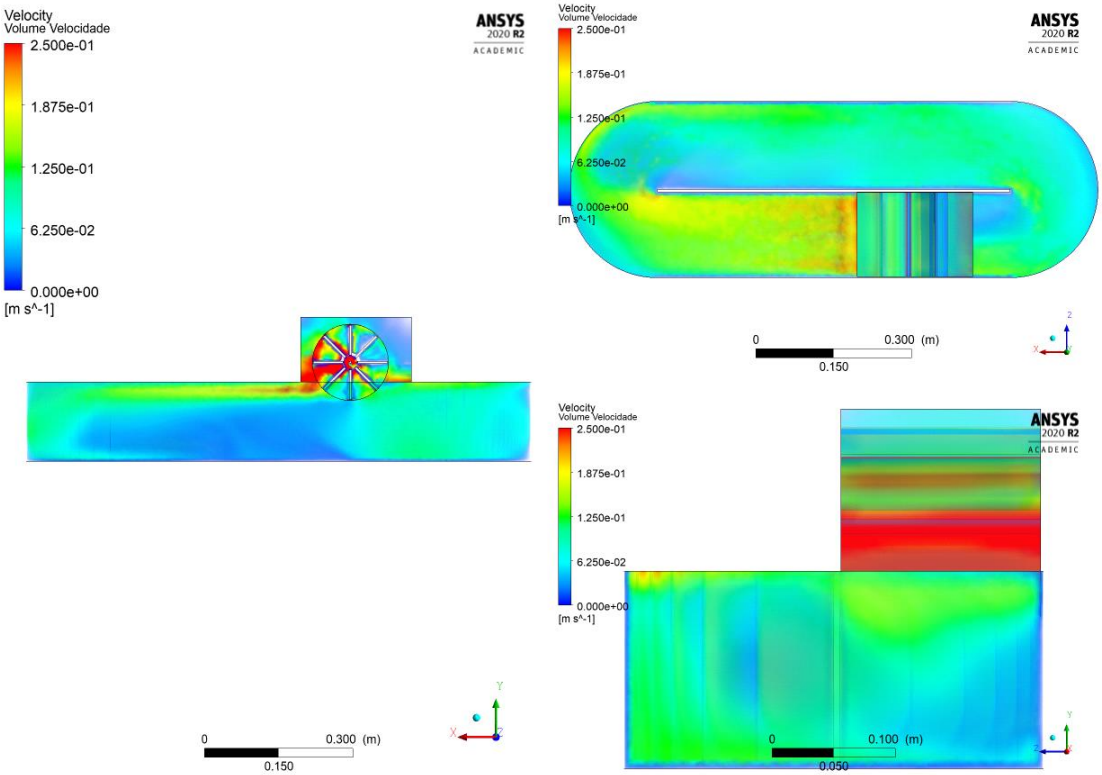


Figura 27: Velocidade do sistema de fluxo invertido, vista em 3 perfis.

4.7. Defletores de Fluxo

Seguindo nas possibilidades de melhorar o sistema de tratamento, temos a opção de usar defletores de fluxo nas curvas do tanque. Para tal modelo, iremos usar todas configurações do modelo já feito *Transition SST*, apenas com adição de paredes em formato semicircular a um raio de 8 cm do final da parede central e o uso do fluxo inverso (já indicado como melhor fluxo no sistema). Inicialmente espera-se que os defletores possam estabilizar a velocidade nas curvas, de forma que fique constante, independente da distância das paredes laterais. Mas o que é mostrado no modelo com os defletores de fluxo é discordante do esperado.

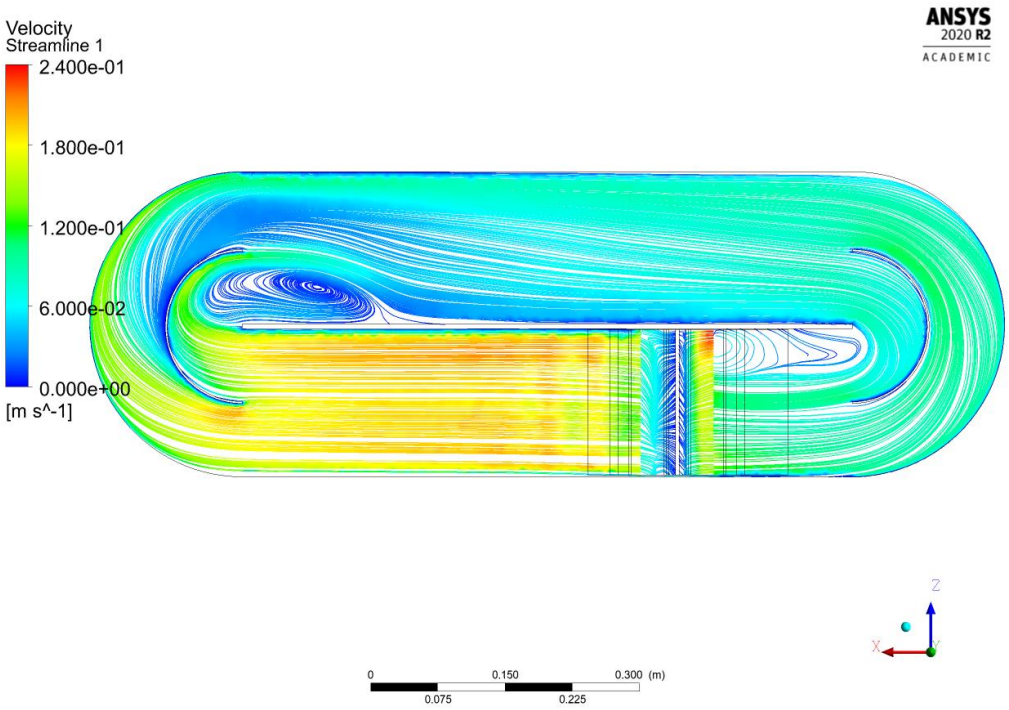


Figura 28: Linhas de velocidade na altura 0,135m, para defletores de fluxo.

Percebemos que o uso de defletores torna a velocidade da saída do *paddlewheel* até o início da primeira curva pouco mais constante. No entanto, a partir da primeira curvatura até a próxima, temos uma leve repartição do fluxo, obtendo velocidades maiores nas partes internas da parede e do defletor. A divisão deste fluxo faz com que tenhamos uma presença bem característica de vórtice na primeira curvatura, algo mais forte neste tipo de configuração do sistema.

Mas ainda temos uma boa atuação dos defletores em como o fluxo entra no *paddlewheel.* Com os defletores, a zona de baixa velocidade/recirculação na entrada do *paddlewheel* acaba sendo menor, além de apresentar velocidades mais contínuas e com menos regiões de baixa intensidade na curvatura. Podemos então confirmar a eficiência do uso de defletores quando olhamos o volume de zona morta, volume onde as velocidades estejam abaixo de 0,01 m/s, estando este no valor de 16,27% do volume total. Sendo este o sistema com maior zona morta do que o de fluxo invertido, porém menor do que quando comparado com o sistema inicial modelado.

Por fim, a Figura 29 apresenta a velocidade do sistema com defletores de fluxo vista em 3 perfis, ficando mais claro como a velocidade é distribuída ao longo do sistema.

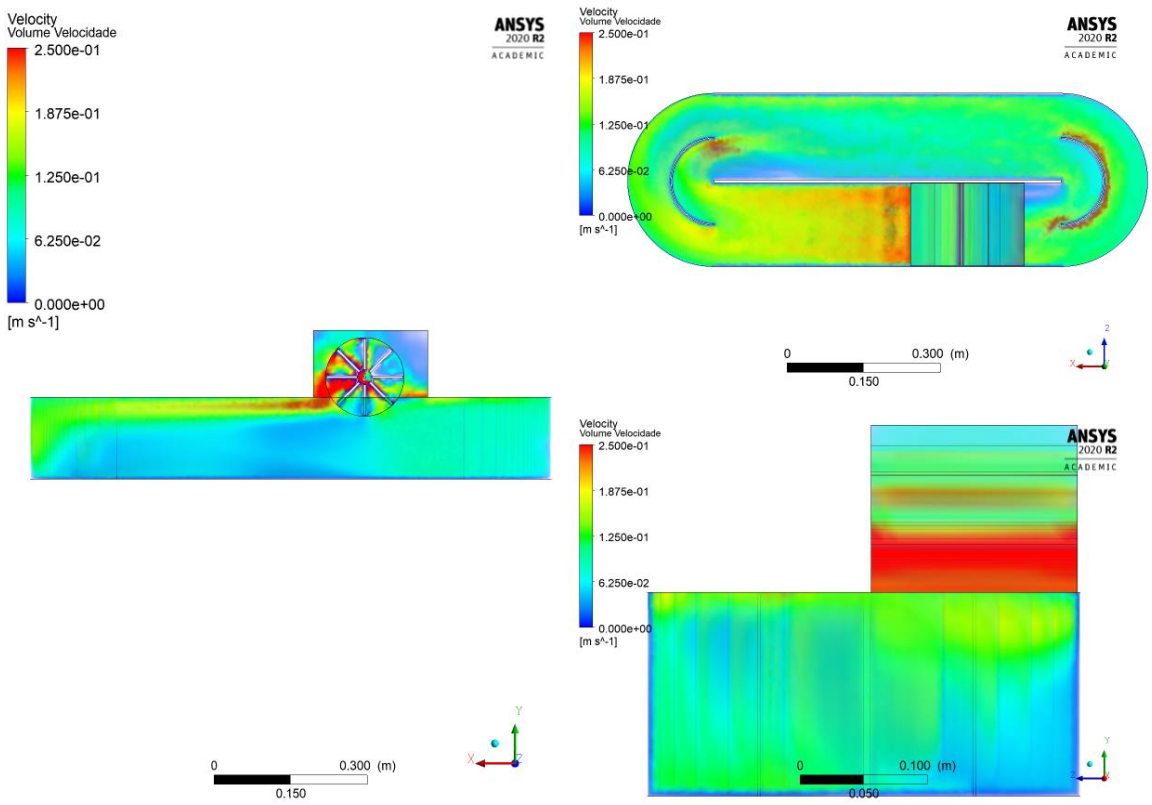


Figura 29: Velocidade do sistema com defletores de fluxo, vista em 3 perfis.

5. CONCLUSÕES

Com o modelo fluidodinâmico é possível observar melhor a fluidodinâmica dos reatores HRAP, observando zonas de mistura e zonas mortas. Principalmente pelo fato do modelo apresentar dados próximos a realidade. Sempre fazendo uso dos resultados da modelagem e comparando com as medições realizadas em um protótipo.

Os dados da modelagem permitem poder propor mudanças na geometria do tanque, como o uso de defletores nas curvas, o que gera melhoras na distribuição da velocidade dentro do reator. Também é visto como todo o modelo é caracterizado pela presença de vórtices e como os mesmos variam de acordo com as mudanças modeladas.

Com o modelo é definido que o sistema apresenta menor presença de zonas de baixa velocidade quando o fluido que é expelido pelas pás do *paddlewheel* não encontra resistência direta com paredes, por um maior tempo possível. Desta forma, é mais eficiente montar o *paddlewheel* no início da reta e não logo antes da curva, considerando a direção do fluxo. Além de que o uso de defletores tende a diminuir a área de atuação de vórtices no sistema, ao mesmo tempo que transmite melhor

linearidade no fluxo.

Quando se avalia os dois modelos matematicos, vemos que ainda existe uma necessidade de melhorar a precisão destes modelos, considerando os dados obtidos pelo sistema protótipo. Entretanto, considerando o erro disponível nos equipamentos usados para a validação, o modelo SST se mostra compatível para ser utilizado em projetos de modelagem de sistemas de lagoas de alta taxa. O estudo mostra ainda que o uso do modelo *k-ε* não é a opção mais próxima do real, mas ainda pode ser usado para projetos com poucas exigências relativas à complexidade do sistema.

6. REFERÊNCIAS

Ahmad, T., & Boyd, C. E. (1988). Design and Performance of Paddlewheel Aerators. *Aquacultural Engineering*, *7*, 39–62.

Ali, H., Cheema, T. A., & Park, C. W. (2015). Effect of Paddle-Wheel Pulsating Velocity on the Hydrodynamic Performance of High-Rate Algal Ponds. *Journal of Energy Engineering*, *141*(4), 1–12. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000219

Baker, A. J., Roy, S., & Kelso, R. M. (1994). CFD experiment characterization of airborne contaminant transport for two practical 3-D room air flow fields. *Building and Environment*, *29*(3), 253–259. https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)90021-3

Fluent, ANSYS. "ANSYS Fluent User's Guide", (Canonsburg, PA, USA, 2015) release 16.2 pp 1-2718.

Hadiyanto, H., Elmore, S., Van Gerven, T., & Stankiewicz, A. (2013). Hydrodynamic evaluations in high-rate algae pond (HRAP) design. *Chemical Engineering Journal*, *217*, 231–239. https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.12.015

Hidromechc. (n.d.). *Manual Mini Molinete* (pp. 1–5). www.hidromechc.com.br

Jones, W. P., Launder, B. E. Prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. International Journal of Heat and Mass Transfer. v. 5, p. 31-34, 1972.

Langtry, R. B., & Menter, F. R. (2009). Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA Journal*, *47*(12), 2894–2906. https://doi.org/10.2514/1.42362

Langtry, R. B. e Menter, F. R. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes. AIAA Journal, Vol. 47, No. 12, pp. 2894-2906, 2009.

Launder, B. E., Sharma, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disk. Letters in Heat and Mass Transfer, v. 1, p. 131-138, 1974.

Machado Xavier, M. L., Janzen, J. G., & Nepf, H. (2018). Numerical modeling study to compare the nutrient removal potential of different floating treatment island configurations in a stormwater pond. *Ecological Engineering*, *111*(July 2017), 78–84. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.022

Mendoza, J. L., Granados, M. R., de Godos, I., Acién, F. G., Molina, E., Heaven, S., & Banks, C. J. (2013). Oxygen transfer and evolution in microalgal culture in open raceways. *Bioresource Technology*, *137*, 188–195. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.127

Mortuza, S. M., Kommareddy, A., Gent, S. P., & Anderson, G. A. (2011). Computational and experimental investigation of bubble circulation patterns within a column photobioreactor. *ASME 2011 5th International Conference on Energy Sustainability, ES 2011*, (PARTS A, B, AND C), 1131–1140. https://doi.org/10.1115/ES2011-54205

Rodriguez, G. Y., & Ramirez, M. V. (2014). Cálculo Da Retenção Gasosa Global Em Biorreator. *COBEQ Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, *XX*, 1–8.

Yang, Z., Cheng, J., Ye, Q., Liu, J., Zhou, J., & Cen, K. (2016). Decrease in light/dark cycle of microalgal cells with computational fluid dynamics simulation to improve microalgal growth in a raceway pond. *Bioresource Technology*, *220*, 352–359. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.094

ANEXO 1

PRECISÃO MICRO MOLINETE

Ensaio	V.Média (m/s)	n(rps)	V.Calculada	Desvio
1	0,075	0,217	0,082	-9,6
2	0,116	0,383	0,128	-9,6
3	0,168	0,567	0,178	-5,8
4	0,194	0,65	0,201	-3,4
5	0,272	0,917	0,274	-0,9
6	0,324	1,083	0,32	1,1
7	0,375	1,267	0,371	1,3
8	0,428	1,467	0,426	0,5
9	0,48	1,633	0,471	1,8
10	0,548	1,85	0,531	3,1
11	0,813	2,767	0,783	3,7
12	1,059	3,883	1,09	-2,9
13	1,317	4,717	1,319	-0,2
14	1,578	5,567	1,553	1,6
15	1,837	6,633	1,847	-0,5
16	2,094	7,617	2,117	-1,1
17	2,352	8,45	2,346	0,2
18	2,61	9,383	2,603	0,3

Válida para $n \leq 22,99$

$R^2 = 0,999\ 665\ 67$

Epadyx = 0,015 732 765