



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Cláudia Soraya Horta Pinto

ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO NUMA  
VALA DE OXIDAÇÃO

Dissertação apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pela Professora Maria Rita Lacerda Morgado Fernandes de Carvalho Mesquita David e pelo Doutor Engenheiro Pedro Miguel Borges Lopes e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Julho de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Cláudia Soraya Horta Pinto

# ESTUDO DO COMPORTAMENTO HIDRÁULICO NUMA VALA DE OXIDAÇÃO

## STUDY OF THE HYDRAULIC BEHAVIOR IN AN OXIDATION DITCH

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,  
orientada pela Professora Doutora Maria Rita Lacerda Morgado Fernandes de Carvalho Mesquita David e pelo Doutor Engenheiro Pedro Miguel Borges Lopes

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade da sua autora. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC  
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2020



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte do meu percurso académico, nomeadamente:

Ao meu pai, Alírio Pinto, que mesmo não estando presente fisicamente foi o meu maior alicerce para o alcance dos meus objetivos, pela compreensão a cada exame estar a pedir a sua ajuda e que olhe por mim lá aonde quer que esteja.

À minha mãe, Fátima Pinto, que sempre esteve comigo, apoiando com todas as suas forças, mesmo sendo difícil estar longe uma da outra sempre esteve ali me incentivando a nunca pensar em desistir dos meus sonhos e pelo seu amor incondicional.

Aos meus orientadores Rita Fernandes de Carvalho e Pedro Lopes, pelo suporte dado ao longo desse projeto, pela disponibilidade prestada no esclarecimento de dúvidas, pela compreensão e paciência que tiveram comigo.

Agradeço à empresa CTGA pelos elementos fornecidos possibilitando a realização do meu projeto de estudo.

Agradeço ao Laboratório de Computação Avançada da Universidade de Coimbra – NAVIGATOR, por ter disponibilizado o cluster para realização das simulações.

À minha irmã, Cintia Ramos e ao meu cunhado Viriato M'Bana, pela sugestão de optar pela Universidade de Coimbra como o meu estabelecimento de ensino, penso que foi uma escolha bem acertada, pelo suporte dado nos momentos mais difíceis.

Às minhas colegas de casa, por aturar todos os meus defeitos e manias durante esse longo período de tempo, pelas constantes idas à sala de estudo, pela amizade construída que certamente vou levar para toda a minha vida.

Enfim aos meus irmãos, amigos, meu namorado e ao sr. Ernesto que estiveram comigo durante todo esse percurso académico, sem o vosso apoio afetivo seria tudo bem mais difícil do que foi. O meu muito obrigado!

## RESUMO

Atualmente há diversos motivos para estudar e avaliar a eficiência de operação de uma vala de oxidação, tais como o sistema de arejamento, a distribuição granulométrica dos sedimentos, a reação biológica de lamas ativadas e a estrutura do campo de fluxos de modo a garantir um tratamento eficiente das águas residuais.

Devido à preocupação em obter efluentes mais limpos, mas também com o menor gasto de energia possível, foram desenvolvidos processos de tratamento de efluentes mais eficientes, utilizando a menor quantidade possível de energia, garantindo um efluente mais limpo e menos agressivo ao meio ambiente.

O sistema de arejamento incorporado numa vala de oxidação é o maior responsável pelo consumo de energia numa estação de tratamento de água residual, sendo a avaliação do seu desempenho de extrema importância para otimizar a sua eficiência.

O principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de simulações computacionais, usando o código Open Source OpenFOAM®, de modo a averiguar a possibilidade de estudar o comportamento hidráulico do sistema de arejamento da vala de oxidação e comparar o efeito causado adotando diversos tipos de turbinas. Em particular, são estudadas 2 turbinas de diferente configuração e velocidades de rotação diferentes onde se avalia a perturbação no escoamento gerado por cada dispositivo. Pretende-se contribuir para o estudo da Vala de Oxidação, localizada na ETAR de Alijó, gerida pela empresa CTGA. Podendo concluir que o OpenFOAM® consegue prever o comportamento hidráulico de uma vala de oxidação, nomeadamente a distribuição de velocidade e o processo de arejamento da vala.

**Palavras-chave:** Vala de oxidação, Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), OpenFOAM®, Sistema de Arejamento.

## ABSTRACT

There are currently several reasons to study and evaluate the efficiency of operating an oxidation ditch, such as the aeration system, granulometric distribution of sediments, the biological reaction of activated sludge and the structure of the flow field in order to ensure an efficient treatment of residual waters.

Due to the concern to obtain cleaner effluents, but also with the lowest possible energy expenditure, more efficient wastewater treatment processes have been developed, using the least possible amount of energy, ensuring a cleaner effluent that is cleaner and less aggressive to the environment.

The aeration system incorporated in an oxidation ditch is the main responsible for energy consumption in a wastewater treatment plant, therefore its evaluation performance is extremely important to optimize the efficiency.

The main objective of this work is the development of computer simulations, using the Open Source OpenFOAM® code, in order to investigate the possibility of studying the hydraulic behavior of the oxidation ditch aeration system and to compare the effect caused by adopting different types of turbines. In particular, 2 turbines of different configuration and different rotation speeds are studied in order to evaluate the flow disturbance generated by each device. It is intended to contribute to the study of the Oxidation Ditch, located at the Alijó WWTP, managed by the company CTGA. It can be concluded that OpenFOAM® is able to predict the hydraulic behavior of an oxidation ditch, namely the velocity distribution and the aeration process of the ditch.

**Key words:** Oxidation Ditch, Computational Fluids Dynamics (CFD), OpenFOAM, Aeration Systems.

---

## ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Dissertação.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Vala de Oxidação.....	3
2.2 Processos de Arejamento de efluentes.....	5
2.3 Modelação Computacional da Dinâmica de Fluidos.....	7
2.3.1 Noções de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos.....	7
2.3.2 Equações de base.....	7
2.3.3 Propriedades físicas de um fluido.....	8
2.3.4 Modelo de Turbulência.....	8
2.3.5 Equações da Superfície Livre e Métodos Multifásicos.....	9
2.3.6 Aspectos da Resolução Numérica.....	11
2.3.6.1 Métodos dos Volumes Finitos.....	11
2.3.6.2 Malha de Cálculo.....	11
2.3.6.3 Pré-processamento.....	13
2.3.6.4 Opções de Cálculo.....	13
2.3.6.5 Pós-processamento.....	14
2.4 OpenFOAM®.....	14
3 METODOLOGIA.....	16
3.1 Descrição da Vala de Oxidação.....	16
3.2 Geração do Modelo Numérico.....	16
3.3 Construção da Malha de Cálculo.....	16
3.3.1 Geometria.....	16
3.3.2 Geração da Malha.....	18
3.4 Condições Iniciais e de Fronteira.....	21
3.5 Plano de Simulação Numérica.....	23
3.6 Pós-Processamento.....	23
4 RESULTADOS.....	25
4.1 Sistema de Arejamento Completo.....	26
4.1.1 Distribuição da Velocidade.....	26

---

4.1.2 Perfil Longitudinal.....	27
4.1.3 Perfil Transversal.....	28
4.1.4 Perfil Vertical no ponto (0,-0.3, Z).....	29
4.2 Sistema de Arejamento Composto por Uma Turbina.....	29
4.2.1 Distribuição da Velocidade .....	30
4.2.2 Perfil Transversal.....	33
4.2.3 Perfil Longitudinal.....	35
4.2.4 Entrada de ar.....	38
4.2.5 Perturbações ao longo da profundidade.....	42
4.2.5.1 Perfil Vertical analisado na vizinhança da turbina .....	43
4.2.5.2 Perfil Vertical no ponto (-1,-0.3, Z) .....	46
4.2.5.3 Perfil Vertical no ponto (1,-0.3, Z).....	48
5 CONCLUSÃO.....	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	52

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Uma vala de oxidação faz parte de um processo biológico de lamas ativadas no tratamento de águas residuais, no qual se usa um tempo de retenção hidráulico relativamente longo para remover os compostos orgânicos biodegradáveis. Tem a configuração de um canal oval ou em forma de anel e é equipado com dispositivos de arejamento e agitação mecânica.

A água residual depois de passar pelo tratamento preliminar e primário, entra na vala com a configuração adequada, geralmente equipada com os dispositivos de arejamento que promove o escoamento, arejando-o de modo a promover o crescimento microbiano e que pode ser considerado unidirecional.

O sistema de arejamento é essencial pois aumenta acentuadamente a concentração de oxigénio dissolvido, que diminui ao longo da vala à medida que as reações se dão e os sólidos são mantidos em suspensão. Visto que o sistema de arejamento consome cerca de 45 - 75% da energia necessária para tratamento da água residual, o sistema de arejamento tem um efeito significativo no custo de operação e manutenção de uma vala de oxidação, pelo que existe uma necessidade de otimização dos processos de arejamento a fim de reduzir o consumo de energia nas estações de tratamento de água residual.

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD na sigla inglesa) é um processo que utiliza modelos numéricos e algoritmos adequados para resolver as equações de derivadas parciais que traduzem os princípios de conservação da massa e quantidade de movimento que descrevem o escoamento dos fluidos. Existem vários softwares de CFD e diferentes opções de cálculo desenvolvidos, onde, vários modelos de CFD vêm sendo aplicados aos escoamentos em diversas estruturas possibilitando a capacidade de previsão sobre o comportamento dos fluidos, otimizando o processo e contribuindo para a diminuição dos custos dos ensaios laboratoriais. No entanto, infelizmente, a sua implementação o seu uso nos processos de engenharia habituais ainda constitui um grande desafio.

O OpenFOAM® é uma biblioteca de algoritmos capazes de resolver equações de derivadas parciais das equações que descrevem o escoamento dos fluidos para as mais diversas situações,

---

mediante diferentes hipóteses que o utilizador pode definir, como no caso particular do estudo da influência dos sistemas de arejamento no escoamento.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo em averiguar a possibilidade de utilização da biblioteca OpenFOAM® para simular a operação de um sistema de arejamento composto por diferentes turbinas atuando na superfície livre dos efluentes em uma vala de oxidação da estação de tratamento localizada em Alijó. Para tal, depois de construir o modelo da vala, selecionou-se um trecho onde serão analisadas várias velocidades de rotação das turbinas utilizando o “solver” interFoam, executado sobre uma malha dinâmica para simular a operação e a influência do sistema de arejamento no escoamento na vala e estudar a perturbação ocorrida na superfície livre da vala e zonas prováveis de entrada de ar

## **1.3 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, incluindo esta introdução, seguida de cinco capítulos divididos da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as valas de oxidação, os trabalhos realizados sobre as valas de oxidação com recurso a dinâmica dos fluidos computacionais, os sistemas de arejamento convencionais, modelação computacional das dinâmicas dos fluidos apresentando alguma noção da mecânica de fluidos e das etapas necessárias para a geração de um modelo de simulação numérico.

O capítulo 3 apresenta a estratégia utilizada para a obtenção do modelo, passando pela fase de geração do modelo, construção da malha, as condições de fronteira adotadas e “solver” escolhido.

O capítulo 4 apresenta uma análise dos resultados obtidos para cada modelo, efetuando uma comparação entre os resultados obtidos para cada turbina e a cada velocidade de rotação.

O capítulo 5 apresenta as conclusões retiradas.

O capítulo 6 apresenta a bibliografia consultada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Vala de oxidação

Com a necessidade crescente de tratar melhor as águas residuais e diminuir o impacto ambiental, elevar a eficiência do processo, e conseguir obter um efluente mais limpo e menos agressivo para o meio recetor a um menor custo de operação, surge também a necessidade de estudar melhor os vários dispositivos das estações de tratamento de águas residuais como as valas de oxidação.

A vala de oxidação faz parte do processo de lamas ativadas, desenvolvida na Holanda por Pasveer em meados de 1950, (Pasveer, 1969), e tem sido utilizada em pequenas cidades, comunidades isoladas e em algumas instituições. Normalmente a sua instalação consiste em um ou mais canais de configuração oval ou em anel com um tempo de retenção hidráulico longo para a remoção dos compostos orgânicos biodegradáveis.

Após o tratamento primário, o efluente entra na vala de oxidação, o processo de arejamento transporta o oxigénio para dentro do licor misto (mistura de lamas ativadas com o efluente) promovendo o crescimento bacteriano e, simultaneamente, a velocidade motriz assegura o contato entre os microrganismos e o licor misto. A turbina aumenta a concentração de oxigénio dissolvido, mas vai diminuindo à medida que a biomassa absorve o oxigénio e os sólidos são mantidos em suspensão. Pode ser adicionado um tanque anaeróbio antes da vala para melhorar a remoção biológica de fósforo, (Akunna, 2018).

A vala de oxidação pode operar pelo sistema contínuo ou intermitente. No sistema contínuo (figura 2.1, a) é utilizado um tanque de decantação secundário e é feita a reciclagem da lama na vala, enquanto o sistema intermitente (figura 2.1, b) não necessita de um tanque de decantação separado, a turbina é parada periodicamente permitindo a sedimentação da lama, no qual posteriormente é feito a descarga do efluente.

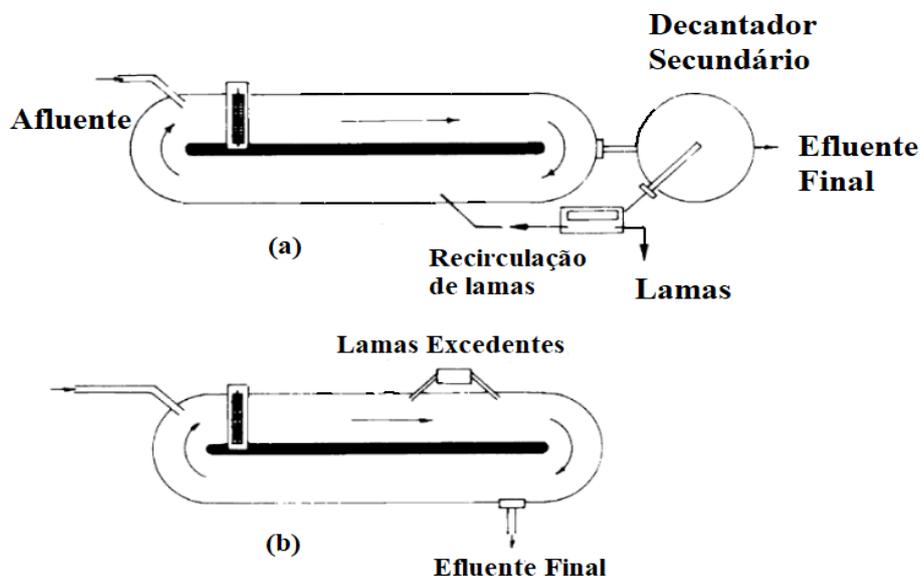


Figura 2.1- Vala de oxidação. (a) sistema contínuo e (b) sistema intermitente. Adaptado de Crawford, J.F. and Smith. P.G. (1984)

A utilização da vala de oxidação é vantajosa relativamente aos outros processos tratamento de água residual de lama ativada, pois é capaz de atingir os objetivos de remoção dos compostos com um baixo custo de operação e de manutenção, menor produção de lama e maior eficiência energética de operação. Mas em contrapartida, o seu efluente possui uma maior concentração de sólidos suspensos e para a construção da vala de oxidação é necessária uma maior área de construção relativamente aos outros processos de lama ativada.

De forma a conseguir aumentar a eficiência da vala de oxidação no processo de tratamento das águas residuais, diversos estudos envolvendo a vala de oxidação vem sendo levados a cabo. Entre os quais alguns recorrem ao CFD dos quais se destacam os seguintes:

- Fayolle et al., (2007) apresentaram simulações validadas experimentalmente em tanques de arejamento equipados com difusores de bolhas finas e misturadores axiais de baixa velocidade, e concluíram que o CFD é capaz de prever as características de fluxo e transferência de oxigénio tendo obtido velocidades axiais do fluido e perfis de retenção de gás, sendo o coeficiente de transferência de oxigênio reproduzido com precisão de 5%;
- Fan et al., (2010) simulou o campo de fluxo bifásico (sólido-líquido) tridimensional em uma vala de oxidação arejada com arejadores de superfície com recurso a uma ferramenta CFD. A simulação foi validada com experiências realizadas na mesma vala de oxidação medidas com PDA (Analisador dinâmico de partículas) pelo que

conseguiu obter resultados da simulação consistentes com os resultados experimentais medidos pelo PDA;

- Guo et al., (2013) utilizaram um modelo CFD para o estudo da velocidade do escoamento e a distribuição do oxigénio dissolvido na vala de oxidação. Analisando a relação existente entre o campo de velocidades e a distribuição do oxigénio dissolvido, chegaram a conclusão de que a distribuição da concentração do oxigénio dissolvido está relacionada com a velocidade de fluxo do canal e ambas são influenciadas pela geometria do canal e também pelo sistema de arejamento;
- Lei e Ni, (2014) desenvolveram um modelo em 3D trifásico baseado no fluido computacional, capaz de descrever a hidrodinâmica da Vala em estudo, as interações das águas residuais, bolhas de ar e lamas ativadas na fase líquida, gasosa e sólida. De acordo com os resultados obtidos entre as simulações numéricas e as medições das amostras para os parâmetros de qualidade de água indicou que o modelo simulou com precisão a cinemática do fluxo multifásico e os processos de oxidação de carbono, nitrificação e desnitrificação na vala de oxidação;
- Xie et al., (2014) utilizaram um pacote comercial de CFD, com o objetivo de estudar o campo de fluxo e a distribuição dos sólidos em suspensão numa vala de oxidação em larga escala, pelo que, o desvio médio entre as velocidades de fluxo simuladas pelo modelo bifásico e os dados reais foi de 5% e com base nos resultados obtidos foi proposto um esquema de operação otimizado para a vala de oxidação;
- Zheng et al., (2016) apresentaram um modelo CFD validado experimentalmente demonstrando o desempenho da vala de oxidação em condições operacionais diferentes, podendo otimizar o padrão do escoamento e o consumo de energia da vala de oxidação, obtiveram uma diferença baixa entre os resultados da simulação e os dados experimentais demonstrando que o modelo CFD é uma ferramenta poderosa capaz de prever o padrão do escoamento e o consumo de energia de uma vala de oxidação.

Dos estudos realizados, conclui-se que é possível estudar o escoamento numa vala de oxidação recorrendo a CFD. Nomeadamente é possível descrever a hidrodinâmica em valas de oxidação com diferentes geometrias dotadas de diferentes sistemas de arejamento, prevendo características do fluxo, a transferência de oxigénio e a distribuição do oxigénio dissolvido.

## 2.2 Processos de arejamento de efluentes

O arejamento é uma operação através da qual o oxigénio molecular ( $O_2$ ) é transferido da fase gasosa para a fase líquida (água residual) com recurso a um equipamento eletromecânico por difusão de ar comprimido ou oxigénio puro liquefeito na água residual, ou pela dissolução do

ar atmosférico na massa líquida por meio de arejadores que causam uma grande turbulência permitindo o contato entre o líquido e o ar atmosférico. O arejamento é feito com o objetivo de manter um determinado teor de oxigénio dissolvido na água residual, (Marrecos, 2016).

Os arejadores são classificados de acordo com a sua posição relativamente ao nível da água residual – arejadores submersos e superficiais:

Submersos:

- Arejadores de Bolha fina – as bolhas são produzidas através de placas de cerâmica ou de plástico ou membranas flexíveis;
- Arejadores de bolha grossa – as bolhas são produzidas por orifícios, injetores, bocais ou placas de corte;
- Turbina associada a difusor de ar comprimido – onde uma turbina de baixa velocidade para misturar ar difuso;
- Bocal de jato – injeção de ar comprimido no licor misto através de bocais instalados num tubo de distribuição.

Superficiais:

- Turbina arejadora de baixa velocidade – uma turbina de grande diâmetro utilizada para promover o contato entre o líquido e a atmosfera;
- Arejador flutuante de alta velocidade – hélice de pequeno diâmetro utilizada para promover o contato entre as gotas do líquido e a atmosfera;
- Rotor de escova ou de discos – palhetas ou discos montados num veio central horizontal, que rodam semimergulhados.

Atualmente, a dificuldade existente nas estações de tratamento de água residuais é encontrar um processo com alto desempenho no tratamento das águas e que o consumo de energia seja o mais baixo possível. A figura seguinte mostra o consumo de energia dos diversos processos de arejamento existentes.

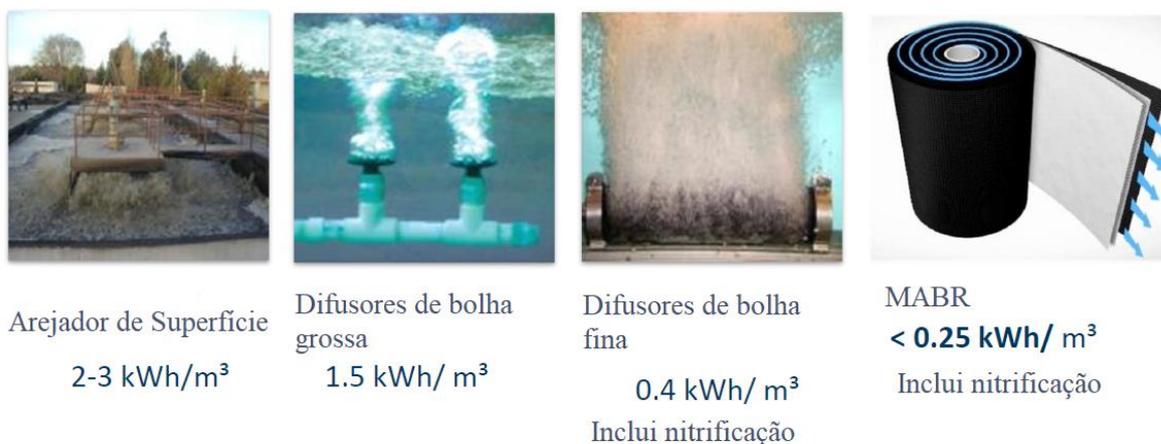


Figura 2.2- Consumo de energia pelos processos de arejamentos. Adaptado de CTGA ( Cornet, 2019).

## 2.3 Dinâmica de Fluidos Computacional

### 2.3.1 Noções de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos

Como já vem sido referido por diversos autores, a mecânica dos fluidos estuda qualquer fluido (líquidos ou gases) em repouso ou em movimento, a fim de se determinarem os efeitos por eles produzidos sobre as fronteiras que os delimitam ou, em alternativa, a influência que essas mesmas fronteiras exercem sobre as características do seu movimento (Oliveira, 2012). CFD é um processo que utiliza modelos numéricos e algoritmos adequados para resolver as equações que descrevem o movimento dos fluidos. O método de discretização mais utilizado na implementação do CFD é o Método dos Volumes Finitos no qual as equações são discretizadas na forma de integral em volumes de controlo.

### 2.3.2 Equações de base

Para descrever o comportamento de um fluido é necessário aplicar os princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento, pelo que as equações que descrevem o comportamento dos fluidos são as seguintes:

Conservação da massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Conservação da quantidade de movimento

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \rho \mathbf{g} + \nabla \sigma \quad (2)$$

onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $\mathbf{u}$  é o campo de velocidade tridimensional,  $\sigma$  corresponde ao tensor de tensões e  $\mathbf{g}$  é a aceleração da gravidade.

### 2.3.3 Propriedades físicas de um fluido

As propriedades físicas que descrevem o estado de um fluido são as seguintes:

- Massa Volúmica - traduz o quociente entre a massa de um fluido pelo seu volume:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3)$$

- Tensão Superficial - propriedade que se manifesta num fluido em contato com outro fluido, em que uma massa tem sempre uma ação sobre a outra, como por exemplo em água/ar há uma tendência da água em “puxar” as moléculas da sua superfície para o interior;

$$\sigma = \frac{E_s}{S} \quad (4)$$

onde  $E_s$  traduz uma dada energia e  $S$  corresponde a uma dada área.

- Viscosidade - propriedade que traduz a resistência do fluido à deformação:

$$\tau = \mu \frac{d\mathbf{u}}{dy} \quad (5)$$

A água residual afluyente na vala de oxidação possui características semelhantes ao da água pura, variando em alguns parâmetros devido a presença de resíduos de gordura, lama e entre outros constituintes. Os valores das propriedades são utilizados na equação base para caracterizar o comportamento do fluido no volume de controlo.

### 2.3.4 Modelo de Turbulência

Um escoamento diz-se turbulento quando as partículas apresentam um movimento aleatório e caótico, isto é, a velocidade apresenta componentes instantâneas que se podem considerar flutuações relativamente ao movimento geral do conjunto do fluido.

A teoria mais aceita para o modelo de turbulência é a baseada no princípio da “cascata de energia” e foi desenvolvida por Kolmogorov, que definiu o processo de transferência de energia das escalas maiores (escalas produtivas) para as menores (escalas viscosas ou dissipativas), descrito através do espectro de turbulência da energia. A escala mais pequena é descrita pelo comprimento ( $\eta$ ) e tempo ( $t_\eta$ ), dada pela seguinte expressão:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

$$t_\eta = \left(\frac{v}{\varepsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

em que  $v$  é a viscosidade cinemática molecular e  $\varepsilon$  a taxa média de dissipação de energia cinética turbulenta.

Com base nesta teoria, para obtenção de uma solução numérica para os escoamentos turbulentos seria necessário a utilização de um passo de tempo muito pequeno e uma malha muito fina, denominada por Simulação Numérica Direta (DNS) (Moin & Mahesh, 1998; Pope, 2000). Isto resulta num grande número de pontos da malha computacional para resolver todo o espectro de escalas temporais e espaciais, requerendo de grande capacidade computacional, o que não é possível.

Para a resolução do problema, surgiram os modelos de turbulência, onde se destacam: o modelo Large Eddy Simulation (LES) que resolve diretamente as maiores escalas de turbulência e modela as menores escalas de turbulência e as incluem nas soluções e o modelo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), que resolve as equações de Navier-Stokes com média de tempo usando as equações de Reynolds, decompondo a velocidade variável numa componente de valor médio temporal e um componente flutuante, substituindo-as nas equações originais e calculando a média temporal das equações obtidas.

Os modelos de turbulência mais aplicados em termos práticos são os modelos Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS).

### 2.3.5 Equações da Superfície Livre e Métodos Multifásicos

A interação entre o comportamento dos fluidos na superfície livre tem uma influência direta nos resultados, sendo necessário um modelo que represente a superfície livre ou um modelo multifásico para retratar as dinâmicas ocorridas na superfície livre.

Os fluxos multifásicos traduzem os escoamentos com diversos tipos de fases (sólidos, líquidos ou gases), resultando em 5 categorias de escoamentos multifásicos: gás-líquido, gás-sólido, líquido-sólido, líquido-líquido, gás-gás.

Existe uma grande dificuldade em encontrar um modelo matemático que resolva com precisão a problemática dos escoamentos multifásicos, dada a complexidade da geometria a analisar, os fluidos não se misturam uniformemente e existe o efeito causado pela turbulência, reações químicas e a transferência de massa e entre outros fenómenos.

Para modelar um processo escoamento multifásico é necessário realizar 3 etapas:

- Descrição do processo físico – que consiste em analisar se o escoamento compreende em mais do que uma fase de fluido de modo a definir o modelo físico apropriado para descrever o processo de modo a descobrir o modelo matemático propício para resolver o problema;
- Especificação do regime de escoamento do fluido;
- Escolha do modelo matemático.

Relativamente ao processo físico, têm vindo a ser desenvolvidas diversas abordagens para modelar devidamente os escoamentos multifásico das quais se destacam:

- Euler-Euler – as fases são consideradas contínuas e são tratadas separadamente. As equações de conservação são resolvidas para cada uma das fases (líquido-líquido, líquido-gás ou gás-gás);
- Euler-Lagrange – resolve as equações de conservação para a fase contínua (líquido ou gás) e a fase dispersa (ex. bolhas de ar ou partículas sólidas) é resolvida resolvendo as equações de movimento para cada partícula;

Em alternativa, quando os dois fluidos dispõem de uma fronteira fisicamente bem definida e não há lugar a mistura, como é o caso da interação ar-água, podemos usar o Volume de Fluido para traçar a superfície livre do escoamento.

O Volume de Fluido (VOF) foi desenvolvido por Hirt e Nichols (1981) e considera as fases contínuas representadas por uma fração volumétrica de cada fluido para determinar as propriedades da mistura, em função dessa fração volumétrica, um escalar, que varia entre 0 a 1, no qual, 0 significa que a célula se encontra vazia e sem fluido no seu interior, 1 significa que a célula se encontra cheia e um valor entre 0 a 1 significa que existe uma interface fluida na célula (figura 2.3) (Hirt e Nichols, 1981). Com este método o escoamento ar-água pode ser resolvido apenas com um conjunto de equações da conservação da massa e da quantidade de movimento.

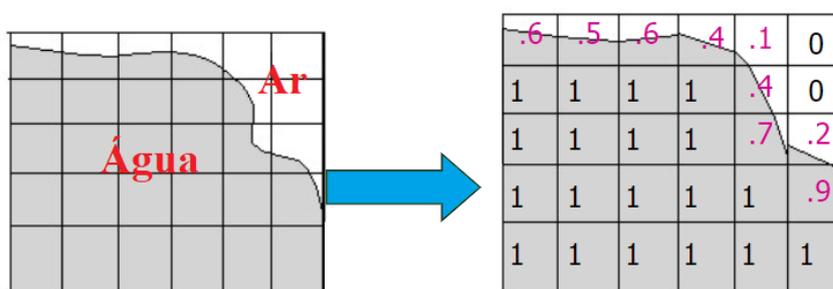


Figura 2.3- Demonstração do Metodo de Volume do Fluido.

## 2.3.6 Aspectos da Resolução Numérica

### 2.3.6.1 Métodos de Volumes Finitos

No método dos volumes finitos, o domínio é transformado em elementos não sobrepostos ou volumes finitos onde são aplicadas as equações que descrevem os fluidos. As equações diferenciais parciais são então transformadas em equações algébricas, integrando-as sobre cada elemento discreto. O sistema de equações algébricas é então resolvido para calcular os valores da variável dependente para cada um dos elementos.

No método dos volumes finitos, alguns dos termos da equação de conservação são transformados em fluxos de face e avaliados nas faces de volume finito. Porque o fluxo que entra num determinado volume é igual ao que sai do volume adjacente.

### 2.3.6.2 Malha de Cálculo

A Geração da malha de cálculo é uma fase crucial da solução numérica e deve seguir alguns critérios para garantir uma solução válida. A malha tem de satisfazer um conjunto de restrições

de qualidade e deve ser feito uma simulação para diferentes malhas para se avaliar a independência da malha.

A malha é composta por células poliédricas, tetraédricas, hexaédricas e entre outras formas em 3D (figura 2.4), limitadas por um número ilimitado de faces que por sua vez, possuem um número ilimitado de arestas e sem restrições na direção.

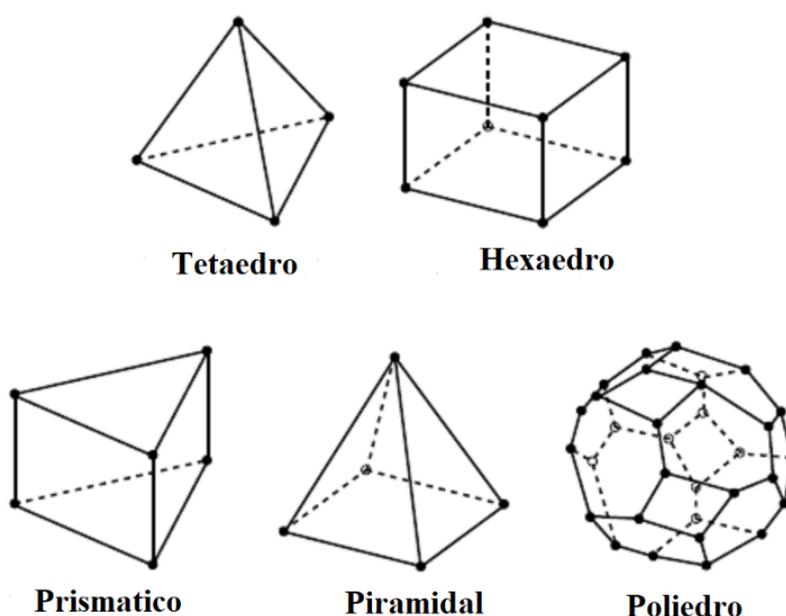


Figura 2.4- Tipos de células da malha de cálculo.

As malhas são classificadas em malhas estruturadas, malhas não estruturadas e malhas híbridas (Tu et al., 2013):

- Malhas estruturadas, os elementos estão distribuídos numa estrutura organizada de linhas e colunas, normalmente são compostas por células hexaédricas em 3D, necessitam de menos capacidade computacional e de armazenamento, mas para geometrias mais complexas podem conduzir a soluções irreais e inviáveis;
- Malhas não estruturadas, os elementos parecem terem sido geradas de uma forma aleatória, possui uma conectividade irregular, são compostas geralmente por células tetraédricas em 3D, exigem maior capacidade computacional, necessitam de maior tempo computacional para a obtenção de uma solução;

- Malhas híbridas, possuem uma mistura de malhas estruturadas e malhas não estruturadas de uma forma eficiente, no qual as partes regulares da geometria são preenchidas com malhas estruturadas e as partes complexas são preenchidas por malhas não estruturadas, são compostas por células tetraédricas, hexaédricas, prismáticas e piramidal em 3D, devido a combinação das malhas estruturadas e não estruturadas conduzem a soluções mais precisas e a uma melhor convergência para os métodos de solução numérica.

### 2.3.6.3 Pré-processamento

A fase do pré-processamento do caso em estudo consiste em definir os materiais e as propriedades e também em determinar as condições iniciais da simulação numérica e o que se passa nas fronteiras do domínio.

- **Definição das Propriedades**

É necessário definir os parâmetros e as propriedades relacionadas com as propriedades físicas, termodinâmicas ou de turbulência do fluido em estudo, essas propriedades vão depender do solver escolhido para obtenção da solução numérica.

- **Condições Iniciais e Fronteira**

As condições iniciais devem ser específicas para cada face da célula em análise, especificando quais são as propriedades e características das fronteiras no início do processo iterativo, como por exemplo, as características da velocidade, pressão, variáveis da turbulência e entre outras propriedades dependendo do solver escolhido para a resolução numérica.

### 2.3.6.4 Opções de Cálculo

O componente que resolve o problema é denominado de “Solver”. Pelo que o algoritmo numérico vai ser resolvido da seguinte forma:

- As equações diferenciais parciais são integradas sobre todos os volumes de controlo da região em estudo, aplicando as equações de conservação de massa e de continuidade para cada volume de controlo;
- As equações integradas são convertidas em um sistema de equações algébricas, gerando um conjunto de aproximações para os termos das equações integradas;
- As equações algébricas são resolvidas pelo processo iterativo.

Antes da aplicação do “solver” pretendido, deve-se definir alguns critérios de convergência, em que a cada iteração realizada deve ser feita a monitorização de forma a conferir os resultados obtidos.

#### 2.3.6.5 Pós-processamento

Depois da aplicação do “solver”, é gerado um documento no qual vai ser necessário efetuar um pós-processamento dos resultados obtidos da simulação numérica.

No pós-processamento o utilizador com recurso a um software vai poder visualizar, analisar e apresentar os resultados (gráficos, histogramas, animações, etc.).

### 2.4 OpenFOAM®

O OpenFOAM® (“Open Source Field Operation And Manipulation C++ libraries”), é uma biblioteca de CFD de livre acesso, utiliza a linguagem de programação C++ e vem sendo utilizada na resolução dos mais variados problemas da mecânica de fluidos, envolvendo reações químicas, efeito de turbulência, transferências de calor, eletromagnetismo, etc.

Trata-se de uma ferramenta que contém uma vasta livreria de aplicações: “solvers”, desenvolvidos para resolver os problemas relacionados com a mecânica de fluidos, como por exemplo o interFoam e o pimpleFoam; e os utilitários “utilities”, que envolvem todas as ferramentas necessárias para a manipulação dos dados (Foundation, 2014).

Para a realização da simulação primeiramente é necessário criar uma diretoria principal (ou caso de estudo) que contém 3 outras subdiretorias: “0”, “system” e “constant”. Na subdiretoria “0”, correspondente às condições de fronteira, deverão estar contidas todas as características iniciais do escoamento, como a velocidade, pressão, viscosidade, etc. A subdiretoria “constant”, deverá conter todos os ficheiros referente às propriedades constantes do fluido, bem como a diretora “polyMesh” onde está definida a malha de cálculo. Por último, a subdiretoria “system”, contém todos os parâmetros de controlo da simulação: o “controlDict”, o ficheiro de controlo ;o “decomposeParDict” no qual se definem as condições de divisão da malha no caso de um processamento paralelo, “setFieldsDict” para definir as condições iniciais dos fluidos, e o “fvSchemes” e “fvSolution” com as opções de esquemas e solvers para utilizar no decorrer da simulação.

Na figura 2.5, apresenta-se um esquema ilustrativo de como se deve ser organizado a diretoria no software OpenFOAM.

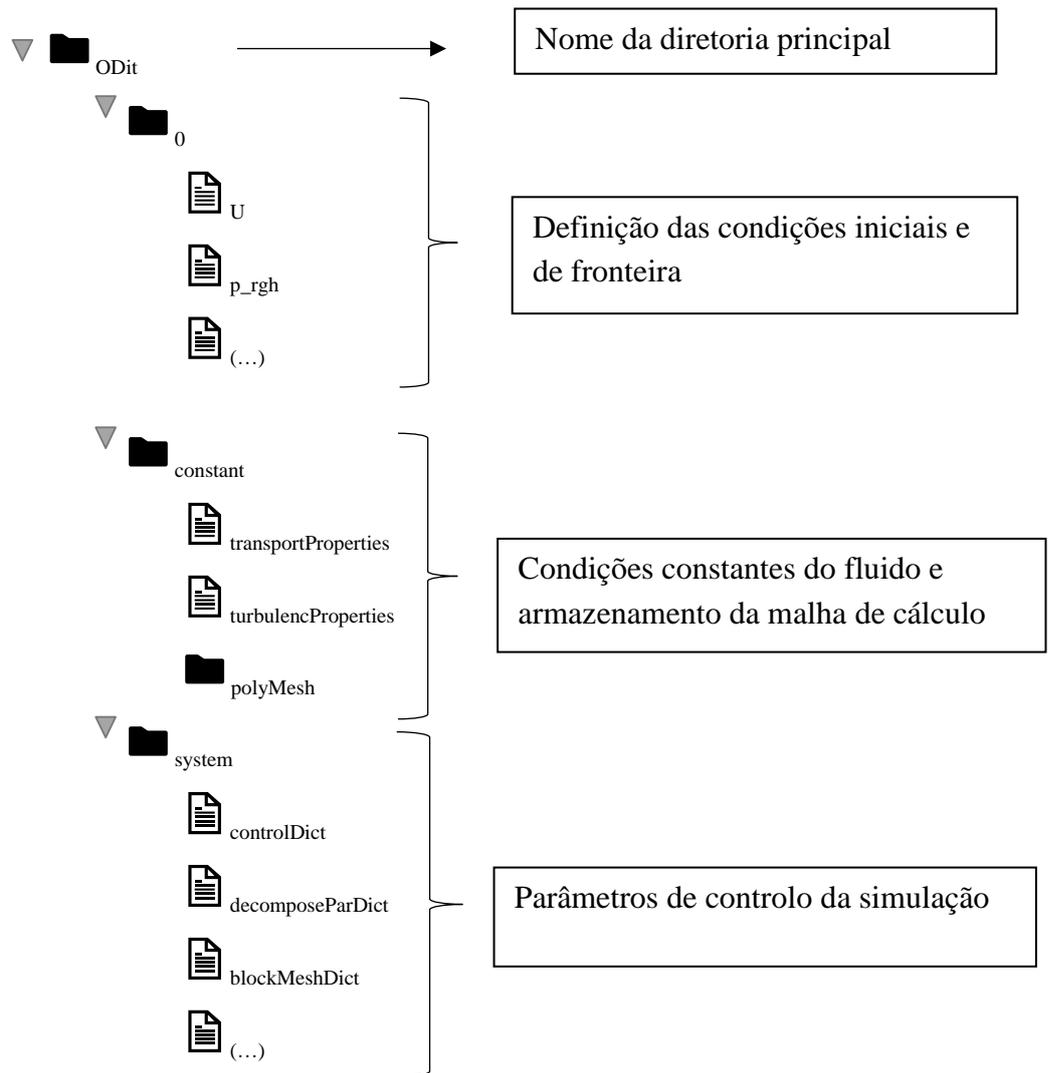


Figura 2.5- Exemplo da estrutura da diretoria em OpenFOAM®.

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Descrição da Vala de Oxidação**

A vala de oxidação localizada na ETAR de Alijó (figura 3.1), é uma estrutura hidráulica com aproximadamente 66 m de comprimento e tem aproximadamente 13.7 m de largura. A sua profundidade é de 2,8 m e se encontra equipada com um arejador de superfície, rotor de escova ou de disco, composta por uma cadeia de turbinas acopladas de 87 cm de dimensão, distanciadas a 7,5 cm uma da outra, totalizando um arejador com 4 m de largura (figura 3.2).

### **3.2 Geração do Modelo Numérico**

O principal objetivo é averiguar a possibilidade de estudar o comportamento hidráulico numa vala de oxidação através de CFD, de modo que para a construção do modelo é necessária a geometria de uma vala de oxidação e a construção de uma malha de cálculo, definições das condições iniciais e de fronteira, escolha do solver que melhor se adequa, realizar a simulação e análise dos resultados obtidos.

O modelo numérico tenta reproduzir cenários similares ao protótipo, analisando qual seria o impacto causado, introduzindo diversos tipos de arejamento na vala de oxidação.

Para a simulação foi utilizado o software OpenFOAM® versão 18.12 utilizando uma malha dinâmica para representar o sistema de arejamento e o “solver” interFoam para analisar e prever a representação da superfície livre. O solver interFoam é um “solver” que considera a presença de 2 fluidos incompressíveis, isotérmicos e imiscíveis usando uma interface baseada no método VOF (volume de fluido) para a descrição da superfície livre.

### **3.3 Construção da malha de cálculo**

#### **3.3.1 Geometria**

O trabalho inicial consistiu em, a partir da planta da vala de oxidação da ETAR localizada em Alijó, reproduzir um modelo representativo em 3D utilizando o software Autocad 2017, respeitando as dimensões da vala. Como a vala de oxidação é composta por duas partes

---

simétricas e não há trocas de fluxo entre as valas, optou-se por representar apenas uma parte da vala de oxidação.



Figura 3.1-Representação em fotografia da vala de oxidação da ETAR de Alijó e a representação da vala em Autocad.

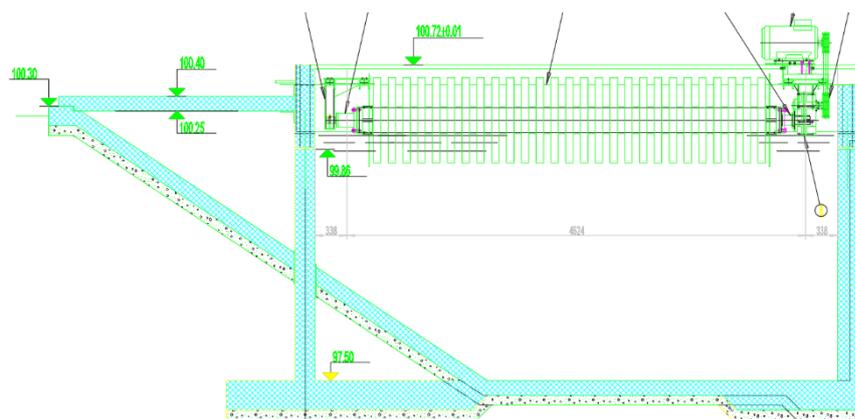


Figura 3.2- Corte detalhado do sistema de arejamento da ETAR de Alijó, Adaptado (CTGA).

Como a simulação com a vala de oxidação com as suas dimensões reais seria algo extremamente moroso e com uma malha bastante complexa e como o objetivo era analisar as

perturbações causadas pela introdução de um sistema de arejamento, a vala de oxidação inicial foi simplificada selecionando um trecho da mesma (zona circundada a vermelho na figura 3.3) e reproduzindo as condições deste trecho em um canal retangular com 1 m de largura, 1 m de altura e 6 m com o sistema de arejamento incorporado.

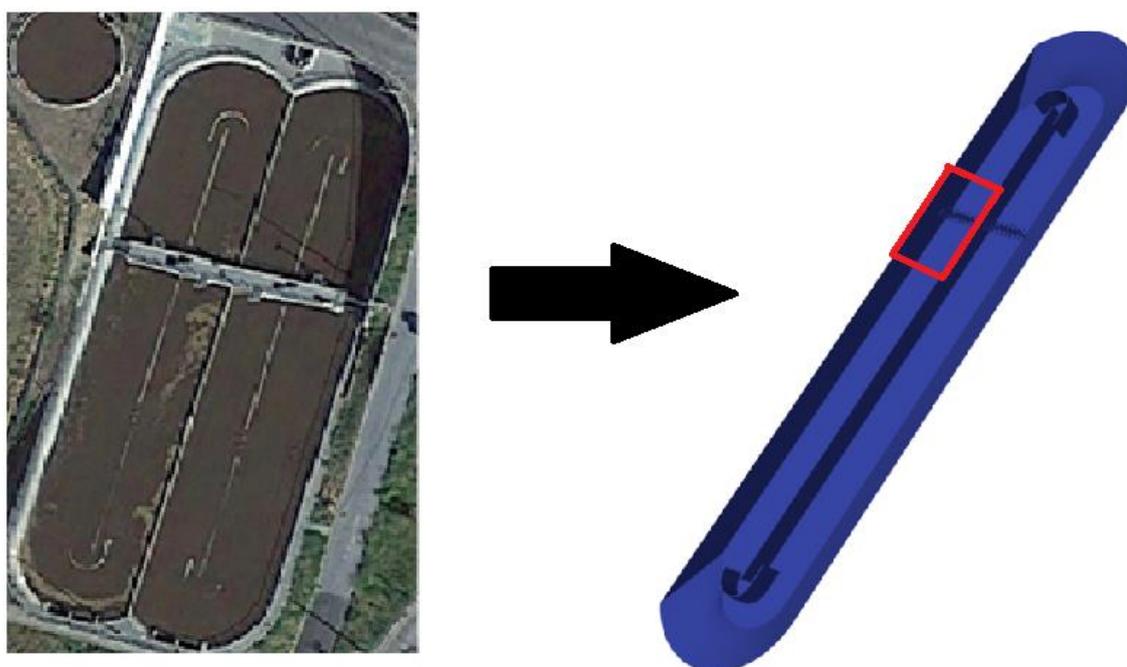


Figura 3.3- Representação da vala de oxidação da ETAR de Alijó.

De seguida foram exportados arquivos em formato estereolitografia (STL), no qual foi usado o software Salomé versão 7.8.0 de modo a identificar e separar todas as condições de fronteira da vala de oxidação, incluindo a turbina que move com uma velocidade de rotação específica.

### 3.3.2 Geração da Malha

#### I. Modelo Sem Sistema de Arejamento

A malha computacional foi gerada com recurso ao utilitário gerador de malhas cfMesh no qual foi necessário criar um ficheiro STL, contendo todas as geometrias da vala de modo a ser usada no ficheiro meshDict como surfaceFile. Posteriormente, foi feito o comando SurfaceFeatureEdges de modo a obter uma melhor forma nas bordas de interseção. Foi construído um ficheiro meshDict preenchendo as características principais da malha pretendida:

- SurfaceFile- contendo a geometria em formato stl.

- `maxCellsize`- indicando qual é o tamanho máximo de célula gerada no domínio, o tamanho máximo escolhido foi de 0,25 m.

- `localRefinement`- refinamento das paredes da vala definido foi de 0,1m.

De seguida foi efetuado o comando `cartesianMesh` criando malhas 3D, constituído predominantemente por células hexaédricas com poliedros nas regiões de transição em células de tamanhos diferentes, tendo como resultado a malha apresentada a seguir.

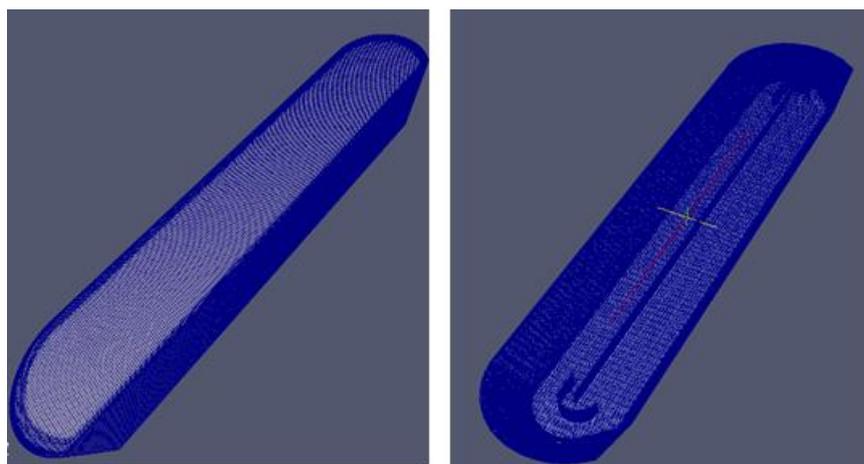


Figura 3.4-Volume da malha gerada pela `cartesianMesh`.

## II. Modelo Com Sistema de Arejamento

A malha de cálculo foi gerada com recurso ao utilitário gerador de malhas `snappyHexMesh` que gera automaticamente malhas tridimensionais a partir de geometrias de superfície trianguladas no formato estereolitografia (STL). Foi decidido gerar uma malha dinâmica de modo a ter uma vala estática e com arejadores girando em torno de um eixo, sendo possível analisar a influência dos arejadores no comportamento hidráulico da vala de oxidação. Foi necessário gerar uma interface de malha arbitrária (AMI) de modo a identificar corretamente a parcela da malha que modifica com o tempo.

Tentou-se reproduzir o sistema de arejamento composto por várias turbinas. A Figura 3.5.a) mostra o trecho da vala onde foi considerado um cilindro com a malha refinada de modo a conter o sistema de arejamento composto por as várias turbinas (figura 3.5, b) e dois modelos de turbinas diferentes, de modo a analisar a perturbação causada entre os dois tipos arejadores, turbina do tipo 1 (figura 3.5, c) turbina do tipo 2 (figura 3.5, d).

Para a geração da malha de cálculo foi necessário adicionar na diretoria principal alguns ficheiros contendo instruções de modo a gerar a malha pretendida:

- Um ficheiro `surfaceFeatureExtractDict`, tornando possível extrair algumas características das superfícies, na subdiretoria “system”;
- Arquivos em formato estereolitografia (stl) organizados em uma pasta “triSurface”, na subdiretoria “constant”;
- Um ficheiro que define a extensão do domínio computacional e uma densidade de malha de nível base, localizada na subdiretoria “system” denominada por `blockMeshDict`;
- Um ficheiro `snappyHexMeshDict`, localizado na subdiretoria “system”, contendo todas as características de refinamento da malha;
- Um ficheiro na subdiretoria system, denominado por `createPatchDict` que cria e define a interface de malha arbitraria, separando partes da malha mestre e a parte escrava;

De seguida, é preciso executar uma sequência de comandos: executar o comando `surfaceFeatureExtract` pedindo para o software extrair todas as linhas que intersectam duas superfícies e que formam um angulo entre si inferiores a  $150^\circ$ , posteriormente foi executado o comando `blockMesh` gerando uma malha de fundo com as dimensões predefinidas no ficheiro `blockMeshDict`, de seguida executar o comando `snappyHexMesh` para que o programa refina a malha de fundo originando a malha de cálculo pretendida. Foi necessário efetuar o comando `renumberMesh` que renumera a lista de células a fim de reduzir a largura de banda e por fim foi executado o comando `createPatch` que cria a interface de malha arbitraria e separa em duas componentes, uma parcela mestre e a outra escrava.

A figura 3.5 apresenta a malha resultante da combinação de todos os comandos executados.

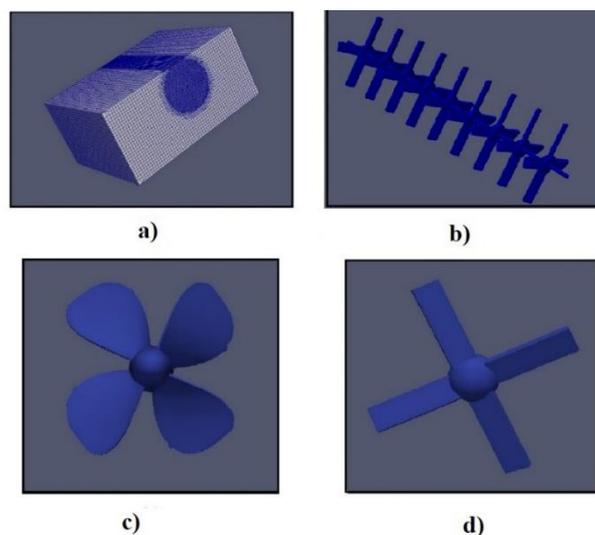


Figura 3.5-Volume da malha gerada pelo snappyHexMesh: a) malha resultante do canal retangular, b) sistema de arejamento com várias turbinas, c) turbina 1, d) turbina 2.

### 3.4 Condições Iniciais e de Fronteira

#### I. Modelo Sem Sistema de Arejamento

No modelo da vala completa sem um sistema de arejamento incorporado foi considerado dois tipos de condições de fronteira:

- Atmosphere, que representa a parte superior da malha no qual o ar pode fazer trocas com o exterior, sendo a pressão relativa definida igual a zero;
- Walls, que correspondem as paredes que constituem a vala de oxidação, com a condição de não deslizamento considerando as velocidades nas paredes igual a zero.

Não foi considerado nem “inlet”, nem “outlet” para a água que entra e sai da vala porque esta vala de oxidação é de grande dimensão, sendo que o efeito causado por eles é praticamente nulo.

#### II. Modelo Com Sistema de Arejamento

Para a definição das condições de fronteira no modelo com sistema de arejamento foram considerados as seguintes fronteiras:

- Atmosphere, que representa a parte superior da malha no qual o ar pode fazer trocas com o exterior, sendo a pressão relativa definida igual a zero;

- Inlet- corresponde a fronteira logo a entrada do volume de controlo considerado, por onde se dá entrada do fluido no volume de controlo;
- Walls- corresponde a parede que constituem a parcela de vala de oxidação considerada;
- Outlet- fronteira por onde se dá saída do fluido no volume de controlo;
- Fan- corresponde à turbina;
- AMI- “Cyclic Arbitrary Mesh Interface”, separando a parte da malha rotativa e estática, aplicando a condição de fronteira cyclicAMI.

As condições iniciais são definidas no diretório 0, descrevendo o comportamento das fronteiras para cada propriedade (velocidade, pressão, etc.). A tabela 3.1 exemplifica a condição inicial adotada para algumas propriedades no estado inicial da simulação.

Tabela 3.1-Condições iniciais adotadas para cada fronteira do modelo.

Propriedades	Fronteira	Tipo	Valor
Velocidade (U)	Atmosphere	pressureInletOutletVelocity	uniform (0 0 0)
	Inlet	inletOutlet	uniform (0 0 0)
	Walls	No Slip	-
	Outlet	inletOutlet	uniform (0 0 0)
	Fan/Propeller	movingWallVelocity	uniform (0 0 0)
	AMI	cyclicAMI	uniform (0 0 0)
Alpha.Water	Atmosphere	inletOutlet	uniform 0
	Inlet	inletOutlet	uniform 1
	Walls	zeroGradient	-
	Outlet	zeroGradient	-
	Fan/Propeller	zeroGradient	-
	AMI	cyclicAMI	-
Pressão (p_rgh)	Atmosphere	total pressure	uniform 0
	Inlet	fixedFluxPressure	uniform 0
	Walls	fixedFluxPressure	uniform 0
	Outlet	fixedValue	uniform 0
	Fan/Propeller	fixedFluxPressure	uniform 0
	AMI	cyclicAMI	uniform 0
K	Atmosphere	inletOutlet	uniform 0.06
	Inlet	fixedValue	uniform 0.06
	Walls	kqRWallFunction	uniform 0.06
	Outlet	inletOutlet	uniform 0.06
	Fan/Propeller	kqRWallFunction	uniform 0.06
	AMI	cyclicAMI	uniform 0.06

Os valores adotados para as propriedades físicas que caracterizam os fluidos utilizados na simulação numérica, se encontra na tabela 3.2.

Tabela 3.2-Propriedades físicas dos fluidos em estudo.

	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidade [m <sup>2</sup> /s]	Tensão superficial [N/m]
Água	1000	1e-06	0.07
Ar	1	1.48e-05	

### 3.5 Plano de Simulações numéricas

As simulações numéricas foram feitas em duas etapas:

- Simulação com o sistema de arejamento composto por várias turbinas no canal retangular analisando as perturbações ocorridas na velocidade.
- Simulação numérica no canal retangular tendo em conta os dois tipos de turbina para três velocidades de rotação diferentes, 40 rad/s, 79 rad/s e 158 rad/s para a turbina do tipo 1 e velocidades de rotação de 40 rad/s, 79 e 158 rad/s para o tipo 2.

As simulações numéricas demoraram um tempo equivalente a 0,4s para o sistema de arejamento completo e de 1s para as 2 configurações de turbinas a cada velocidade de rotação. O tempo de simulação foi curto por causa da limitação computacional (o cluster limitou o número de processadores, ficando os trabalhos em lista de espera prolongada e a capacidade de memória do computador pessoal era insuficiente para correr a simulação de uma forma rápida). Foi decidido ajustar o tempo de simulação numérica a 1 s, de forma a garantir que todos os modelos com turbinas diferentes tivessem o mesmo tempo de simulação numérica, para poder fazer uma comparação lógica dos resultados obtidos.

### 3.6 Pós- processamento

Os resultados obtidos da simulação numérica foram processados com recurso ao software ParaView versão 5.7.0, no qual foram retiradas as ilustrações da superfície livre, a entrada de ar no domínio e os perfis de velocidade, para análise e comparação dos resultados para cada modelo. De seguida com o Excel onde foi elaborado os gráficos de perfil de velocidade.

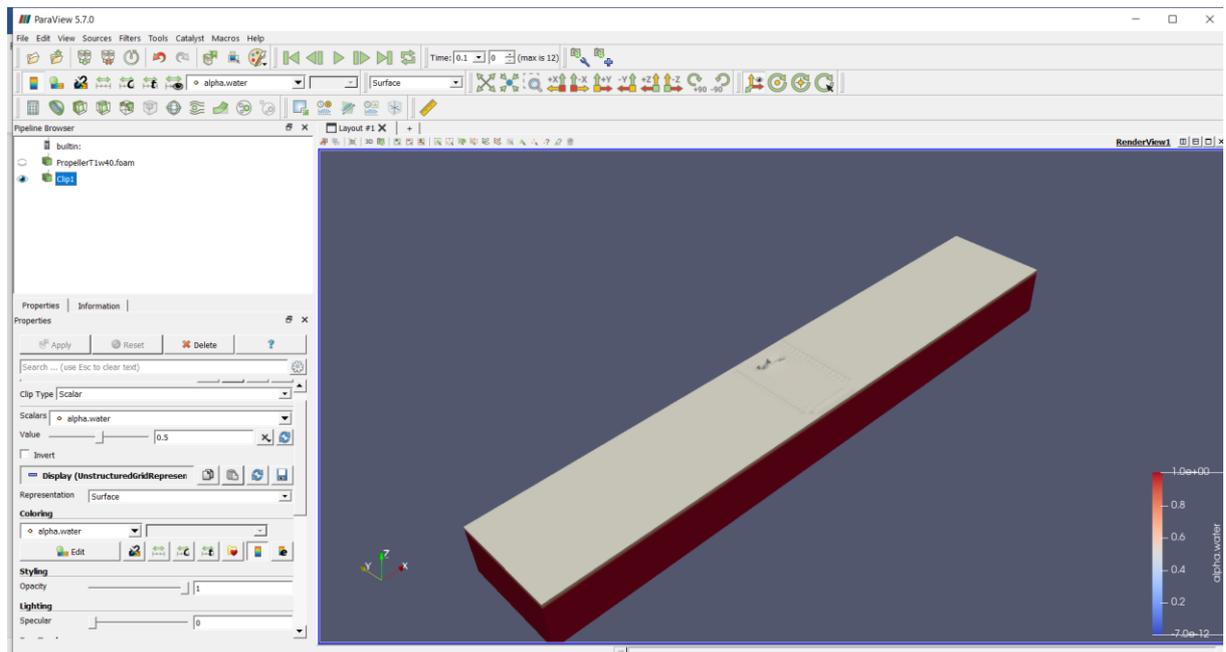


Figura 3.6- Interface do software ParaView versão 5.7.0.

## 4 RESULTADOS

Foi feito o pós-processamento para visualizar e comparar os resultados obtidos, com o sistema de arejamento e as turbinas posicionados no ponto (0,0,0) do domínio, à superfície livre, no centro do canal e a 0.2 m da parede. Primeiramente tentou-se observar as perturbações ocorridas na superfície livre através da distribuição da velocidade na superfície, entrada de ar e perfil transversal e longitudinal (figura 4.1) na superfície. Posteriormente foram feitos perfis verticais (figura 4.1) analisando as perturbações ocorridas na vizinhança do sistema de arejamento.

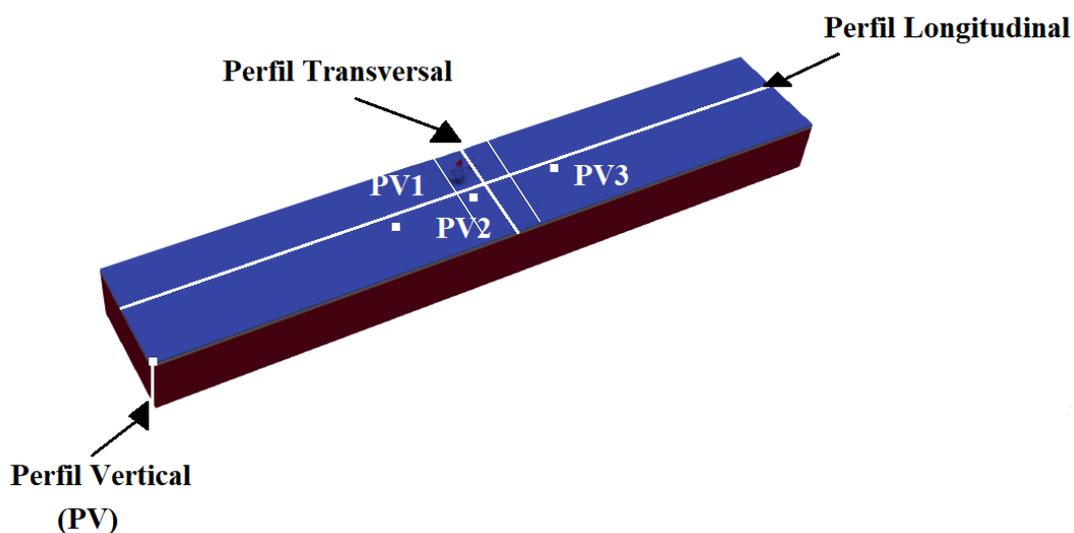


Figura 4.1- Representação dos perfis de velocidade.

## 4.1 Sistema de arejamento completo

Os resultados da simulação numérica para a vala com o sistema de arejamento composto por várias turbinas foram obtidos a partir da análise da distribuição da velocidade à superfície da vala de oxidação, a perturbação ocorrida na região do arejador.

### 4.1.1 Distribuição da Velocidade

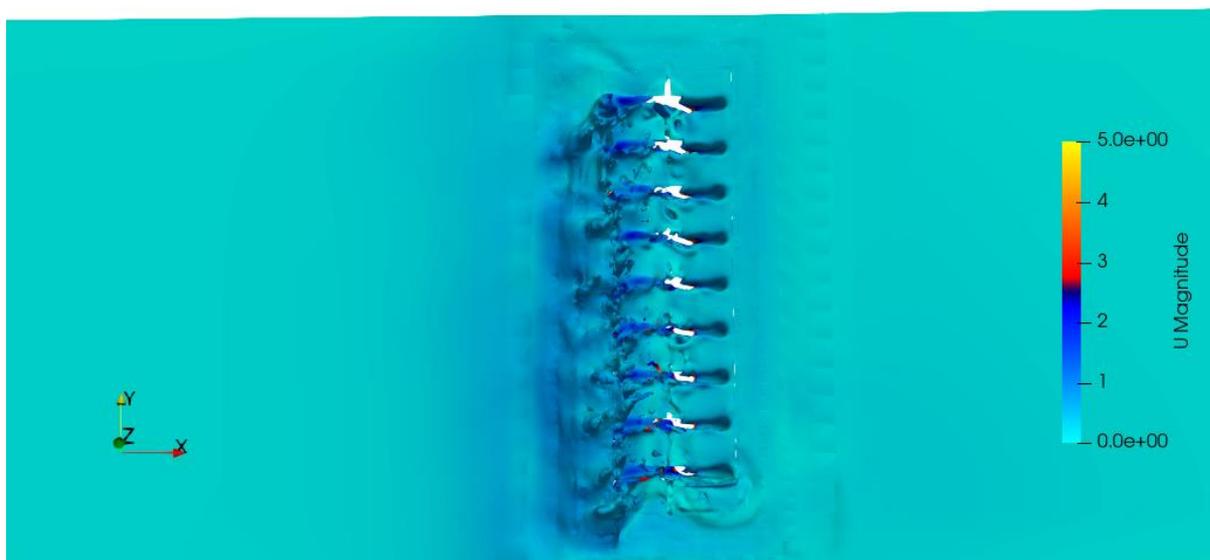


Figura 4.2- Distribuição da velocidade à superfície.

Analisando a distribuição da velocidade no sistema de arejamento composto por várias turbinas, nota-se que apesar do tempo de simulação ser curto, já começa a verificar-se uma dispersão da velocidade no domínio analisado.

#### 4.1.2 Perfil Longitudinal

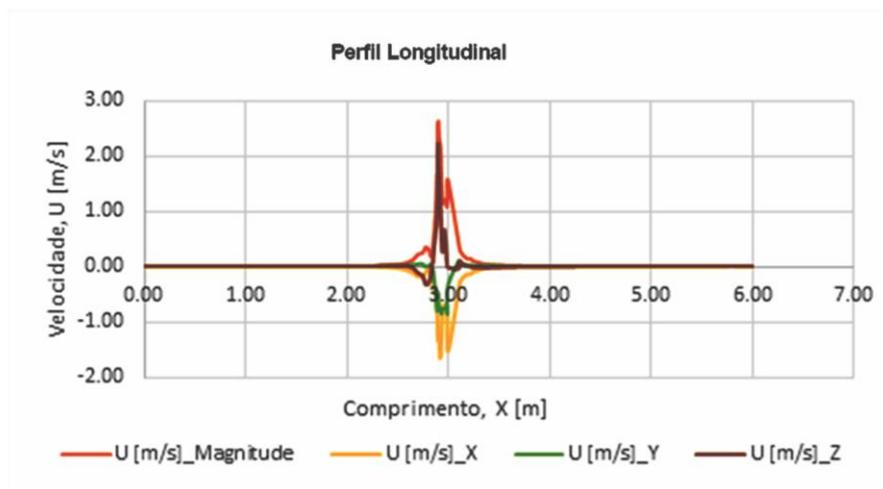


Figura 4.3-Perfil longitudinal no ponto (X, -0.3,-0.05, ver Figura 4.1).

Analisando o perfil longitudinal da velocidade, verifica-se que o sistema de arejamento começa a causar perturbações no domínio analisado a partir de 2,45 m, onde atinge o seu valor máximo a 0,1m de distância da turbina de 2,6 m/s e depois há uma quebra brusca da velocidade em que de seguida volta a atingir o segundo pico no ponto onde se encontra localizada a turbina com um valor de 1,56 m/s e depois há uma descida gradual da velocidade.

### 4.1.3 Perfis Transversais

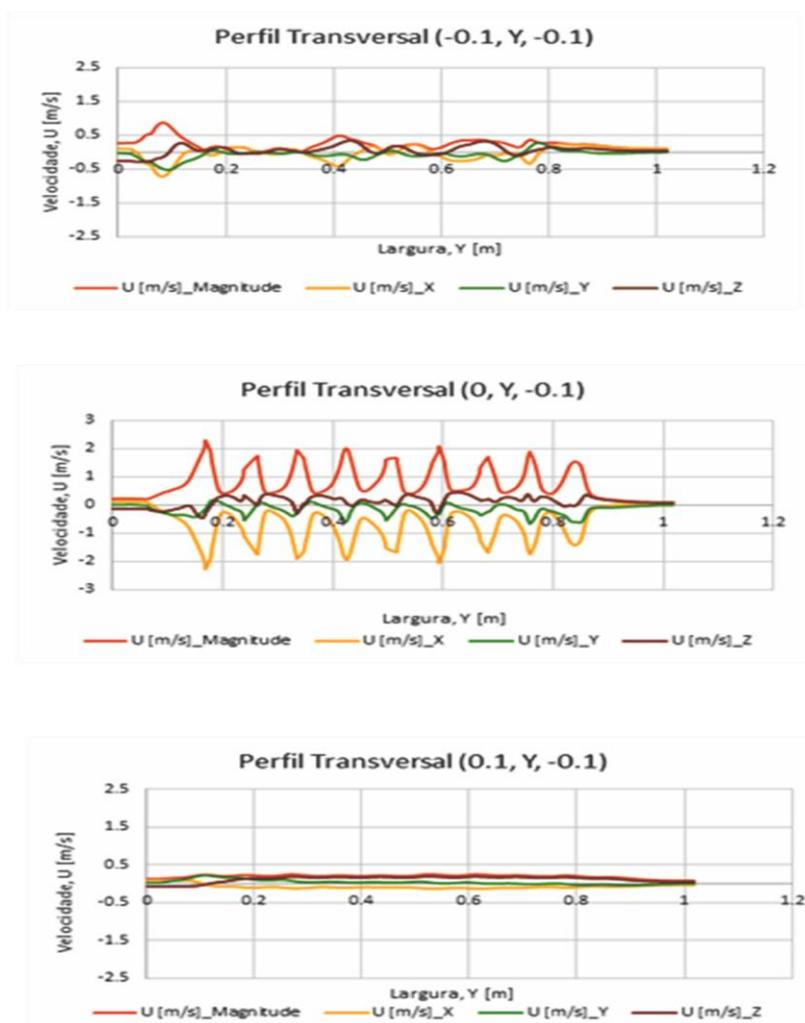


Figura 4.4- Perfis transversais na zona da turbina, eixo da turbina e de cada lado a 0.1 m do eixo da turbina, ligeiramente abaixo da superfície livre, ver Figura 4.1:  $(-0.1, Y, -0.1)$ ,  $(0, Y, -0.1)$  e  $(0.1, Y, -0.1)$ .

No perfil transversal da velocidade no ponto  $(-0.1, Y, -0.1)$  nota-se que a velocidade foi instável atingindo o seu valor máximo logo no início da secção transversal no valor de 0,09 m/s.

Na secção transversal onde se encontra o sistema de arejamento composto por várias turbinas (ponto  $(0, Y, -0.1)$ ), a velocidade oscilou de uma forma harmoniosa atingindo os valores máximos da velocidade nos pontos onde se encontram as turbinas e os valores mínimos das

velocidades no espaçamento entre as turbinas ao longo da secção transversal,  $U_{max}$  aproximadamente de 2 m/s e  $U_{min}$  aproximadamente de 0,2 m/s.

No ponto (0,1, -0,1), a velocidade continua a oscilar ao longo da secção transversal, mas a variação do valor da velocidade foi pequena,  $U_{max}$  aproximadamente de 0,25 m/s e  $U_{min}$  de aproximadamente 0,2 m/s.

#### 4.1.4 Perfil Vertical no ponto (0,-0.3, Z)

Analisando o perfil vertical do escoamento ( $0 < z < 0.5$  m) no canal de 1 m de altura com o sistema de arejamento completo.

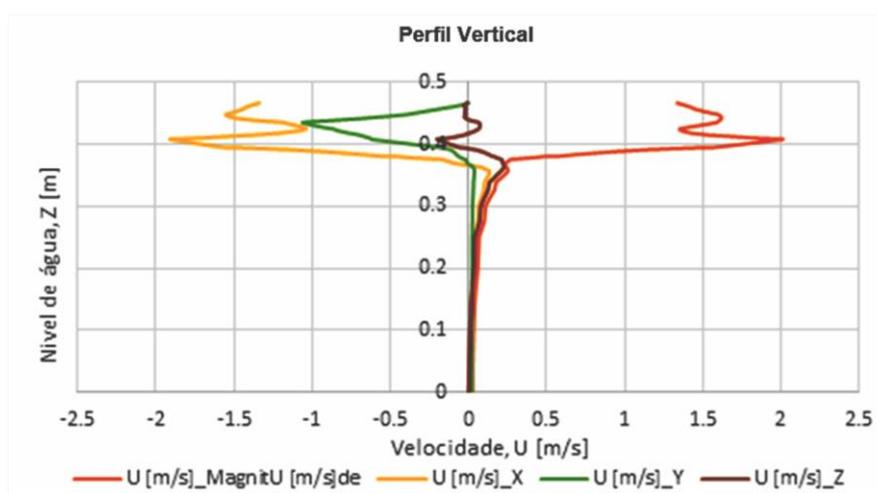


Figura 4.5-Perfil vertical no ponto (0,-0.3, Z).

No perfil vertical do ponto (0, -0.3, Z), verifica-se que a velocidade no fundo da vala começa com um valor nulo de velocidade e vai aumentando à medida que se vai aproximando da superfície, onde atinge o seu valor máximo à 0,1 m da superfície no valor de 2 m/s.

## 4.2 Sistema de arejamento composto por uma turbina

Os resultados da simulação numérica para a vala com o sistema de arejamento composto por uma turbina foram obtidos a partir da análise da distribuição da velocidade à superfície da vala de oxidação, a perturbação ocorrida ao longo do comprimento e profundidade da vala de oxidação.

#### 4.2.1 Distribuição da Velocidade

##### I. Turbina 1

Velocidade de Rotação 40 rad/s:



Figura 4.6-Distribuição da velocidade na superfície livre.

Velocidade de Rotação 79 rad/s:



Figura 4.7- Distribuição da velocidade na superfície livre.

Velocidade de Rotação 158 rad/s:

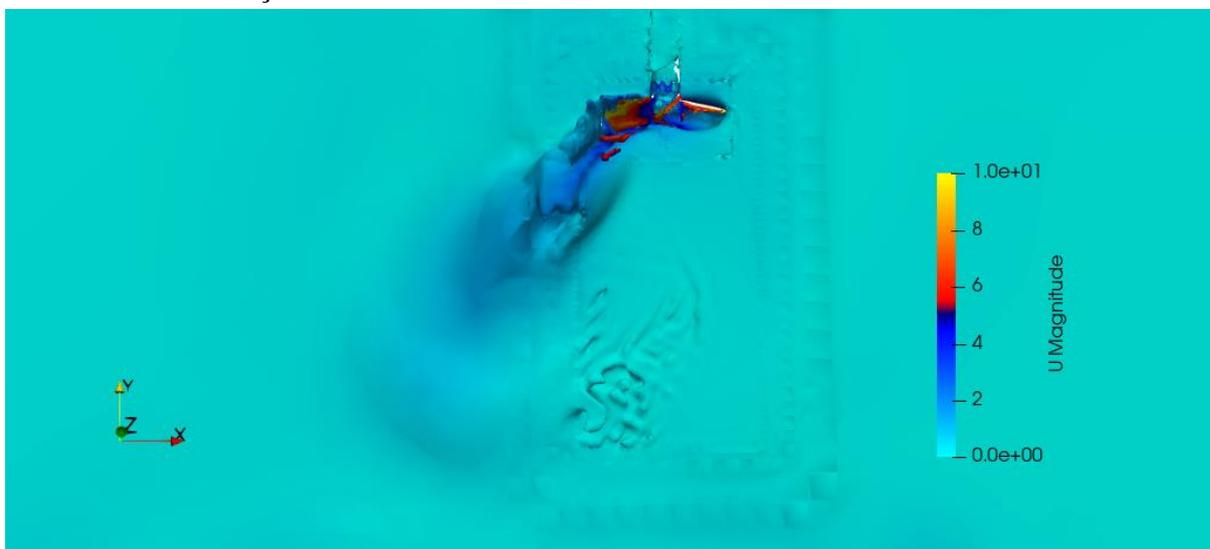


Figura 4.8-Distribuição da velocidade na superfície livre

## II. Turbina 2

Velocidade de Rotação 40 rad/s:

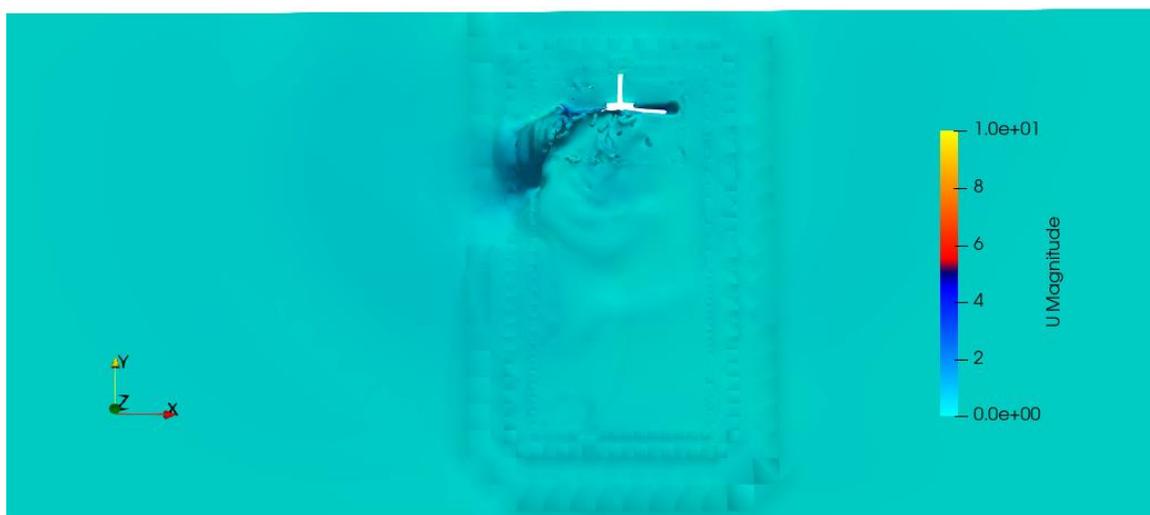


Figura 4.9- Distribuição da velocidade na superfície livre.

Velocidade de Rotação 79 rad/s:

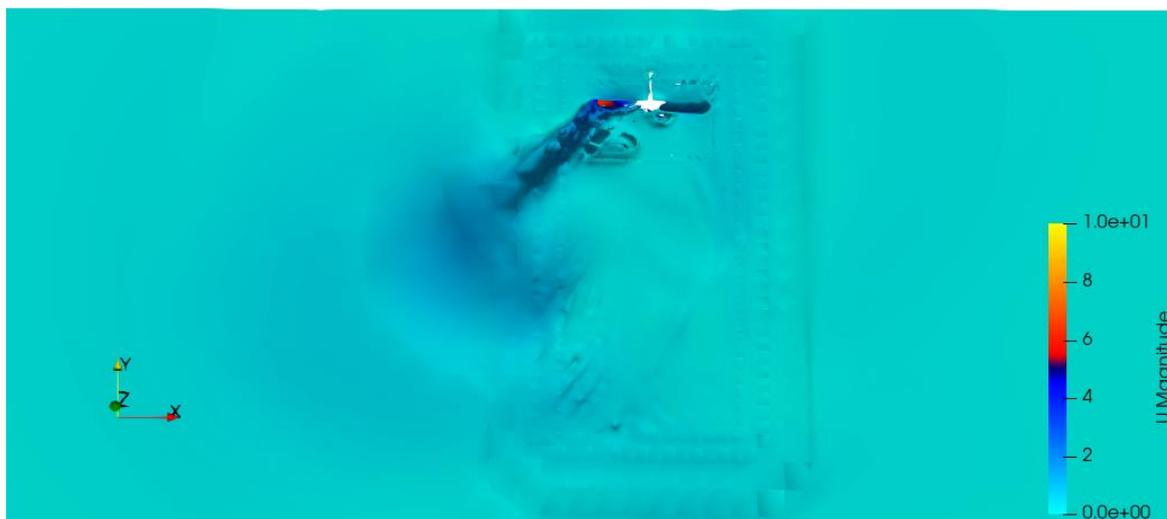


Figura 4.10- Distribuição da velocidade na superfície livre.

Velocidade de Rotação 158 rad/s:

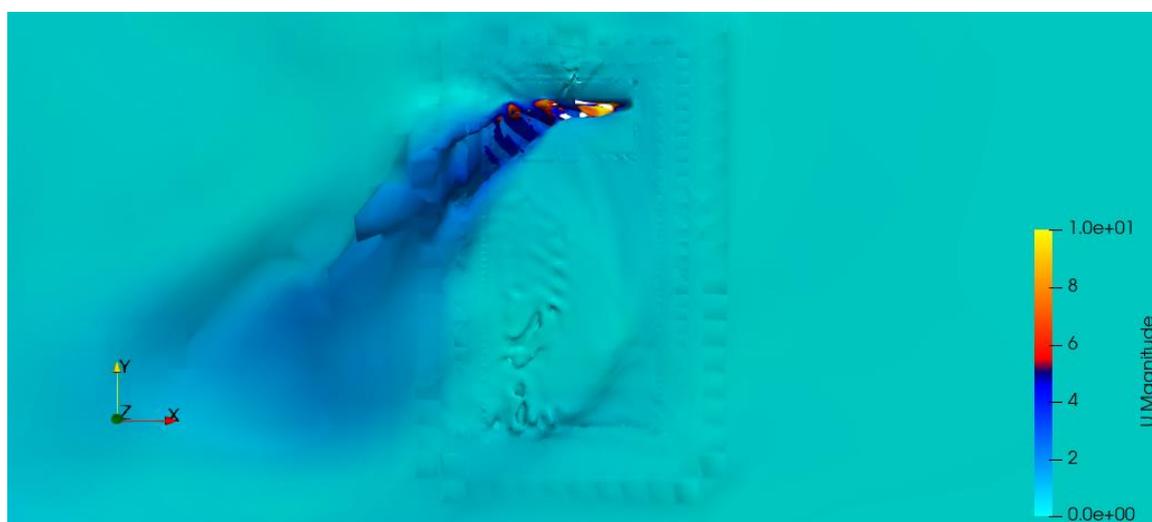


Figura 4.11- Distribuição da velocidade na superfície livre.

Analisando a superfície livre no tempo de simulação igual a 1s, é possível verificar que a perturbação causada pela turbina com velocidade de rotação igual a 158 rad/s no tipo de turbina 1 é maior que as restantes velocidades de rotação para este tipo de turbina. O mesmo verifica-

se no caso da turbina 2, mas a velocidade encontra-se mais dispersa no caso da turbina 2 a 158 rad/s comparativamente ao caso da turbina 1 a 158 rad/s.

## 4.2.2 Perfil Transversal

### I. Turbina 1

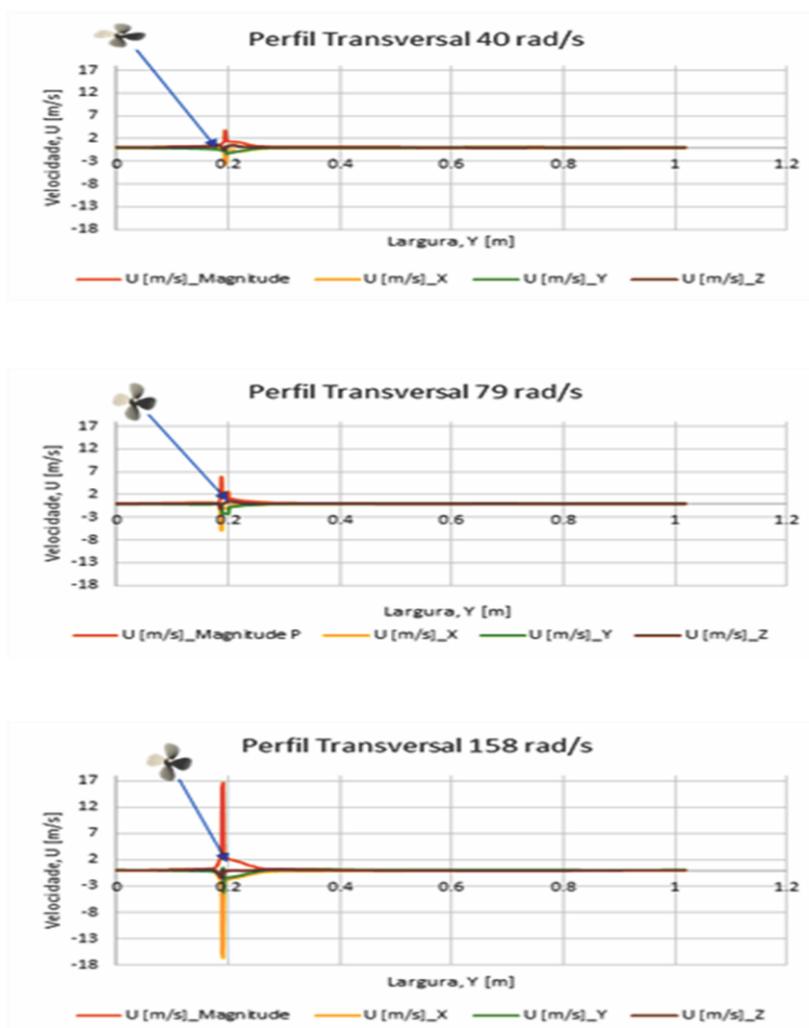


Figura 4.12- Perfil Transversal da turbina 1 no ponto (0, Y, -0.1).

Analisando o perfil transversal no ponto (0, Y, -0.1), é possível verificar que a turbina 1 a 40 rad/s causa uma ligeira perturbação na vala antes da turbina e atinge um pico imediatamente após localização da turbina conseguindo atingir uma velocidade em magnitude de 3,51 m/s e depois há uma diminuição progressiva da velocidade até ao final da vala.

No perfil transversal da turbina 1 a 79 rad/s nota-se que já começa a provocar alguma perturbação antes da localização da turbina e vai aumentando atingindo um pico logo após a mesma, no valor de 6,023 m/s e de seguida uma quebra acentuada da velocidade que posteriormente se converte numa descida gradual da velocidade até atingir um valor residual no final da vala.

Na figura 4.12, referente à turbina 1 a 158 rad/s, nota-se que a velocidade começa a aumentar imediatamente antes da localização da turbina, onde atinge um pico de magnitude igual a 16,4 m/s, seguido de uma quebra acentuada da velocidade e depois gradualmente deixa de se verificar perturbações na vala causada pela turbina.

## II. Turbina 2

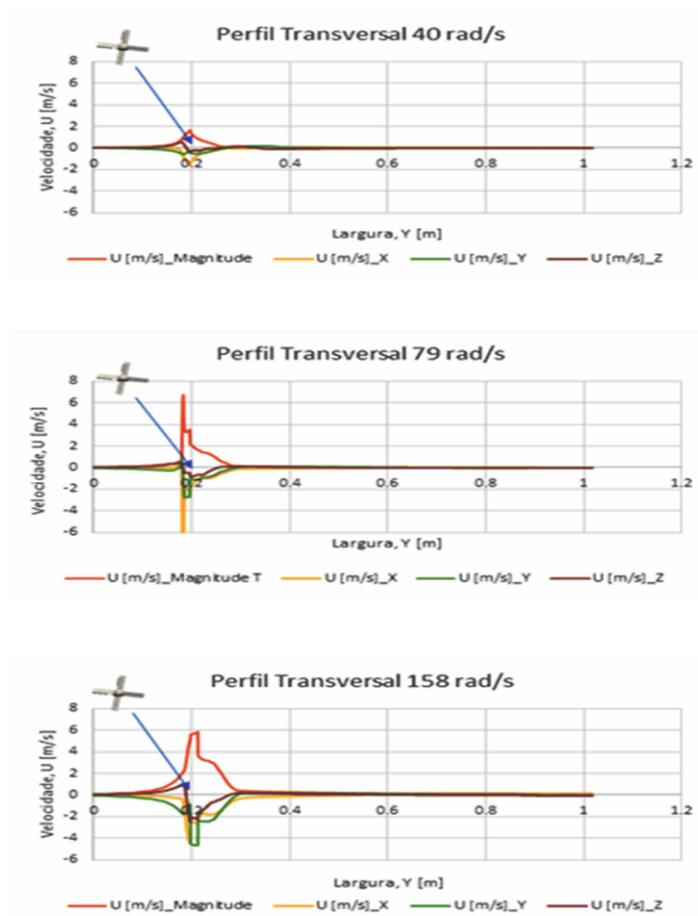


Figura 4.13- Perfil transversal da velocidade da turbina 2 no ponto (0, Y, -0.1).

No perfil transversal da turbina 2 a 40 rad/s nota-se um aumento gradual da velocidade até atingir um pico na localização da turbina no valor de 1,67 m/s, depois ocorre uma descida gradual até ao final do domínio analisado.

No caso da turbina 2 a funcionar a 79 rad/s e a 158 rad/s, começa-se a notar alguma perturbação da velocidade no início da secção transversal da vala. De seguida há um aumento brusco da velocidade atingindo o pico de 6,7 m/s para a turbina 2 a 79 rad/s e de 6 m/s para a turbina 2 a 158 rad/s, na região onde se encontra a turbina. Por fim, há uma descida gradual da velocidade até o fim da secção transversal.

### 4.2.3 Perfil Longitudinal

#### I. Turbina 1

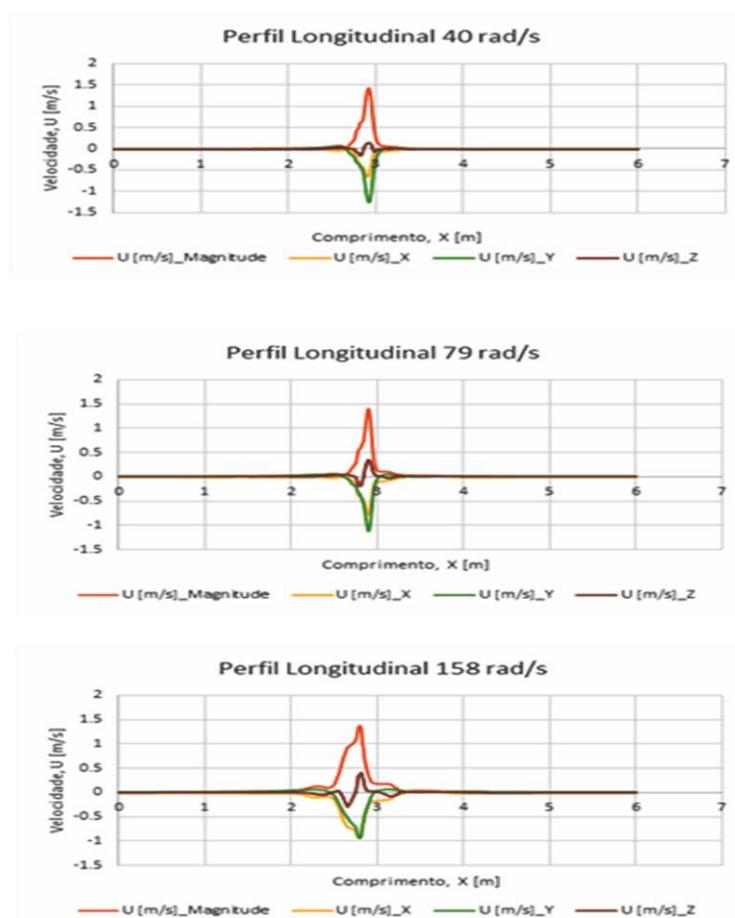


Figura 4.14 -Perfil longitudinal da velocidade da turbina 1 no ponto (X, -0.02, -0.023).

No perfil longitudinal da turbina 1 a 40 rad/s verifica-se que a perturbação na velocidade começa a partir dos 2 m da vala e vai até 3,52 m, atingindo o valor mais alto no ponto  $X=3$  m com um valor de 1,38 m/s.

Analisando o gráfico da turbina 1 a 79 rad/s, verifica-se que a perturbação na velocidade começa a partir dos 2 m da vala e vai até 3,55 m, atingindo o valor mais alto no ponto  $X=3$  m com um valor de 1,36 m/s.

Analisando a Turbina 1 a 158 rad/s verifica-se que a perturbação na velocidade começa antes dos 2 m da vala e vai até praticamente os 4 m, atingindo o valor mais alto no ponto  $X=2,78$  m com um valor de 1,36 m/s.

Não existe grande discrepância nos valores máximos atingidos pela turbina 1 operando nas 3 velocidades diferentes. A perturbação ocorrida à superfície tem praticamente a mesma extensão, contudo, no caso da velocidade de rotação a 158 rad/s começa-se a observar velocidades maiores logo ao início da área perturbada comparativamente aos restantes casos.

## II. Turbina 2

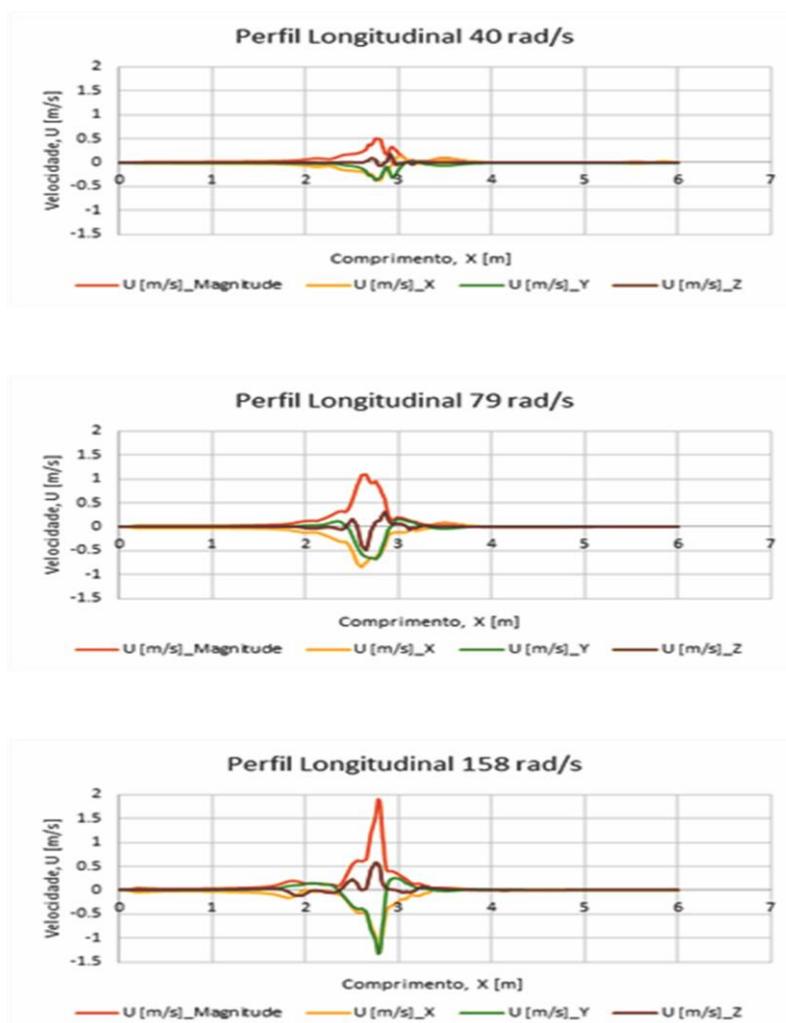


Figura 4.15- Perfil longitudinal da velocidade da turbina 2 no ponto (X, -0.02, -0.023).

Relativamente à Turbina 2, operando a 40 rad/s, a perturbação ocorre praticamente ao longo do domínio analisado. Nota-se que o perfil próximo da turbina tem uma grande irregularidade nas velocidades registadas e atinge um pico no ponto  $X = 2,78$  m com um valor em magnitude de 0,5 m/s.

No perfil longitudinal no caso da turbina 2 a funcionar a 79 rad/s verifica-se uma pequena perturbação logo no início do domínio analisado, e depois vai aumentando até atingir o seu valor máximo de 1,1 m/s, a uma distância de menos 0,5 m do ponto onde se encontra localizada a Turbina.

No perfil longitudinal no caso da turbina 2 a funcionar a 158 rad/s, verifica-se uma pequena perturbação logo no início do domínio analisado e depois vai aumentando até atingir o seu valor máximo de 2 m/s. De seguida a velocidade decai até atingir o valor nulo ao se afastar da localização da turbina.

### III. Comparação dos dois tipos de arejamento

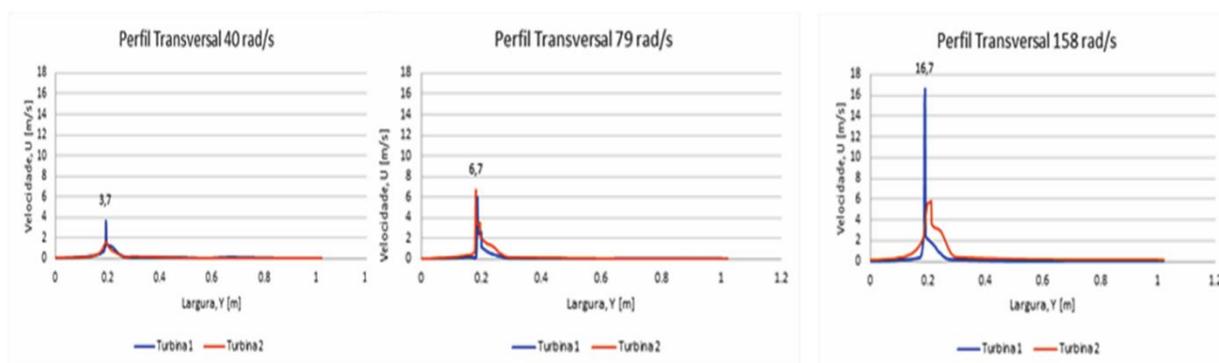


Figura 4.16- Perfil longitudinal para os dois tipos de turbina.

Analisando a perturbação causada tendo em conta os dois tipos de turbina, nota-se que a turbina 1 consegue atingir valores de velocidade bem superiores ao aproximar da localização da turbina enquanto a turbina 2 apesar de ter a mesma velocidade de rotação o pico verificado foi bem inferior. A turbina 2 a 79 rad/s conseguiu causar uma maior perturbação na vizinhança da turbina do que a turbina 1, conseguindo registar um pico superior que a turbina 1 de 6,7 m/s vs. 6 m/s.

#### 4.2.4 Entrada de ar

Para que haja a entrada de ar na superfície livre e consequentemente o arejamento da água residual, é necessário satisfazer dois critérios: a velocidade na superfície livre tem de atingir um certo valor crítico (no caso de escoamentos ar-água a velocidade do vetor normal à superfície tem de ser superior a 0,8 m/s) e as características turbulentas na interface devem ser superiores a  $0,2\text{m}^2/\text{s}^2$  para que exista formação de ondas superficiais, que durante a sua quebra transportam o ar para dentro da água (Lopes, et al., 2017).

**I. Turbina 1**

Velocidade de Rotação 40 rad/s:



Figura 4.17- Entrada de ar na vala.

Velocidade de Rotação 79 rad/s:

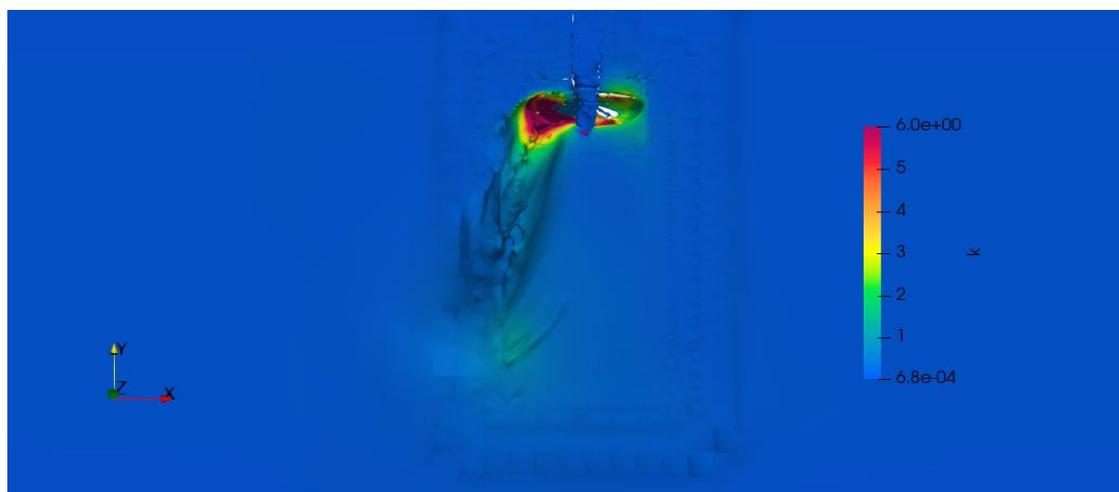


Figura 4.18-Entrada de ar vala.

Velocidade de Rotação 158 rad/s:

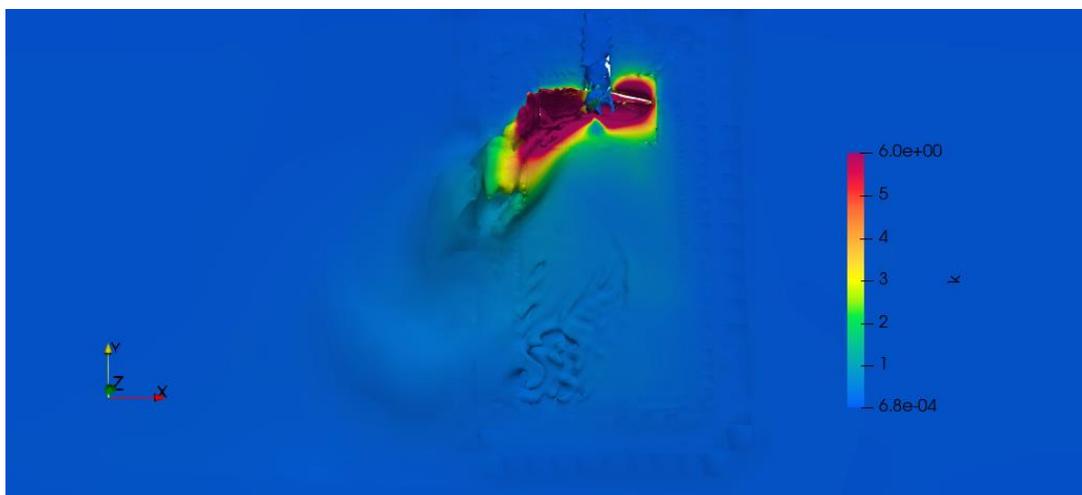


Figura 4.19- Entrada de ar na vala.

No caso da turbina 1 a 40 rad/s já existe numa pequena zona onde se dá a transferência de ar na vala o que sugere que nos restantes casos haveria uma maior transferência de ar da atmosfera para a vala pois mais locais indicam condições propícias à entrada de ar. No caso da turbina a 79 rad/s a entrada de ar ficou localizada perto da turbina com valores elevados e no final da onda gerada por causa da perturbação na vala. No caso da turbina a 158 rad/s verifica-se que a entrada de ar ficou concentrada na região onde se encontra localizada a turbina e a distribuição do ar no domínio seria mais uniforme conseguindo atingir uma porção maior comparativamente às outras velocidades de operação.

## II. Turbina 2

Velocidade de Rotação 40 rad/s:

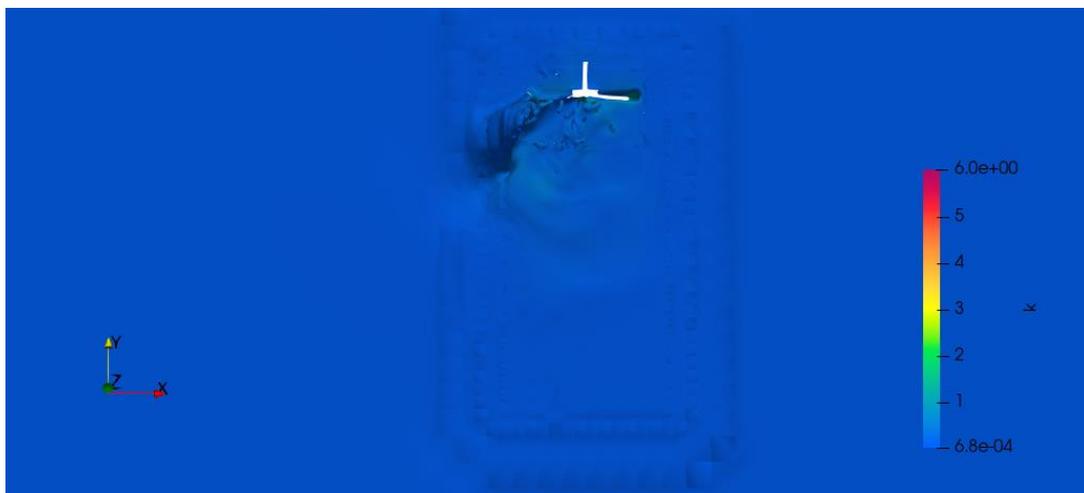


Figura 4.20- Entrada de ar na vala.

Velocidade de Rotação 79 rad/s:

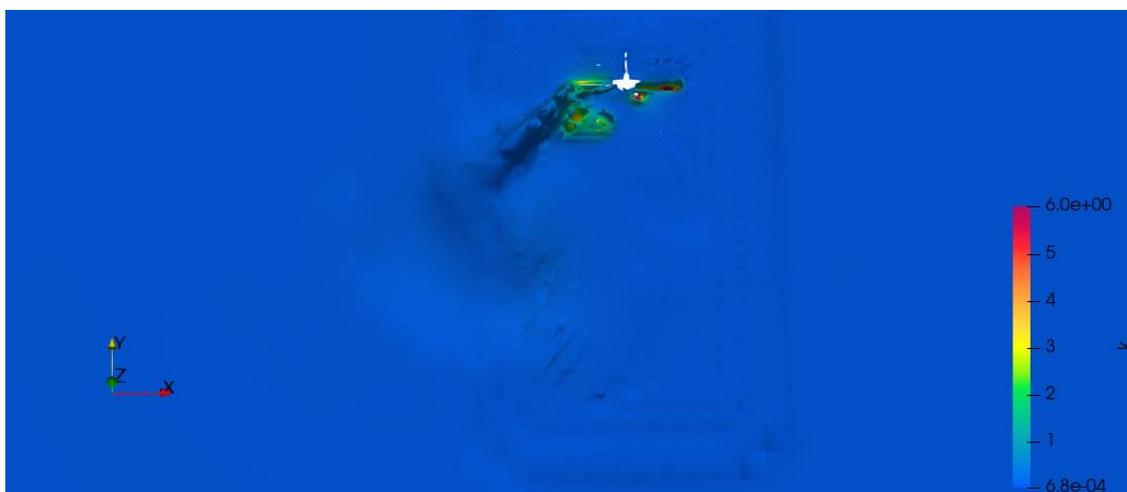


Figura 4.21- Entrada de ar na vala.

Velocidade de Rotação 158 rad/s:

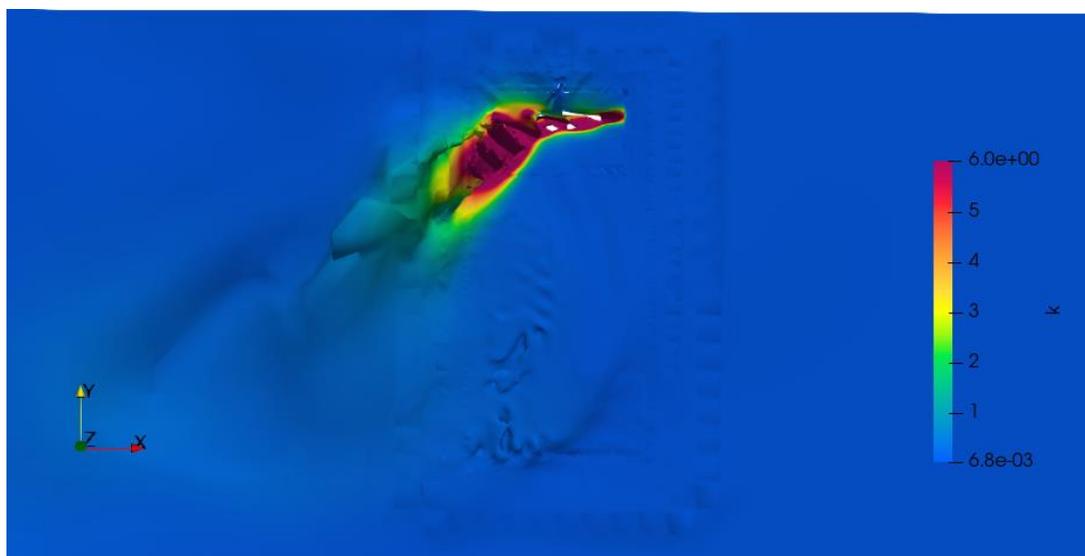


Figura 4.22- Entrada de ar na vala.

No caso da turbina 2, verificou-se que a entrada de ar no domínio foi pequena nas duas primeiras velocidades de rotação, concentrando-se na região da turbina. Mas no caso da turbina 2 a funcionar a 158 rad/s a entrada de ar no domínio analisado foi consideravelmente alta na localização da turbina.

#### 4.2.5 Perturbações ao Longo da Profundidade

Para analisar o que acontece ao longo da profundidade, foram retirados perfis verticais para diferentes tipos de casos de modo a verificar a perturbação causada por cada tipo de turbina e a cada velocidade de rotação. A secção retangular tem 1 m de altura, sendo que o nível de água na secção é de 0,5 m.

#### 4.2.5.1 Perfil Vertical analisado na vizinhança da turbina (0, -0.2, Z)

##### I. Turbina 1

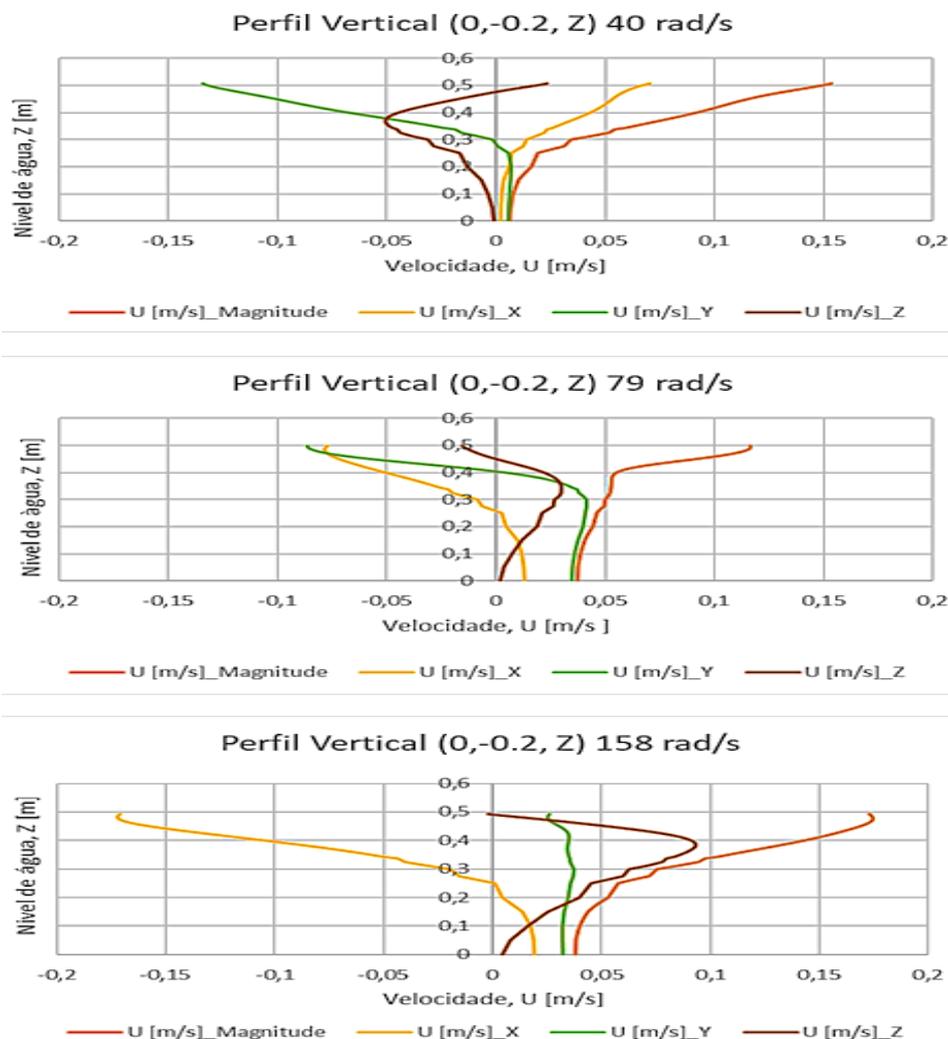


Figura 4.23-Perfil Vertical da velocidade da turbina 1 no ponto (0, -0.2, Z).

No caso da turbina 1, a funcionar a 40 rad/s, a velocidade em magnitude no fundo da vala inicia com uma velocidade residual de aproximadamente 0,03 m/s e vai aumentando à medida que se vai aproximando da superfície atingindo o seu valor máximo a 0,34 m/s. A componente Z da velocidade inicia com um valor nulo e vai aumentando até ao ponto  $Z = 0,43$  m e depois muda o sentido de deslocamento atingindo velocidades negativas à superfície do domínio analisado.

Para a velocidade da turbina a 79 rad/s, o perfil da velocidade em magnitude tem uma variação idêntica ao da turbina à 40 rad/s, mas o valor da velocidade máxima em magnitude na superfície é inferior do que no caso da turbina 1 a 40 rad/s, alcança os 0,12 m/s devido ao facto de a

componente X e Y da velocidade se deslocar no sentido contrário ao do movimento afetando o valor da magnitude.

No caso da turbina 1 a operar a 158 rad/s, verifica-se que a componente Y da velocidade se mantém praticamente constante ao aproximar da superfície. De acordo com a componente X da velocidade existe uma deslocação contrária à do movimento originando um valor negativo de -0.15 m/s influenciando o valor da velocidade em magnitude que atinge o seu valor máximo à superfície de 0,17 m/s.

Como se pode verificar a partir das figuras, o valor da velocidade em magnitude no caso da turbina a funcionar em 40 rad/s consegue atingir valores bastante superior à superfície comparativamente os restantes casos.

## II. Turbina 2

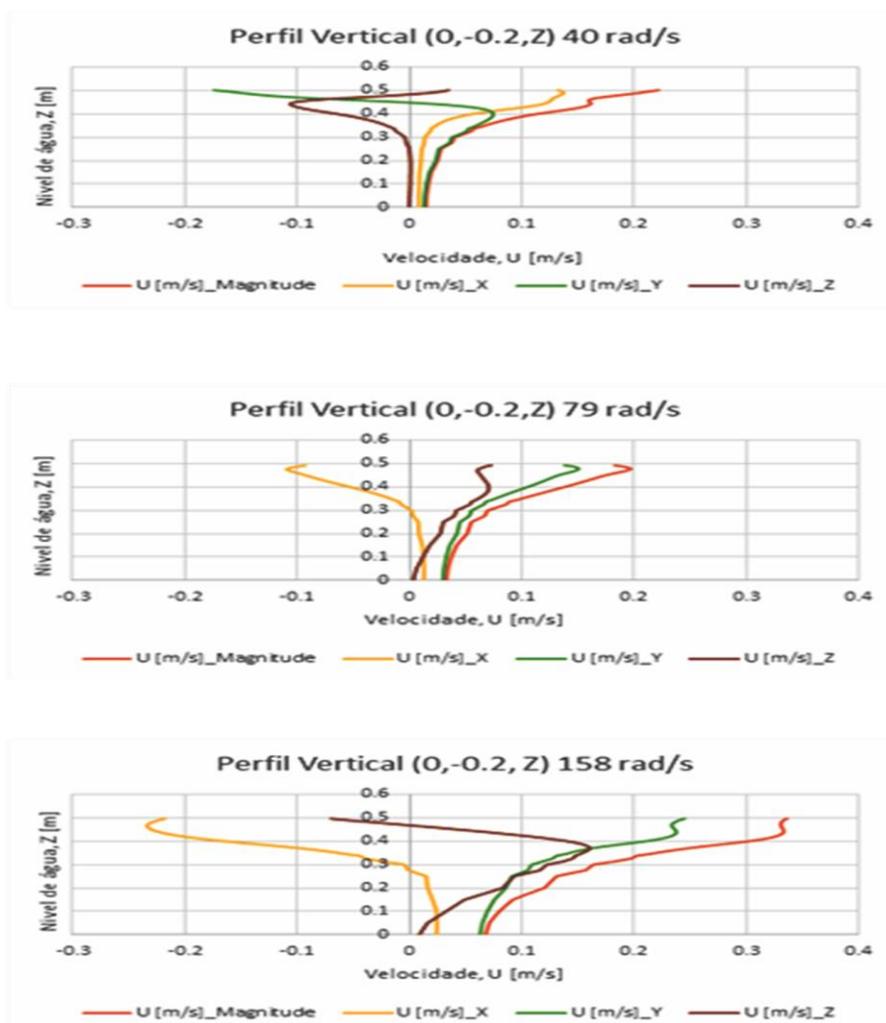


Figura 4.24- Perfil vertical da velocidade da turbina 2 no ponto (0, -0.2, Z).

No caso da turbina 2 a funcionar a 40 rad/s, é possível verificar que a velocidade em magnitude aumenta com o aproximar da superfície atingindo o seu valor máximo de 0,22 m/s.

Comparativamente ao caso da turbina 1, a velocidade em magnitude da turbina 1 é superior à da turbina 2, mas a componente X da velocidade na turbina 2 segue o sentido do escoamento e consegue atingir um valor máximo superior que no caso da turbina 1 a mesma velocidade 0,03 m/s versus 0,2 m/s no caso da turbina 2.

No caso da turbina 2 a funcionar a 79 rad/s, verifica-se que a velocidade no fundo da vala tem um valor em magnitude baixo, de aproximadamente 0,03 m/s, a partir do qual vai aumentando

até atingir o seu valor máximo antes da superfície livre de 0,196 m/s e na superfície livre o valor da velocidade foi de 1,82 m/s.

#### 4.2.5.2 Perfil Vertical analisado no ponto (-1,-0.3, Z)

##### I. Turbina 1

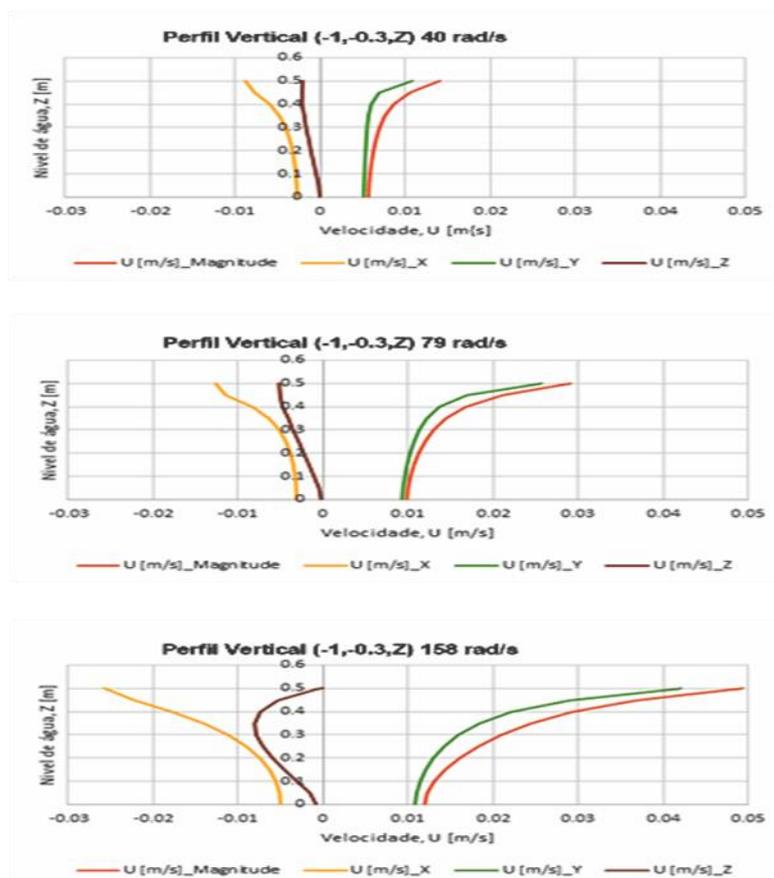


Figura 4.25- Perfil vertical no ponto (-1,-0.3, Z).

No caso da turbina 1 a 40 rad/s no ponto (-1,-0.3, Z), a magnitude da velocidade no fundo da vala começa com um valor residual pequeno de 0,006 m/s e aumenta com o aumento do nível de água, atingindo o seu valor máximo à superfície de 0,014 m/s. A componente Z da velocidade regista uma pequena alteração no sentido contrário ao deslocamento de 0 a -0,002 m/s.

Relativamente à turbina 1 a 79 rad/s a magnitude da velocidade à superfície é de 0,029 e vai diminuindo com a profundidade da vala até atingir um valor de 0,01 m/s.

No caso da turbina 1 a funcionar a 158 rad/s a magnitude da velocidade à superfície é de praticamente 0,05 m/s e vai diminuindo com a profundidade até sensivelmente 0,01 m/s. A componente Z da velocidade no fundo da vala inicia com um valor nulo da velocidade onde de seguida aumenta até ao nível de água 0,3 m e volta a diminuir até atingir novamente um valor nulo da velocidade.

## II. Turbina 2

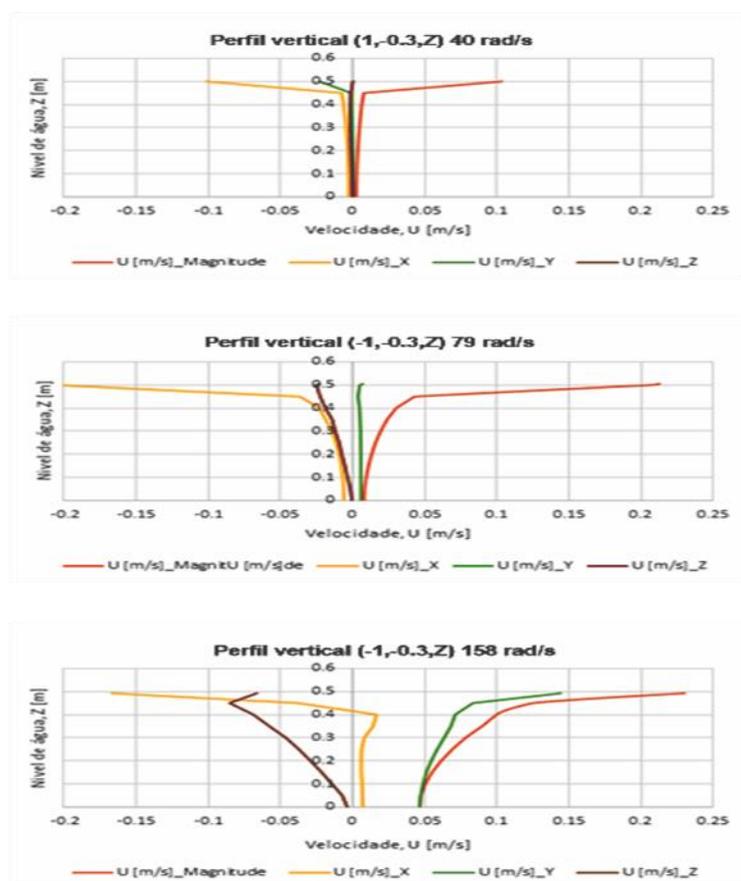


Figura 4.26-Perfil vertical no ponto (-1,-0.3, Z).

A magnitude da velocidade da turbina 2 a 40 rad/s inicialmente à superfície tem um valor de 0,1 m/s, depois verifica-se uma descida brusca da velocidade até ao nível de água  $Z=0,45$  m e finalmente aproxima-se de zero até atingir ao fundo da vala. A componente Z da velocidade praticamente não varia ao longo da profundidade mantendo-se sempre com um valor aproximadamente nulo.

#### 4.2.5.3 Perfil Vertical analisado no ponto (1,-0.3, Z)

##### I. Turbina 1

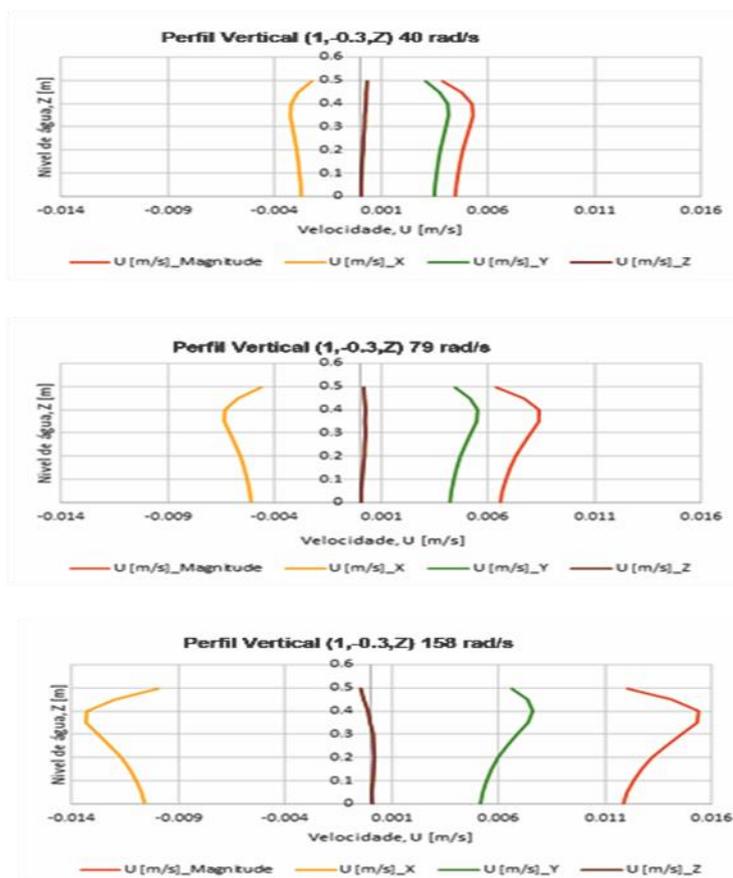


Figura 4.27- Perfil vertical no ponto (1,-0.3, Z).

O perfil da velocidade no caso da turbina 1 a 40 rad/s registou valores pequenos com o aumento da profundidade da vala, valores esses em que o máximo ronda os 0,005 m/s. A componente Z da velocidade à superfície inicia com um valor de 0,0003 m/s e diminui com o aumento da profundidade até se igualar a 0 no fundo da vala.

O perfil da velocidade no caso da turbina 1 a 79 rad/s registou valores pequenos da velocidade, inferiores a 0,01 m/s absoluto. A componente Z da velocidade ao longo da profundidade da vala manteve-se praticamente constante com um valor aproximadamente nulo.

O perfil da velocidade no caso da turbina 1 a 158 rad/s registou valores inferiores a 0,016 m/s absoluto. A componente Z da velocidade à superfície inicia com um valor pequeno de -0,00046 m/s e vai diminuindo com o aumento da profundidade da vala até atingir a 0 no fundo da vala.

Analisando a perturbação causada pela turbina 1 nas 3 velocidades de rotação diferentes nota-se que as componentes da velocidade não tem grande variação ao longo da profundidade vala. Os valores máximos registados são inferiores a 0,02 m/s, podendo-se afirmar que a partir de um metro após a turbina praticamente não existe perturbações na velocidade com o aumento da profundidade da vala.

## II. Turbina 2

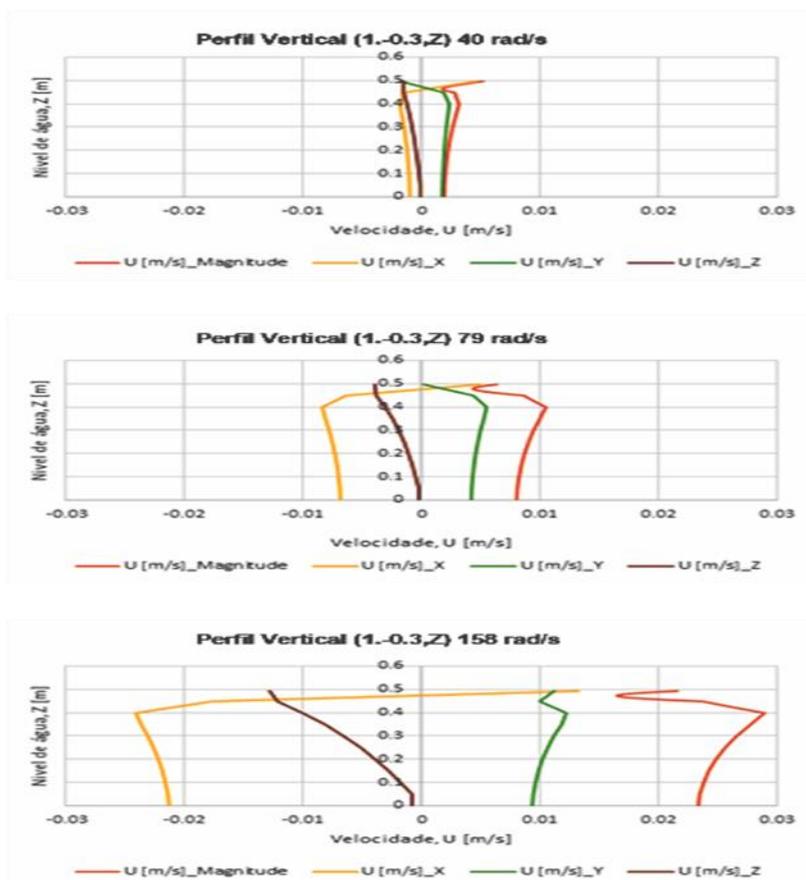


Figura 4.28- Perfil vertical no ponto (1,-0.3, Z).

No perfil da velocidade da turbina 2 a 40 rad/s, continua a registar quebras bruscas da velocidade ao longo da profundidade, mas o valor máximo da velocidade atingida pela magnitude da velocidade à superfície é de 0,0051 m/s e no fundo da vala atinge os 0,002 m/s.

## 5 CONCLUSÃO

A presente dissertação definiu como objetivo averiguar a possibilidade de utilizar a biblioteca OpenFOAM® para estudar o escoamento de uma vala de oxidação, incluindo o funcionamento do sistema de arejamento analisando as perturbações causadas pelas turbinas no escoamento.

Os objetivos foram cumpridos, verificou-se que o OpenFOAM® é uma ferramenta poderosa para estudar o funcionamento do sistema de arejamento e seu impacto na vala de oxidação. O uso do “solver” interFoam que utiliza o método do volume de fluidos para estudar a superfície livre do escoamento, permite prever a perturbação ocorrida na superfície livre e as velocidades ao longo da vala.

Apesar de que o tempo de simulação numérica foi relativamente curto para perceber com maior precisão as perturbações causadas pelo sistema de arejamento, conseguiu-se ver a perturbação causada pelo sistema de arejamento completo e também pelos diferentes tipos configurações de turbina, prever a localização da entrada de ar no domínio e a variação da velocidade em diversos pontos do domínio analisado.

A turbina 1, comparativamente com a turbina 2, consegue causar maior perturbação na velocidade o que ajuda no fenómeno de entrada de ar na vala. Sendo assim, parece possível afirmar que se o sistema de arejamento fosse constituído apenas pelas turbinas do tipo 1, potencialmente haveria um menor custo de energia de operação e uma maior eficiência no processo de arejamento da vala de oxidação.

No entanto é necessário desenvolver mais estudos que relaciona a entrada de ar na vala de oxidação e os custos energéticos, sendo necessário validar os resultados obtidos pela simulação numérica com ensaios experimentais, de forma a contribuir para a otimização do processo de arejamento da vala de oxidação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akunna J. C. (2018). *Biological Treatment Processes. Anaerobic Waste-Wastewater Treatment and Biogas Plants*. <https://doi.org/10.1201/9781351170529-1>
- Cornet, C. (2019). Fluence Value from Water, (Março)
- Crawford, J.F. and Smith. P.G. (1984). "Landfill Technology", 1ª Edição.
- Fan, L., Xu, N., Wang, Z. and Shi, H., (2010). PDA experiments and CFD simulation of a lab-scale oxidation ditch with surface aerators. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2009.07.013>
- Fayolle, Y., Cockx, A., Gillot, S., Roustan, M., Héduit, A. and Mahe, E., (2007). Oxygen transfer prediction in aeration tanks using CFD, 62(24), 7163–7171. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.08.082>
- Guo ,X., Zhou ,X., Chen ,Q. and Liu, J., (2013). Flow field and dissolved oxygen distributions in the outer channel of the Orbal oxidation ditch by monitor and CFD simulation. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25(4), 645–651. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60114-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60114-4)
- Lei, L., and Ni, J. (2014). Three-dimensional three-phase model for simulation of hydrodynamics, oxygen mass transfer, carbon oxidation, nitrification and denitrification in an oxidation ditch. *Water Research*, 53, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.021>
- Lopes, P., Leandro, J., and Carvalho, R. F. (2017). Self-Aeration Modelling Using a Sub-Grid Volume-Of-Fluid Model.
- Marrecos, H. M., Santos, M., Barreiros, A. and Albuquerque, A. (2016). *Tratamentos de águas residuais. Bio4Life*. Retrieved from <https://www.bio4life.pontogdegiro.com/index.php/preservacao-ambiental/tratamento-de-aguas-residuais>
- Moin, P., and Mahesh, K. (1998). DIRECT NUMERICAL SIMULATION: A Tool in Turbulence Research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30(1), 539–578. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.539>
- Oliveira, L. A. and Lopes, A. (2012). *Mecânica DOS FLUIDOS, 4ª Edição*, Lidel

Pasveer, A. (1969). The Oxidation Ditch: Principles, Results and Applications. *Low Cost Waste Treatment*, 163–171.

Pope, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge: Cambridge University Press.  
doi:10.1017/CBO9780511840531.

The OpenFoam Foundation, (2014). *The OpenFOAM User Guide v. 7*, (July), 212.

Tu, J., Yeoh, G.-H., and Liu, C., (2013). Practical Guidelines for CFD Simulation and Analysis. *Computational Fluid Dynamics, M*, 219–273. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-098243-4.00006-8>

Xie, H., Yang, J., Hu, Y., Zhang, H., Yang, Y., Zhang, K., Zhang, K., Zhu, X., Li, Y. and Yang, C., (2014). Simulation of flow field and sludge settling in a full-scale oxidation ditch by using a two-phase flow CFD model. *Chemical Engineering Science*, 109, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.02.002>

Zhang, Y., Zheng, Y., Fernandez-Rodriguez, E., Yang, C., Zhu, Y., Liu, H., and Jiang H., (2016). Optimization design of submerged propeller in oxidation ditch by computational fluid dynamics and comparison with experiments. *Water Science and Technology*, 74(3), 681–690. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.184>